PENGEMBANGAN METODOLOGI REKA BENTUK PROSES SISTEM SEL FUEL MEMBRAN PENUKARAN PROTON UNTUK PENCAPAIAN PRESTASI OPTIMUM

MULYAZMI

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH DOKTOR FALSAFAH

FAKULTI KEJUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2013

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang setiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

2 Disember2013 MULYAZMI

P 46812

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

PENGHARGAAN

Segala puji ke Atas Allah s.w.t, pemilik segala ilmu pengetahuan dan rahsia di segenap pelusuk alam. Selawat dan salam ke atas junjungan Nabi Muhammad s.a.w yang telah diutus sebagai rahmat untuk sekalian alam, ke atas keluarganya, para sahabat dan sekalian yang berjuang di atas nama Ilahi.

Penulis mengambil kesempatan ini untuk merakamkan penghargaan kepada Jabatan Kejuteraan Kimia dan Proses dan Institut sel fuel , Universiti Kebangsaan Malaysia yang telah memberi kesempatan kepada penulis untuk mengikuti program ini. Setinggi- tinggi penghargaan dan terima kasih kepada penyelia utama, Prof. Ir. Dato' Dr. Wan Ramli Wan Daud serta penyelia bersama lainnya Dr Edy Herianto Majlan, yang tidak pernah mengenal erti jemu dalam memberi bimbingan, didikan, dorongan, teguran serta pandangan untuk membantu penulis menyelesaikan penulisan yang memiliki makna yang besar ini. Tidak lupa juga saya ucapkan terima kasih yang tidak terhingga kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Sains Teknologi dan Inovasi yang menjana projek ini di bawah geran penyelidikan UKM-AP-TK-05-2009 .

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

ABSTRAK

Reka bentuk optimum sistem proses sel fuel membran pertukaran proton (PEMFC) bahagi aplikasi bekalan kuasa sebagai fungsi parameter operasi adalah faktor penting untuk mencapai prestasi opimum. Sistem PEMFC boleh diperbaiki dengan membangun teknik pemodelan matematik dan simulasi terkini untuk mencapai keadaan operasi yang terbaik. Salah satu faktor yang mempengaruhi prestasi PEMFC adalah kandungan air di dalam membran. Fokus utama kajian ini adalah membangun dan mengembangkan reka bentuk sistem proses PEMFC untuk memperoleh prestasi sistem yang optimum. Kajian ini ditujukan kepada sistem stek PEMFC, suapan bahan tindak balas, pengurusan haba dan jisim, serta keadaan operasi. Oleh itu, beberapa alternatif strategi telah dibangunkan untuk pencapaian prestasi optimum sistem. Pertama, penentuan keseimbangan air pada sistem berdasarkan fenomena pengangkutan air. Kajian ini menunjukan bahawa, resapan air melalui membran dari sisi katod ke sisi anod tidak berlaku pada kelembapan relatif katod (RHK) 20% dan kelembapan relatif anod (RHA) 58%. Kepekatan minimum cecair air di sisi katod terjadi pada RHK 40-92% dan suhu antara 343-363 K. Jika kondisi RHK lebih besar daripada 90% dan suhu lebih tinggi daripada 363 K, kenaikan kepekatan cecair air pekat terjadi dengan cepat, yang mengakibatkan imbangan air menjadi sukar untuk dikawal. Kedua, kesan mengubah nilai parameter operasi dan kesannya terhadap prestasi sel tunggal PEMFC. Hasil kajian menunjukan bahawa peningkatan suhu daripada 353 kepada 363 K mengakibatkan peningkatan sedikit prestasi sel tunggal. Prestasi sel tunggal lebih dipengaruhi oleh peningkatan nilai RHK berbanding dengan peningkatan nilai RHA. Prestasi terbaik apabila sel fuel beroperasi pada RHA 75% dan RHK 90%, suhu operasi optimum adalah 353K, dan jumlah Pt mangkin yang diperlukan di dalam himpunan membran elektrod (MEA) adalah 0.2mg cm^{-2}. Ketiga, pembentukan cecair air pada sistem PEMFC. Cecair air pada sisi anod terbentuk pada suhu 353-363 K. Pada suhu di bawah 353 K, air yang keluar daripada anod adalah dalam fasa wap. Apabila RHK dan RHA adalah 90%, terdapat peningkatan prestasi sistem, dan cecair air pada katod berlaku pada suhu daripada 303-333 K. Selain daripada itu, penggunaan pelembab membran untuk mengawal kandungan air pada PEMFC telah dikaji. Jumlah sel pelembap membran paling sedikit diperlukan di pelembap membran I (MH I) berlaku pada suhu tinggi iaitu 363 K. Keadaan suhu di bawah 363 K wap air masuk B pelembap membran II (MH II) tidak mencukupi untuk melembapkan udara. Akhir sekali, penggunaan imbangan haba dan teknologi jepitan untuk pemulihan haba sistem PEMFC. Suhu jepitan pada sistem pemulihan haba optimum yang diperoleh adalah 367 K dengan kondisi operasi adalah 70% RHA, 90% RHK dan suhu 363K. Manakala keperluan haba minimum untuk proses pemanasan utiliti panas dan keperluan haba minimum untuk proses penyejuk utiliti sejuk dikira masing-masing sebagai 0.02738 dan 0 J $cm^{-2}s$. Total pemulihan haba untuk proses pemanasan dan penyejukan pada proses reka bentuk sistem PEMFC adalah 89%.

DEVELOPMENT OF OPTIMUM PROCESS DESIGN METHODOLOGY OF PROTON EXCHANGE FUEL CELL SYSTEM TO ACHIEVE OPTIMUM PERFORMANCE

ABSTRACT

The optimum design for power supply applications of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system, as a function of design and operating parameters, is important in order to achieve the best fuel cell system performance. PEMFC system could be improved by developing cutting-edge mathematical modeling and simulation techniques to achieve the best operating conditions. One factor that affects greatly the performance of a PEMFC is the water content in the proton exchange membrane. The main focus of this study is to develop and design the PEMFC process system to obtain optimum system performance. This study is directed primarily towards the PEMFC stack and system, reactant feed, heat and mass management and operating conditions. Several alternative strategies have been developed for optimal performance of the system. The first strategy is the determination of the water balance in the system based on the water transport phenomena. This study shows that water diffusion through the membrane from the cathode side to the anode side of the PEMFC does not occur at 20% relative humidity at the cathode (RHC) and 58% relative humidity at the anode (RHA). The minimum concentration of liquid water at the cathode side is observed at 40-92% RHC and 343-363 K. If RHC is greater than 90% and the temperature is higher than 363 K, the concentration of liquid water increases rapidly, which results in a water balance that becomes difficult to control. The second strategy is to vary the operating parameters to determine their effects on the single-cell PEMFC performance. It is found that increasing the temperature from 353 to 363 K results in a modest improvement in the single-cell performance. The performance is more affected by an increase in RHC in comparison with an increase in RHA. The best performance is found when the cell is operated at 75% RHA, 90% RHC and optimum temperature 353K using a membrane electrode assembly (MEA) with 0.2mg cm^{-2} of Pt catalyst loading. The third strategy is to the determination of liquid water formation in PEMFC system. Liquid water formation on the anode side occurs at temperatures from 353-363 K. However, at temperatures below 353 K, the water from the anode output was in the vapor phase. When the RHC and RHA is 90%, there is an increase in performance, and liquid water at the cathode occurs at temperatures from 303 K-333 K. Furthermore, the use of the membrane humidifier (MH) to control the water content in the system is also determined. The least number of MH I cells required occurs at a high temperature of 363 K. At temperatures below 363 K condition, water vapor produced by B MH II is not enough for air humidification. The final strategy is to use heat balance and pinch technology for heat recovery in PEMFC system. The pinch point at optimum process is determined at 367 K with operating conditions is 70% RHA, 90% RHC and 353 K. The minimum process heating requirement from hot utilities and minimum process cooling requirement from cold utilities 0.02738 and 0 J cm^{-2}s respectively. Besides that, the total of energy recovery for heating and cooling process is 89%.

KANDUNGAN

		Halaman
PENGAKUAN		ii
PENGHARGAAN		iii
ABSTRAK		iv
ANSTRACT		v
KANDUNGAN		vi
SENARAI JADUAL		xi
SENARAI RAJAH		xiii
SENARAI SIMBOL		xviii
BAB I	**PENDAHULUAN**	
1.1	Pendahuluan	1
1.2	Latar Belakang	1
1.3	Pernyataan Masalah	3
1.4	Objektif Kajian	5
1.5	Skop Kajian	6
1.6	Kandungan Tesis	7
BAB II	**KAJIAN KEPUSTAKAAN**	
2.1	Pengenalan	11
2.2	Prestasi Sel fuel	12
	2.2.1 Jenis-Jenis Sel Fuel	12
	2.2.2 Keunggulan Teknologi Sel Fuel	13
2.3	Sistem stek PEMFC	19
	2.3.1 Lapisan Resapan Gas (GDL)	21
	2.3.2 Lapisan Pemangkin (CL)	21
	2.3.3. Himpunan Membran Elektrolit (MEA)	22
	2.3.4 Plat Dwi Kutub	23
2.4	Reka bentuk Sistem PEMFC	23
2.5	Gambaran Model Sel Fuel	25
2.6	Pengurusan Air pada Sistem PEMFC	31

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

2.7	Penggunaan Hidrogen Langsung pada PEMFC	36
2.8	Pelembapan pada Sistem PEMFC	37
	2.8.1 Kaedah Pelembapan Membran	41
	2.8.2 Jenis Jenis Pelembapan luaran	42
	2.8.3 Pelembapan Membran	46
BAB III	**METODOLOGI KESELURUHAN**	
3.1	Pengenalan	49
3.2	Rancangan kajian	50
3.3	Reka Bentuk Sistem PEMFC	51
3.4	Penetapan Andaian Sistem	54
3.5	Pemodelan Matematik	55
3.6	Algoritma Penyelesaian Model	57
3.7	Penyelesaian Model	61
BAB IV	**KESEIMBANGAN AIR PADA REKA BENTUK SISTEM PEMFC**	
4.1	Pengenalan	62
4.2	Keseimbangan Air Sistem PEMFC	63
4.3	Reka Bentuk Penyelidikan	64
4.4	Model Matematik	67
	4.4.1 Komponen yang Mengalir Masuk ke Dalam PEMFC	67
	4.4.2 Komponen Tindak Balas Pada PEMFC	70
	4.4.3 Cecair Air di Dalam Bahan Tindak Balas	72
	4.4.4 Kepekatan Komponen yang Keluar Dari PEMFC	75
	4.4.5 EOD dan Resapan Balik	77
4.5	Simulasi Imbangan Jisim Air	78
4.6	Keputusan dan Perbincangan	88
	4.6.1 Jumlah Wap Air di Dalam Gas yang Mengalir Masuk ke Dalam PEMFC	88
	4.6.2 Kepekatan Air pada EOD	90
	4.6.3 Resapan Balik	92
	4.6.4 Pembentukan Cecair Air Pada Ketumpatan Arus Tetap	96
	4.6.4 Pembentukan Cecair Air pada ketumpatan arus berbeza	103
4.7	Pengesahan Hasil Simulasi	113
	4.7.1 Kesahan terhadap penyelidikan Cai et al 2006	114
	4.7.2 Kesahan terhadap penyelidikan Yan et al 2005	114
	4.7.3 Kesahan terhadap penyelidikan Bonnet et al 2008	115

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

	4.7.4 Kesahan terhadap penyelidikan Dai W.2008	116
4.8	Kesimpulan	117
BAB V	**PRESTASI SEL TUNGGAL PEMFC MENGGUNAKAN HIDROGEN LANGSUNG**	
5.1	Pengenalan	118
5.2	Reka bentuk Penyelidikan	119
5.3	Model Matematik pada Prestasi PEMFC	119
	5.3.1 Voltan Sel Boleh Balik (V_{rev})	120
	5.3.2 Voltan Pengaktifan (V_{act})	123
	5.3.3 Voltan Ohm (V_{ohm})	130
	5.3.4 Voltan kepekatan (V_{con})	131
5.4	Simulasi Prestasi Sel Tunggal PEMFC	132
5.5	Keputusan dan Perbincangan	139
	5.5.1 Kesan Suhu Kendali Terhadap Prestasi PEMFC	139
	5.5.2 Kesan Kelembapan Relatif Bahan Tindak Balas Terhadap Prestasi PEMFC	144
	5.5.3 Kesan Tekanan Bahan Tindak Balas Terhadap Prestasi PEMFC	149
	5.5.4 Kesan Nisbah Stoikiometri Bahan Tindak Balas Terhadap Prestasi Sel Tunggal PEMFC	153
	5.5.5 Kesan Jisim Pemangkin Terhadap Prestasi PEMFC	155
	5.5.6 Pengesahan Prestasi Sel tunggal PEMFC	157
5.6	Kesimpulan	159
BAB VI	**HUBUNGAN PRESTASI SISTEM PEMFC TERHADAP PEMBENTUKAN CECAIR AIR YANG MENGALIR KELUAR DARIPADA ANOD DAN KATOD**	
6.1	Pengenalan	160
6.2	Pengurusan Air pada Sistem PEMFC	161
6.3	Rancangan Reka bentuk	163
6.4	Imbangan Jisim Menyeluruh pada Sistem PEMFC	164
6.5	Keputusan dan Perbincangan	167
	6.5.1 Kesan Perubahan Voltan Terhadap Cecair Air pada Anod Dengan Perubahan Ketumpatan Arus	167
	6.5.2 Pengaruh Prestasi PEMFC Terhadap Cecair Air di Katod	171
6.6	Pengesahan Jumlah Pemeluapan Cecair Air	176

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

6.7	Kesimpulan	179
BAB VII	**KAWALAN KANDUNGAN AIR PADA SISTEM PEMFC MENGGUNAKAN PELEMBAPAN MEMBRAN**	
7.1	Pengenalan	180
7.2	Proses Reka bentuk Pelembapan Membran	181
7.3	Pelembapan Luaran	183
7.4	Pemodelan Matematik	184
	7.4.1 Imbangan Jisim di MH I	185
	7.4.2 Imbangan Jisim di MH II	189
7.5	Simulasi Pada Pelembapan Membran	190
7.6	Keputusan dan Pembahasan	196
	7.6.1 Jumlah Wap Air Yang Mengalir Masuk ke Dalam B MH I	196
	7.6.2 Resapan Wap Air di MH I	199
	7.6.3 Jumlah Sel Pada MH1	201
	7.6.4 Wap Air Mengalir Masuk B MH II	204
	7.6.5 Resapan Wap Air di MH II	206
	7.6.6 Jumlah Sel di MH II	207
7.7	Pengesahan Hasil Simulasi	210
7.8	Kesimpulan	212
BAB VIII	**IMBANGAN DAN PEMULIHAN HABA PADA PROSES REKA BENTUK SISTEM PEMFC**	
8.1	Pedahuluan	213
8.2	Kaedah Penyelidikan	215
	8.2.1 Huraian Proses	215
	8.2.2 Reka bentuk Teknologi Jepitan	216
8.3	Imbangan Haba pada Proses Sistem PEMFC	218
	8.3.1 Jenis perubahan entalpi (haba)	218
	8.3.2 Imbangan Tenaga PEMFC	219
	8.3.3 Imbangan Haba pada PEMFC	220
	8.3.4 Haba Pada Lapisan Pemangkin (CL)	222
	8.3.5 Total Imbangan Haba pada PEMFC	225
8.4	Imbangan Haba pada Pelembapan Membran	227
8.5	Teknologi Jepitan	230
	8.5.1 Asas Teknologi Jepitan	230
	8.5.2 Prinsip Reka Bentuk Jepitan	231
8.6	Keputusan dan Perbincangan	235

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

8.6.1	Imbangan Jisim dan Haba	235
8.6.2	Pengekstrakan Data	240
8.6.3	Rangkaian Penukar Haba pada Proses Reka bentuk PEMFC	247
8.7	Kesimpulan	262
BAB IX	**RUMUSAN DAN PENUTUP**	
9.1	Rumusan dan Penemuan Kajian	263
9.2	Sumbangan Kajian	267
9.3	Cadangan Kajian Lanjut	268
9.4	Penutup	268
RUJUKAN		270
LAMPIRAN		
A	Senarai Penerbitan, Pameran, Anugerah dan Paten	285
B	Imbangan Haba Pada Sistem PEMFC	300
C	Pekali Tafel	299
D	Indeks Kos Marsal dan Swiff	300

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
2.1	Jenis dan perbezaan sel fuel	15
2.2	Parameter- parameter penting dalam reka bentuk sistem PEMFC	28
2.3	Kelebihan dan kekurangan metoda pelembapan	45
4.1	Perbandingan pekali nilai EOD (n_d) hasil penyelidikan terhadap penyelidikan dilakukan oleh (Zhou et al 2006)	91
4.2	Perbandingan nilai EOD dan resapan balik dengan Tavakoli 2011 padaRHA= RHK = 100%, 353 K	95
4.3	Parameter yang digunakan untuk pengesahan hasil simulasi	113
5.1	Nilai entalpi dan entropi pembentukan pada PEMFC	121
5.2	Parameter untuk asas kes pemodelan	139
5.3	Prestasi PEMFC pada perbezaan suhu daripada 333K kepada 363 K	144
5.4	Ketumpatan arus pada 0.6 V dengan perbezaan kelembapan relatif di katod	148
5.5	Prestasi PEMFC dengan perbezaan kelembapan relatif di anod	148
5.6	Prestasi PEMFC dengan perbezaan tekanan pada sisi katod	151
5.7	Prestasi PEMFC dengan perbezaan tekanan pada anod	152
5.8	Prestasi sel tunggal dengan perbezaan jisim Pt di stek PEMFC	157
6.1	Parameter penyelidikan oleh Cai Y dan Karmik A.Y	177
7.1	Data penyelidikan oleh Park S.K dan Sabharwa M	210
8.1	Hubungan linier (A+BT) dan purata nilai termodinamik untuk air	224
8.2	Imbangan jisim pada proses reka bentuk sistem PEMFC	238
8.3	Imbangan haba pada aliran 10 (Pemanas 1)	239
8.4	Imbangan haba pada aliran 2 (Penyejuk di MH 1)	239
8.5	Imbangan haba pada aliran 13 (Pemanas di MH 1)	239
8.6	Imbangan haba pada aliran 3 (Penyejuk di MH 2)	240
8.7	Imbangan haba pada aliran 14 (Pemanas di MH 2)	240
8.8	Imbangan haba pada aliran 15 (Pemanas 2)	240
8.9	Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan 1	242
8.10	Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 2	242

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

8.11	Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 3	242
8.12	Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 4	243
8.13	Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 5	243
8.14	Hasil analisis jepitan pada berbagai keadaan operasi	244
8.15	Data lengkung komposit besar pada berbagai kondisi operasi terhadap nilai suhu dan entalpi yang diubahsuai	245
8.16	Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 1	253
8.17	Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 1	253
8.18	Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 2	253
8.19	Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 2	254
8.20	Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 3	254
8.21	Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 3	255
8.22	Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 4	255
8.23	Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 4	255
8.24	Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 5	256
8.25	Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 5	256
8.26	Jumlah penggunaan haba pada reka bentuk PEMFC	259
8.27	Perbandingan total pemulihan haba dengan kajian lain	262

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
1.1	Carta alir skop kajian	10
2.1	Sistem PEMFC	12
2.2	Sistem stek PEMFC	20
2.3	Lengkung kekutuban yang tipikal bagi PEMFC (Jiao & Li 2011)	30
2.4	Skema perilaku air di dalam sistem PEMFC (Yuan et al. 2010)	36
2.5	Reka bentuk sistem penggunaan hidrogen langsung pada proses PEMFC (Mert et al. 2012)	37
2.6	Pengangkutan air di dalam stek (Abedini et al. 2012)	40
2.7	Prinsip perpindahan pada pelembap membran (S.K Park et al.2005)	44
2.9	Sistem pelembap membran berbentuk plat dan bingkai (a) kawalan isipadu pada unit pelembap membran (Chen & Peng 2005) (b) lapisan plat saluran pelembapan membran (Kadylak & Mérida 2010)	48
3.1	Cadangan rajah skematik proses reka bentuk sistem PEMFC	52
3.2	Carta alir kaedah reka bentuk proses sistem PEMFC	61
4.1	Gambarajah skematik PEMFC	66
4.2	Reka bentuk proses sistem PEMFC	66
4.3	Imbangan jisi pada sistem PEMFC	79
4.4	Imbangan jisim pada sisi anod	80
4.5	Imbangan jisim pada sisi katod	81
4.6	Imbangan jisim di anod dan katod	82
4.7	Imbangan pada sistem MEA	83
4.8	Imbangan pada sistem EOD	84
4.9	Imbangan pada sistem resapan balim PEMFC	85
4.10	Pembentukan cecair air pada sisi anod PEMFC	86
4.11	Pembentukan cecair air pada sisi katod PEMFC	87
4.12	Hubungan antara kelembapan relatif dan jumlah air yang mengalir masuk: (a) sebelah anod dan (b) sebelah katod	89
4.13	Hubungan antara kelembapan relatif gas bahan tindak balas mengalir masuk ke dalam anod terhadap nilai pekali EOD sistem PEMFC.	91
4.14	Hubungan antara kelembapan relatif gas bahan tindak balas	

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

	yang mengalir masuk PEMFC terhadap resapan air di dalam sistem PEMFC: (a) RHK = 20%, (b) RHK = 40%, (c) RHK = 60%, (d) RHK = 80% dan (e) RHA = RHK.	94
4.15	Hubungan antara suhu PEMFC terhadap jumlah wap air pada aliran gas keluar dari PEMFC pada kelembapan relatif 100%.	97
4.16	Hubungan antara kelembapan relatif gas yang mengalir masuk ke dalam katod dan pembentukan cecair air pada aliran keluaran katod PEMFC: (a) RHA = 20%, (b) RHA = 40%, (c) RHA = 60%, (d) RHA = 80% dan (e) RHA = RHK.	100
4.17	Hubungan antara kelembapan relatif gas mengalir masuk ke dalam sisi anod dan konsentrasi cecair air pada aliran gas yang keluar dari sisi anod PEMFC: (a) suhu = 363 K dan (b) suhu = 353 K.	103
4.18	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 353 K. (a) RHK = 10% dan (b) RHK = 30%.	105
4.19	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 K dengan: (a) RHK = 10%, (b) RHK = 50% dan (c) RHK = 70%	107
4.20	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air keluar daripada sisi katod pada suhu 363 K dan RHK adalah 90%	108
4.21	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 353 K pada nilai (a) RHK = 70% dan (b) RHK = 90%	109
4.22	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 343 K dengan nilai (a) RHK = 50% dan (b) RHK = 90%	110
4.23	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 333 K pada nilai (a) RHK = 10% dan (b) RHK = 90%	111
4.24	Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air keluar dari sisi katod pada suhu 323 K. dengan nilai (a) RHK = 10% dan (b) RHK = 90%	112
4.25	Hasil simulasi berbanding penyelidikan Cai Y et al 2006.	114
4.26	Hasil simulasi berbanding penyelidikan Yan Q et al 2005	115
4.27	Hasil simulasi berbanding penyelidikan Bonnet et al 2008	116
4.28	Hasil simulasi berbanding penyelidikan Dai W et al 2008	116
5.1	Prestasi sel tunggal sistem PEMFC	133
5.2	Penentuan nilai OCV pada PEMFC	134
5.3	Perubahan ketumpatan arus pada sel tunggal PEMFC	135
5.4	Nilai keupayaan aktifasi pada PEMFC	136

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

5.5	Nilai keupayaan ohm pada PEMFC	137
5.6	Nilai keupayaan kepekatan pada PEMF**C**	138
5.7	Kesan suhu operasi terhadap prestasi sel tunggal PEMFC pada nisbah stoikiometri H_2 adalah 1.2 dan O_2 adalah 2. Kondisi operasi lain ialah (a) RHA and RHK adalah 90%, PA dan PK adalah 1 atm (b) RHA dan RHK adalah 50% dan 90%, PA dan PC adalah 1 atm (c) RHA dan RHK adalah 90% dan 50%, PA dan PK adalah 1 atm (d) RHA dan RHK adalah 50% dan 90%, PA dan PK	142
5.8	Kesan kelembapan relative terhadap prestasi sel tunggal PEM sel fuel pada suhu 353K, tekanan operasi 1 atm ,rasio stoikiometri H_2 adalah 1.2 dan O_2 adalah 2 . (a) RHA adalah 50% dan RHK adalah 50%, 60%, 70%, 80% dan 90%. (b) RHA adalah 75% dan RHA adalah 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% .(c) RHA adalah 50%, 70% dan 90% dan RHK adalah 50%. (d) RHA adalah 50%, 70% dan 90% dan RHK adalah 70%. (e) RHA adalah 50%, 70% dan 90% dan RHK adalah 90%.	146
5.9	Kesan tekanan terhadap prestasi sel tunggal terhadap prestasi PEMFC pada suhu 353K, RHA adalah 75% dan RHK 90%, nisbah stoikiometri adalah 1.2 untuk H_2 dan 2 untuk O_2 . (a) PA adalah 1 atm dan PK adalah 1, 1.5, 2, 2.5 atm. (b) PA adalah 2.5 atm dan PK adalah 1, 1.5, 2, 2.5 atm . (c) PA adalah1, 1.5, 2, 2.5 atm dan PK adalah 1 atm. (d) PA adalah 1, 1.5, 2, 2.5 atm dan PK adalah 2.5 atm.	151
5.10	Kesan nisbah stoikiometri bahan tindak balas terhadap prestasi sel tunggal pada suhu 353K, RHA adalah 75% dan RHK 90% , PA dan PK adalah 1 atm. (a) nisbah stoikiometri H_2 adalah 1.2 dan O_2 adalah 1,1.5, 2, 2.5 dan 3. (b) nisbah stoikiometri H^2 adalah 1.5 dan O_2 adalah 1,1.5, 2, 2.5 dan 3. (c) nisbah stoikiometri H_2 adalah 1.8 dan O_2 adalah 1,1.5, 2, 2.5 dan 3. (d) nisbah stoikiometri H_2 adalah 1.2 1.5 dan 1.8, O_2 adalah 1,1.5, 2, 2.5 dan 3	155
5.11	Kesan variasi jisim pemangkin per cm^2 luas area terhadap prestasi sel tunggal PEMFC.	156
5.12	Perbandingan prestasi sel tunggal PEMFC (a) penyelidikan yang dilakukan oleh S.Haji 2011. (b) penyelidikan yang dilakukan oleh Kunusch 2010	160
6.1	Proses sistem PEMFC menggunakan hdrogen langsung	164
6.2	Hubungan prestasi PEMFC terhadap cecair air mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 dengan (a) RHK 10% (b) RHK 50% dan (c) RHK 70% dan (d) RHA 90%	159
6.3	Hubungan prestasi PEMFC terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod PEMFC pada suhu 353 dengan (a) RHK = 10% (b) RHK = 30%	170

6.4	Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 10% pada nilai (a) RHA 10% (b) RHA 50% dan (c) RHA = 90%	173
6.5	Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 50% dengan (a) RHA = 10% dan (b) RHA = 90%.	174
6.6	Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 90% dengan (a) RHA = 10% dan (b) RHA = 90%.	176
6.7	Perbandingan cecair air hasil penelitian dengan (a) penyelidikan Can Y et al 2006 dan (b) penyelidikan Karmik A.Y et al 2006	178
7.1	Unit pelembapan membran proses reka bentuk sistem PEMFC	181
7.2	Sel pelembapan membran	183
7.3	Imbangan jisim pada pelembapan membrane	191
7.4	Sistem kitar semula pada pelembapan membrane	192
7.5	Blok aliran pekali resapan membrane	192
7.6	Sistem penentuan resapan balik dan jumlah sel pada pelembapan membran	193
7.7	Penentuan nilai aktiviti air pada pelembapan membrane	193
7.8	Pembetulan Pekali Resapan pada Pelembapan Membran I	194
7.9	Pembetulan Pekali Resapan pada Pelembapan Membran II	195
7.10	Jumlah wap air mengalir masuk ke dalam MH I pada kondisi operasi (a) perbezaan suhu (b) perbezaan kelembapan relatif	198
7.11	Resapan wap air di MH I pada pelbagai kondisi operasi (a) perbezaan suhu dan (b) perbezaan kelembapan relative	200
7.12	Jumlah sel yang diperlukan di MH I pada perbezaan kondisi operasi (a) RHA dan RHK = 90% (b) RHA dan RHK=70% (c) RHA dan RHK = 50% (d) RHA = 50% dan RHK = 90% (e) RHA = 70% dan RHK = 90%	203
7.13	Jumlah wap air mengalir masuk sisi B MH II dengan kondisi kondisi operasi berbeza (a) perbezaan suhu dan (b) perbezaan kelembapan relatif	205
7.14	Resapan wap air di MH I pada pelbagai kondisi operasi (a) perbezaan suhu dan (b) perbezaan kelembapan relatif	206
7.15	Jumlah sel yang diperlukan di MH I pada perbezaan kondisi operasi (a) RHA dan RHK = 90% (b) RHA dan RHK=70%	208
7.16	Kesan perubahan suhu terhadap jumlah wap air yang mengalir keluar dari sisi B MH II dengan nilai RHK tetap 90% dan nilai RHA berbeza (90%. 70% dan 50%)	209

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.17	Jumlah sel di MH II pada suhu 363 K dan RHK tetap 90%.	209
7.18	Perbandingan uji kaji terhadap (a) penyelidikan Park S K et al 2008 dan (b) penyelidikan Sabharwal M 20012	211
8.1	Imbangan haba pada proses reka bentuk sistem PEMFC	217
8.2	Proses sistem PEMFC	218
8.3	Model imbangan haba sistem PEMFC	220
8.4	Imbangan haba pada pelembap membran	228
8.5	Diagram rajah (a) Lengkung komposit dan (b) Lengkung komposit besar (Rašković & Stoiljković 2009)	232
8.6	Gambar rajah menunjukkan prinsip jepitan (Kemp 2007)	234
8.7	Kecekapan haba sistem PEMFC pada berbagai kondisi kelembapan relatif (a) nilai RHK tetap 90% dan (b) nilai RHA tetap 90%.	237
8.8	Lengkung Komposit Besar	246
8.9	Rangkaian penukar haba pada reka bentuk proses sistem PEMFC (a) Keadaan 1 (b) Keadaan 2 (c) Keadaan 3 (d) Keadaan 4 dan(e)Keadaan 5	252
8.10	Sistem reka bentuk proses PEMFC selepas penyepaduan haba	258
8.11	Anggaran kos penukar haba	260
8.12	Anggaran kos penukar haba pada MH	260
8.13	Anggaran kos penukar haba pada tenaga pemanas	261
8.14	Anggaran kos penyejuk	261

UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

SENARAI SIMBOL

a	Luas permukaan tindak balas ideal per unit isipadu lapisan mangkin $\left(\frac{cm^2}{cm^{-3}}\right)$
A	Luas area pelembapan membran (cm^2)
a_0	Total luas permukaan pemangkin per unit jisim pemangkin $\left(\frac{cm}{gr}\right)$
a_{H2O}	Aktiviti air membran
b	Pemalar Tafel
C	Kepekatan pada permukaan tindak balas (mol)
C_R	Kepekatan bahan tindak balas (mol)
C_{av1}	Kepekatan wap air yang dikawal pada sisi A MH I (mol/cm^3)
$C_{a,v2}$	Kepekatan wap air yang dikawal pada sisi A MH II (mol/cm^3)
C_{bv1}	Kepekatan wap air yang dikawal pada sisi B MH I (mol/cm^3)
$C_{b,v2}$	Kepekatan wap air yang dikawal pada sisi B MH II (mol/cm^3)
$C_{p,}$	Muatan haba ($Jg^{-1}K^{-1}$)
D_{ij}	Pekali resapan binari untuk O_2 dan N_2 (cm/s)
D_h	Diameter aliran hidrolik (cm)
D_w	Pekali resapan air membran ($cm^2\ s^{-1}$)
E	Keupayaan elektrik (V)
E^0	Keupayaan elektrik pada kondisi piawai (V)
E_T	Keupayaan elektrik PEM sel fuel (V)
F	Pemalar Faraday, 96,485 C/mol elektron
F	Kadar alir (mol/s)
G	Tenaga bebas Gibbs (J/mol)
$\bar{h}$	Pekali perpindahan haba perolakan
H	Entalpi (J)
H_f	Haba pendam tentu untuk lakuran (j)
H_c	Diameter hidraulik (cm)
H_V	Haba pendam spesifik untuk pengewapan (j)
h_m	Pekali pemindahan jisim olakan
i	Ketumpatan arus ($A\ cm^{-2}$)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

i_L	Had ketumpatan arus (A cm^{-2})
$i_{0,ref}$	Ketumpatan arus rujukan (A cm^{-2})
J_w	Fluks kelembapan merentasi membran
$k_{f,d}$	Pemalar kadar tindakbalas ke hadapan dan mundur
K	Pekali kelembapan
$k_{A.}$	Pekali pemeluwapan
k_C	Pekali perpindahan jisim penyejatan.
k_g	Pekali perpindahan jisim
L	Tebal lapisan pemangkin(cm)
m	Jisim bahan tindak balas (gr)
$\dot{m}$	Kadar alir jisim (g s^{-1})
M_a	Molekul relatif gas kering
MH I	Pelembapan luaran I
MH II	Pelembapan luaran II
M_r	Molekul relatif
m_{pt}	Beban pemangkin $\left(\frac{gr}{cm^2}\right)$
M_v	Molekul relatif wap air
n	Elektron per molekul hidrogen
η_{act}	Ppaya lebih pengaktifan pada sisi anod dan katod (V)
N_{avg}	Avogadro, 6.022 x 10^{23} molekul per mol
n_{cell}	Jumlah sel
$\mathcal{N}$	Kepekatan (mol)
n_d	Pekali EOD
η_{ohm}	Upaya lebih ohm pada elektrod (V)
$\mathcal{N}_{resap}$	Kepekatan wap air yang meresap daripada sisi B ke sisi A MH1 (mol).
N_u	Angka Nusselt
P	Tekanan total (atm)
P_i	Tekanan separa (atm)
P_a	Tekanan separa gas (atm)
P_v	Tekanan separa wap (atm)
Q	*Charge* (Coulombs / mol)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Q_{el}	Caj untuk satu molekul, 1.602 x 10^{-19} Coulombs per elektron
Q_{pendam}	Jumlah haba yang diperlukan untuk perubahan fasa (J/cm^{-2})
$Q_{terjana}$	haba terjana dari stek sel fuel (J/cm^{-2})
R	Pemalas gas semesta(8.314 j/mol K)
r	Kadar tindak balas (mol/cm^2 s)
RHA	Kelembapan relative pada anod
RHK	Kelembapan relatif pada katod
R_{ohm}	Rintangan dalam sel (V)
S	Entropi
Sh_f	Nomaor Sherwood
T	Suhu (K)
T_{act}	Suhu sebenarnya (K)
T_{int}	Suhu perantara (K)
$T_{int,p}$	Suhu aliran panas (K)
$T_{int,s}$	Suhu aliran sejuk (K)
T_0	Suhu rujukan (298.15 K)
T_{lmtd}	Perbezaan suhu min log diantara suhu sisi A dan sisi B
t_m	Tebal membran kering (0.0127 cm untuk nafion 115).
T_{min}	Suhu minimum (K)
T_{ref}	Suhu rujukan (298.15 K)
U	Pekali perpindahan panas keseluruhan pada(W/m^2·K)
V	Voltan (V)
V_0	Keupayaan boleh balik (V)
W_{el}	Kerja elektrik maksimum (J/mol)
XO_2	Pecahan mol O_2
y	Nisbah molar gas
Y	Peratus pemangkin (%)
y_a	Jumlah mol kandungan lembapan pada anod
y_c	Jumlah mol kandungan lembapan pada katod

Simbol *Greek*

$\propto$	Pekali pertukaran
σ_m	Kekonduksian membran.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Δ	Delta
φ	Nilai kelembapan relatif pelembapan membran.
λ_m	Kandungan air membran
ŋ	Keupayaan lebih
$\mathcal{S}$	Stoikiometri

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB I

PENGENALAN

1.1 PENDAHULUAN

Topik tenaga alternatif merupakan berita yang banyak dibincangkan ketika ini. Hal ini dikeranakan oleh beberapa faktor seperti berkurangnya cadangan sumber tenaga (gas asli, petroleum, arang batu, dan lainnya), naiknya harga keperluan tenaga, terjadi pencemaran persekitaran oleh penggunaan bahan api fosil. Salah satu tenaga alternatif yang dikembangkan saat ini ialah teknologi sel fuel. Sel fuel adalah piranti elektrokimia yang mengubah tenaga kimia dari suatu tindak balas kimia secara langsung menjadi tenaga elektrik dengan haba dan air sebagai hasil samping. Bahan tindak balas yang digunakan antara lain hidrogen, metanol, metana dan lainnya, serta oksidan yang digunakan ialah oksigen atau udara. (Boudghene Stambouli & Traversa 2002; Sopian & Wan Daud 2006; Yu et al. 2009).Sel fuel mempunyai beberapa kelebihan diantaranya: ketumpatan kuasa yang tinggi, kecekapan tinggi, reka bentuk sederhana, aman dalam pengoperasian dan mesra alam (Lee & Lalk 1998; Kumar & Reddy 2003; Sopian & Wan Daud 2006; Bayrakçeken et al. 2008). Applikasi penggunaan teknologi sel fuel sangat banyak seperti pada alat pengangkutan (kereta, motor, kereta api), penjana kuasa, bateri mudah alih (komputer riba, telefon bimbit)

1.2 LATAR BELAKANG

Di antara beberapa jenis sel fuel, sel fuel membran penukaran proton (PEMFC) lebih sesuai untuk penggunaan pada bidang pengangkutan dan penjana kuasa kerana: ketumpatan tenaga yang tinggi, suhu operasi yang rendah (60-90^{0}C), proses *start-up* dan s*hutdown* yang cepat, dan disokong oleh kitaran haba tanpa batas (Hentall et al.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

1999; Hu et al. 2006; Santarelli & Torchio 2007). Prestasi PEMFC boleh dilihat dalam bentuk voltan , ketumpatan tenaga dan kecekapan. Nilai prestasi PEMFC dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti komponen bahan penyusun, struktur, kaedah pembuatan, keadaan operasi, sistem reka bentuk dan lainya. Selain hal yang di atas, tantangan dalam proses pengkomersialan meliputi biaya, ketahan dan jangka hayat daripada sistem PEMFC.

Sistem pada kes PEMFC didefinisikan sebagai kelompok, objek atau materi yang secara keseluruhan digabung dan dioperasikan secara bersama sama. Sistem meliputi seluruh komponen yang diperlukan untuk mengoperasikan stek sel fuel hingga menghasilkan arus elektrik. Pada proses PEMFC, stek merupakan jantungnya sistem dan kerana itu harus ada penyokongnya yang meliputi: keperluan oksidan (oksigen atau udara), keperluan bahan api (hidrogen), pengelolaan haba, pengelolaan air, proses kawalan suhu, peralatan dan pengawasan.

Dalam pengoperasian sel fuel, bahan tindak balas yang digunakan ialah hidrogen tulen, di mana bahan api golongan ini boleh langsung melakukan tindak balas dengan oksidan atau menggunakan bahan api daripada golongan alkohol (metanol, etanol dan lainnya), di mana penggunaan bahan api dari golongan ini memerlukan proses tambahan untuk menghuraikan bahan api tersebut menjadi hidrogen dan alat pemisahan untuk mendapatkan kadar minimal hidrogen yang boleh digunakan melakukan tindak balas dengan oksidan.

Pemodelan sangat penting untuk melakukan pengembangan proses sistem sel fuel. Pemodelan boleh membantu dalam melakukan reka bentuk awal dan melakukan pengujian prestasi sistem secara cepat. Selain daripada itu, Pemodelan juga membantu para pereka bentuk menemukan dan memperbaiki reka bentuk yang sudah ada supaya mempunyai prestasi yang lebih baik. He et al. (2007) mengembangkan model dua-fasa dan dua dimensi untuk pengangkutan air di lapisan resapan gas (GDL) daripada PEMFC.You & Liu (2002) danYu et al. (2009) memperkenalkan model dua-dimensi yang berhubungan dengan pengangkutan air di dalam elektrod berliang dengan menggunakan model campuran dengan perlakuan dua fasa di dalam PEMFC, yang boleh menggambarkan perlakuan cecair air di dalam GDL dan gas saluran dengan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

menggunakan perhitungan sederhana dan biaya rendah. Wang et al. (2001) juga memperkenalkan model campuran untuk menggambarkan perilaku dua-fasa di dalam PEMFC. Hasil penyelidikan menunjukan bahawa cecair air di dalam katod mencapai 6.3% pada 1.4Acm^{-2} dengan menggunakan udara kering yang mengalir masuk ke dalam sisi katod.

Nguyen et al. (2004) melakukan penyelidikan tentang model dinamik pengiraan bendalir PEMFC dengan medan aliran saluran berkelok-kelok. Model tersebut menjelaskan tentang rincian jenis pengangkutan jisim, perpindahan haba dan kinetik elektrokimia. Haraldsson & Wipke (2004) menggunakan model dalam melakukan reka bentuk sel fuel supaya boleh langsung mengira prestasi dan kecekapan yang dihasilkan di pelbagai-bagai keadaan operasi. Siegel (2008) mengelompokkan dasar pemodelan PEMFC. Dalam sistem sel fuel banyak parameter yang saling berhubungan antara satu dengan lainnya. Prestasi PEMFC ditakrifkan dalam bentuk voltan, ketumpatan tenaga dan kecekapan. Sedangkan prestasi optimum daripada PEMFC dipengaruhi oleh faktor luar dan dalam seperti: reka bentuk dan perhimpunan, degradasi bahan, syarat operasi, kekotoran dan bahan cemar (Wu et al. 2008)

1.3 PERNYATAAN MASALAH

Daripada beberapa kajian pustaka yang telah dilakukan, maka penulis mendapatkan beberapa masalah yang dihadapi dalam PEMFC untuk mendapatkan prestasi sistem yang optimum. Masalah tersebut meliputi sistem stek PEMFC, suapan bahan tindak balas, pengurusan haba dan jisim, keadaan operasi pemprosesan sistem PEMFC.

Secara amnya permasalahan tersebut boleh dikelompokkan menjadi:

a. Masalah keseimbangan air di dalam stek PEMFC.

   Pada stek PEMFC masalah yang masih berlaku iaitu pengelolaan keseimbangan air. Keseimbangan air ini sangat mempengaruhi prestasi sel fuel yang dihasilkan. Jika kandungan air di dalam stek sel fuel terlalu rendah maka boleh menyebabkan berlakunya kekeringan pada membran dan akan menyebabkan membran menjadi retak. Sebaliknya, jika kandungan air terlalu tinggi akan menyebabkan

berlakunya pemeluwapan air di dalam sel sehingga menimbulkan kebanjiran (Guvelioglu & Stenger 2007; Falcão et al. 2009). Keberadaan air di dalam PEMFC memberikan kesan baik dan juga buruk, pada satu sisi air berguna untuk meningkatkan sifat konduktiviti ion pada membran, akan tetapi air juga boleh menghalangi aliran gas bahan tindak balas menuju permukaan pemangkin untuk melakukan tindak balas (Stumper et al. 2005; Liu et al. 2006; Liu et al. 2006)

b. Menentukan keadaan yang tepat untuk mencapai prestasi yang optimum pada sistem PEMFC yang disebabkan oleh pengaruh keadaan pengoperasian seperti suhu, tekanan, nisbah bahan tindak balas yang disuapkan ke dalam sel fuel dan kelembapan relatif.

c. Mengetahui keadaan pembentukan pemeluapan air yang terjadi di dalam PEMFC. Hal ini penting diketahui kerana cecair air di dalam akan menghalangi laluan bahan tindak balas menuju permukaan elektrolit untuk melakukan tindak balas

d. Meminimumkan penggunaan jisim bahan tindak balas di dalam sistem dengan cara memanfaatkan kembali bahan hasil tindak balas iaitu hidrogen yang tidak bertindak balas daripada anod dan air keluaran katod untuk memperoleh kelembapan relatif suapan bahan api yang sesuai.

e. Masalah pengurusan haba

Pengurusan haba selama operasi sistem PEMFC (mulai dari pengurusan aliran bahan tindak balas sampai didapatkannya prestasi stek PEMFC iaitu berupa voltan dan ketumpatan kuasa). Pengurusan haba meliputi penyepaduan seluruh unit sistem PEMFC. Pada pengurusan haba sistem boleh mendapatkan penggunaan tenaga yang minimum dengan kecekapan yang maksimum.

Semua masalah tersebut boleh mempengaruhi pencapaian prestasi sistem PEMFC terutama mengakibatkan terjadinya penurunan ketumpatan arus dan voltan. Yan et al. (2006); Shimpalee et al. (2007) dan Liu & Eikerling (2008) menyatakan bahawa jika tidak terdapatnya penyepaduan haba dan pengurusan jisim semasa operasi sistem

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

proses PEMFC akan menyebabkan kegagalan pada sistem. Beberapa kajian yang telah dilakukan untuk meningkatkan prestasi sel fuel seperti: He et al. (2007) mengembangkan model pengangkutan air di lapisan resapan gas.You & Liu (2002) dan Yu et al. (2009) mengembankan model pengankutan air di elektrod berliang. Haraldsson & Wipke (2004) mengembangkan model reka bentuk yang boleh mengira prestasi PEMFC pada pelbagai-bagai keadaan operasi.

Berbanding penyelidikan lainnya, penyelidikan ini mempunyai kelebihan dalam mengatasi permasalahan yang terdapat pada sistem PEMFC. Penyelidikan lainnya kebanyakan melakukan kajian berdasarkan unit atau bahagian tertentu sahaja. Penyelidikan ini melakukan simulasi terhadap kajian proses sistem PEMFC secara terintegrasi dengan menggunakan pemodelan matematik sehingga boleh diperkirakan prestasi reka bentuk sistem PEMFC yang optimum dengan merubah keadaan operasi , meminimumkan penggunaan bahan tindak balas dan haba, menentukan faktor yang berpengaruh dalam melakukan reka bentuk sistem serta memperoleh reka bentuk baru sistem PEMFC yang optimum

1.4 OBJEKTIF KAJIAN

Objektif utama kajian ini adalah untuk membangun dan menyelesaikan sistem pemodelan yang terdapat pada reka bentuk proses sistem PEMFC.

Oleh yang demikian objektif kajian ini meliputi:

1. Membangun model matematik proses sistem PEMFC yang berhubungan dengan keseimbangan air, prestasi sel tunggal PEMFC, pembentukan cecair air dan penjimatan penggunaan haba
2. Mengkaji reka bentuk sistem PEMFC dan serta membuat pencirian terhadap masing-masing unit sistem dengan melihat pengaruh beberapa parameter dengan menggunakan hidrogen tulen sebagai suapan bahan tindak balas.
3. Mengkaji imbangan jisim air terhadap fenomena yang berlaku pada proses sistem PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

4. Mengkaji faktor yang mempengaruhi prestasi sel tunggal PEMFC, serta pengaruh prestasi sel terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar daripada PEMFC.
5. Mengkaji imbangan haba dan melakukan penjimatan penggunaan tenaga dengan menggunakan teknologi jepitan.

1.5 SKOP KAJIAN

Kajian ini mengembangkan proses reka bentuk sistem PEMFC, dengan hidrogen tulen dan udara sebagai bahan tindak balas. Mekanisme yang digunakan untuk mengembangkan sistem ini terdiri daripada tiga bahagian utama iaitu membuat proses sistem PEMFC yang dihadirkan dalam bentuk carta aliran, membangun model matematik yang berlaku pada proses reka bentuk sistm PEMFC, penyelesaian model matematik dengan menggunakan perisian Simulink Matlab dan membuat pencirian terhadap masing-masing unit sistem. Beberapa langkah yang telah disusun bagi mencapai matlamat penyelidikan adalah:

1. Pembangunan model matematik yang meliputi imbangan jisim dan haba, fenomena yang berlaku pada proses sistem PEMFC, prestasi sistem sel tunggal PEMFC, pemodelan pada unit pendukung sistem seperti pelembap membran dan pemulihan haba proses PEMFC.

2. Model matematik pada imbangan jisim dan fenomena yang berlaku pada proses sistem PEMFC digunakan untuk menentukan keseimbangan air. Kesetimbangan air yang dikaji ialah aliran bahan tindak balas yang mengalir masuk sel, fenomena *electro osmotic drag* (EOD), resapan balik wap air dan pembentukan cecair air pada sisi anod dan sisi katod.

3. Model matematik yang berhubungan dengan prestasi sistem PEMFC digunakan untuk mendapatkan keadaan operasi yang tepat untuk mencapai prestasi yang optimum. Keadaan operasi yang dikaji meliputi: kelembapan relatif, suhu, tekanan, nisbah stoikiometri bahan tindak balas, dan beban jisim pemangkin.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

4. Model matematik yang berhubungan jisim bahan tindak balas dan prestasi PEMFC digunakan untuk menentukan kesan parameter sistem dan keadaan operasi terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan sisi katod

5. Membuat pencirian terhadap unit pelembapan luaran jenis membran yang digunakan pada sistem PEMFC. Kajian yang dilakukan meliputi kesan terhadap keadaan operasi pada sistem PEMFC terhadap wap air yang mengalir masuk, meresap dan keluar daripada pelembap membran. Reka bentuk terhadap jumlah sel yang diperlukan untuk melembapkan bahan tindak balas di pelembap membran, serta luas area pelembap membran berbanding PEMFC. Selanjutnya mendapatkan keadaan operasi wap air yang mengalir keluar pelembapan membran II cukup dikitar semula untuk melembapkan hidrogen di pelembap membran I.

6. Penjimatan terhadap haba yang digunakan pada sistem PEMFC dengan menggunakan imbangan haba dan pemodelan penyepaduan haba dengan teknik jepitan.Kajian ini mendapatkan proses reka bentuk sistem PEMFC yang optimum.

7. Hasil kajian yang didapat berdasarkan pembangunan model matematik ini merupakan rangkaian proses PEMFC yang diwujudkan dalam bentuk Simulink Matlab serta hasilnya dibandingkan dengan data-data hasil penyelidikan lainnya.

1.6 KANDUNGAN TESIS

Berikut adalah berupa garis kasar tesis yang menerangkan dengan ringkas perkara yang akan dibincangkan dalam setiap Bab. Kaitan diantara Bab tersebut boleh ditunjukkan Rajah 1.1. Tesis ini yang mengandungi sembilan Bab. Khas untuk Bab IV sampai Bab VII mengungkapkan tentang hasil dan perbincangan. Kesembilan bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan, bab ini akan mengupas secara ringkas tajuk tesis yang dikemukakan, latar belakang perlunya kajian ini, permasalahan yang terdapat pada sistem PEMFC, objektif utama kajian yang dilakukan, skop kajian serta menyatakan kandungan penulisan tesis.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Bab II Ulasan kepustakaan, bab ini memaparkan jenis-jenis sel fuel, kelebihan dan kekurangan PEMFC, serta permasalahan yang terdapat pada sistem, pemahaman secara terperinci mengenai sistem PEMFC. Pada bahagian ini juga memaparkan tentang pemodelan dan sistem pengurusan air yang terdapat pada PEMFC yang berkenaan dengan kajian yang dilakukan.

Bab III Kaedah kajian, bab ini memaparkan kaedah pembuatan yang digunakan untuk mencapai objktif yang telah digariskan. Hal ini bermula daripada pembuatan reka bentuk proses sistem PEMFC menggunakan hidrogen tulen, gambaran tentang pemodelan matematik, serta membuat pencirian terhadap masing-masing unit proses sistem PEMFC. Di samping a itu, memberikan secara ringkas tentang konsep reka bentuk sistem PEMFC.

Bab IV Keseimbangan air pada reka bentuk proses sistem PEMFC. Bab ini merupakan bab tentang hasil dan perbincangan. Bab ini memaparkan tentang pengenalan tentang keseimbangan air yang terdapat pada sistem PEMFC, memaparkan secara terperinci tentang kaedah penyelidikan yang digunakan untuk kajian pada bab ini, pembuatan model matematik tentang imbangan jisim yang terdapat pada sistem, serta menunjukan dan membincangkan hasil yang diperoleh. Pada bab ini yang menjadi fokus utama kajian ialah aliran bahan tindak balas, fenomena EOD, resapan balik wap air dan pembentukan cecair air pada sisi anod dan sisi katod.

Bab V Prestasi sel tunggal PEMFC menggunakan hidrogen langsung. Bab ini juga merupakan bab yang membahas tentang hasil dan perbincangan. Bab ini memaparkan mengenai pengenalan tentang prestasi dan permasalahannya, membuat serta mengembangan model matematik yang berhubungan dengan prestasi sel tunggal PEMFC sebagai hubungan nilai ketumpatan arus terhadap voltan dan ketumpatan kuasa. Selanjutnya juga membincangkan tentang hasil yang diperoleh pada kajian ini. Fokus utama hasil kajian ialah mengetahui pengaruh parameter seperti kelembapan relatif, suhu, tekanan, nisbah stoikiometri bahan tindak balas dan beban pemangkin yang digunakan.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

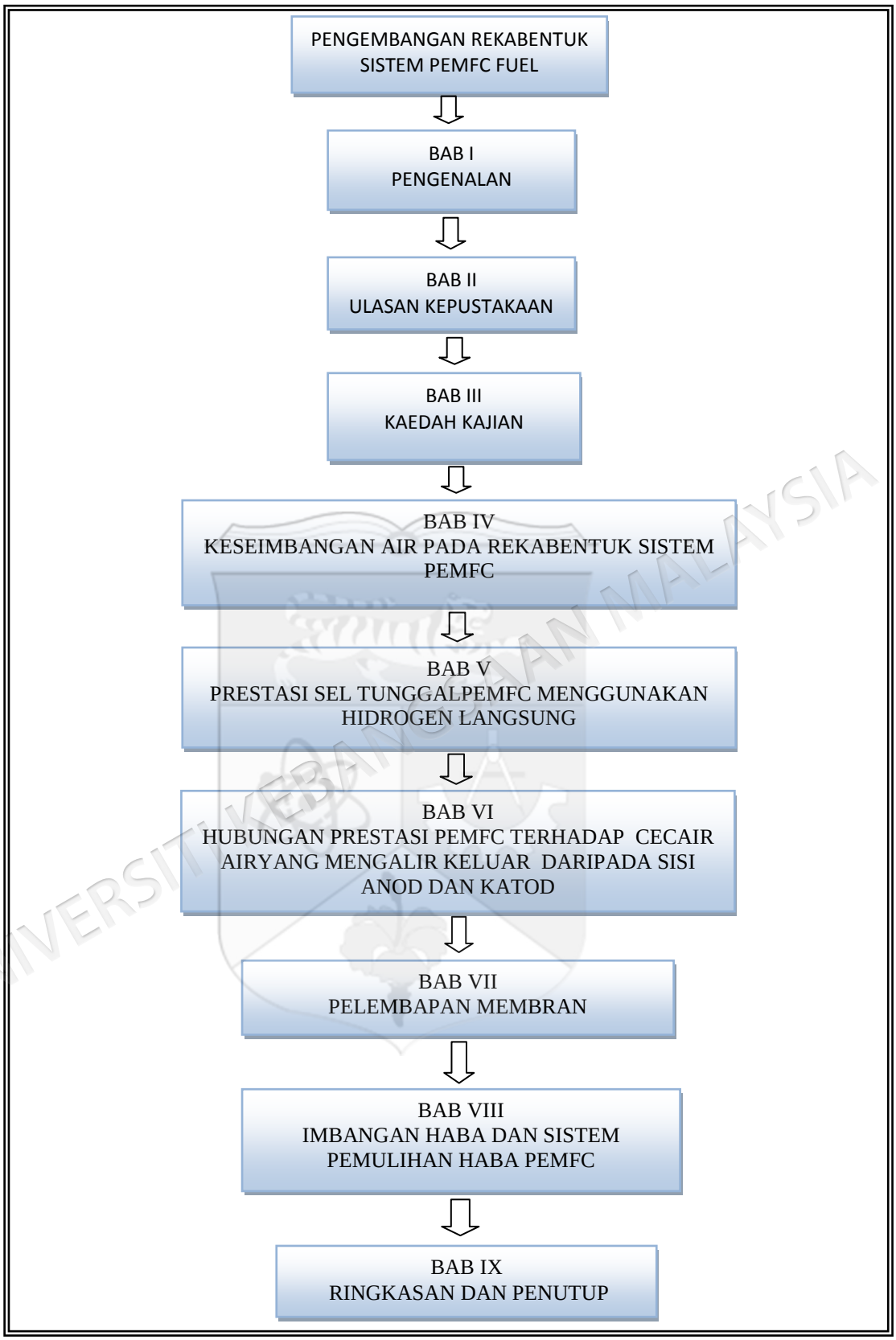
Bab VI Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan katod. Bab ini juga bahagian dari hasil dan perbincangan. yang memaparkan tentang pengurusan air di dalam sistem PEMFC dan pentingnya kajian ini dilakukan. Pada bab ini juga membuat dan memaparkan kaedah penyelidikan secara terperinci serta membangun pemodelan matematik yang sesuai dengan objektif yang diinginkan tentang pelembap membran. Pembincangan yang dilakukan adalah mengenai hubungan prestasi PEMFC terhadap terbentuknya cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan katod PEMFC.

Bab VII Pelembapan membran. Bab ini juga merupakan bahagian hasil dan perbincangan. Bab ini memaparkan tentang pelembapan membran serta tujuan kajian, memaparkan secara terperinci tentang kaedah yang digunakan, serta membuat dan mengembangkan model matematik yang berhubungan dengan pelembapan membran. Selanjutnya tentang pembincangan hasil penyelidikan membahas tentang hubungan pengaruh beberapa parameter terhadap kepekatan komponen yang masuk, keluar dan meresap pada pelembap membran. Samping daripada itu, melakukan kajian terhadap jumlah sel pelembapan membran yang diperlukan untuk mencapai kelembapan relatif bahan tindak balas yang diinginkan.

Bab VIII Imbangan haba dan sistem pemulihan haba sistem PEMFC. Pada bab ini dilakukan penyimatan tenaga yang digunakan pada sistem PEMFC. Kajian tentang penjimatan tenaga dilakukan dengan membangun pemodelan matematik yang berhubungan dengan haba pada sistem. Imbangan haba merupakan asas untuk perhitungan pada teknologi jepitan yang digunakan pada sistem ini.

Bab 1X Ringkasan dan Penutup. Bab ini berisi ringkasan penyelidikan yang diperoleh dari keseluruhan kajian.Bahagian ini juga membincangkan mengenai kajian lanjutan dan cadangan untuk meningkatkan pencapaian prestasi maksimum pada proses sistem PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 1.1 Carta alir skop kajian

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB II

KAJIAN KEPUSTAKAAN

2.1 PENGENALAN

Pada teknologi sel fuel berlaku tindak balas kimia antara bahan api (hidrogen) dengan oksidan (oksigen atau udara) tanpa proses pembakaran. Rajah 2.1 menunjukkan sel fuel mempunyai dua sisi iaitu sisi anod dan sisi katod. Kedua sisi tersebut dipisahkan oleh lapisan elektrolit.

Prinsip kerja dari sel fuel menurut Siegel (2008) iaitu gas hidrogen mengalir masuk ke dalam sisi anod, sedangkan oksigen atau udara mengalir masuk ke dalam sisi katod. Hidrogen terurai menjadi proton dan elektron di bahagian anod. Proton berpindah melewati lapisan elektrolit dari sisi anod ke sisi katod. Sedangkan elektron mengalir menuju sisi katod melalui litar bahagian luar. Pada sisi katod, gas oksigen tidak boleh berpindah melewati lapisan elektrolit menuju ke sisi anod gas dan pada sisi berlaku tindak balas yang menghasilkan air.

Tindak balas antara gas hidrogen dengan oksigen yang terjadi di dalam stek sel fuel adalah:

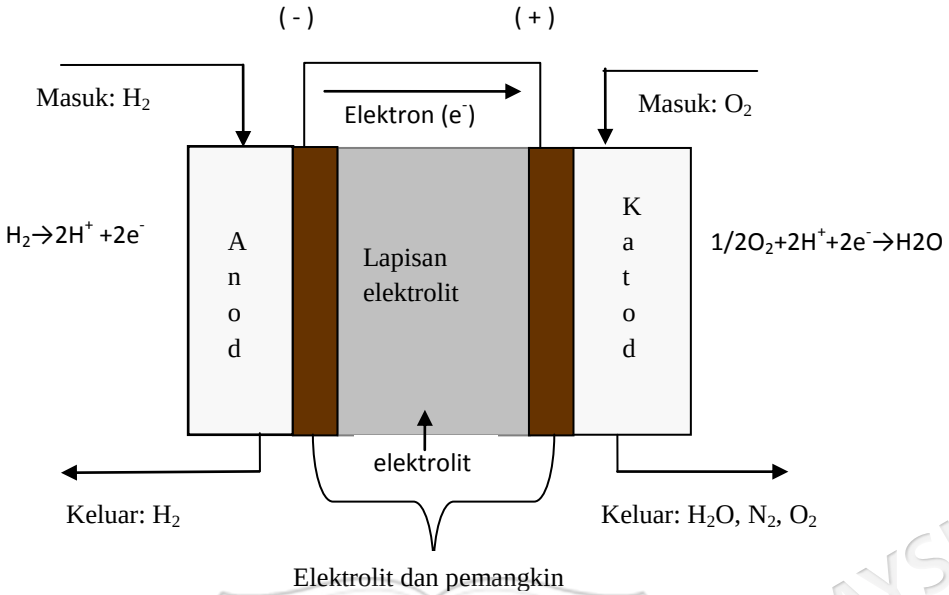
Sisi anod: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Sisi katod: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Keseluruhan: $H_{2(gas)} + 1/2\ O_{2(gas)} \rightarrow H_2O$ + haba + arus elektrik

Sel yang terdapat pada sel fuel boleh digabung dan disusun menjadi bentuk stek. Jumlah sel yang diperlukan untuk membentuk stek bergantung kepada jumlah total voltan dan arus elektrik yang dihasilkan tiap-tiap luas PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 2.1. Sistem PEMFC

2.2 PRESTASI SEL FUEL

Peningkatan dan perbaikan prestasi sel fuel boleh dilakukan dengan mengetahui pengaruh parameter sistem berdasarkan termodinamik terhadap nilai voltan yang dihasilkan. Nilai parameter yang mempengaruhi prestasi sistem sel fuel bergantung kepada proses suapan bahan tindak balas, pengelolaan air dan haba, kawalan sistem, dan arus elektrik yang dihasilkan. Sebagai salah satu penunjuk prestasi, kehilangan nilai voltan yang dihasilkan sistem sel fuel dipengaruhi oleh beberapa kes seperti kehilangan kerana ohm (*ohmic*), pengaktifan (*activations*) dan kepekatan (*concentration*) (Brian.C 2002). Selain itu, beberapa kajian juga mempelajari bahawa prestasi sel fuel dipengaruhi oleh faktor dalaman dan luaran. Faktor-faktor tersebut meliputi seperti reka bentuk dan pembuatan stek sel fuel, degradasi bahan, keadaan operasi sistem dan kekotoran bahan kimia yang digunakan (Cleghorn et al. 2006).

2.2.1 Jenis-Jenis Sel Fuel

Sel fuel dikelompokkan menjadi beberapa jenis berdasarkan kepada kriteria penggunaannya yang bergantung pada perbezaan parameter, keadaan operasi dan struktur sel fuel. Sistem sel fuel mempunyai beberapa perbezaan kebolehubahan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

seperti: jenis elektrolit yang digunakan, jenis bahan tindak balas, keadaan tekanan dan suhu, pendukung stek sel fuel dan sistem suapan bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC (M.grujicic 2004; Peighambardoust et al. 2010). Penentuan kelompok sel fuel utamanya ditentukan oleh jenis elektrolit yang digunakan. Elektrolit tersebut boleh menentukan jenis bahan tindak balas yang disuapkan ke dalam sel, jenis pemangkin, keadaan suhu operasi dan jenis bahan api yang digunakan.

Setiap jenis sel fuel mempunyai keunggulan dan keterbatasan masing-masing untuk dikembangkan. Sel fuel dikelompokkan dalam beberapa jenis iaitu: *Alkali Fuel Cell* (AFC), *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), *Phosphoric Acid Fuel Cells* (PAFC), *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Molten Carbonate Fuel Cells (*MCFC) dan *Solid Oxides Fuel Cells* (SOFC). Jadual 2.1 menunjukkan jenis-jenis daripada sel fuel. Setiap jenis tersebut mempunyai kelebihan dan keunggulan untuk di aplikasikan sebagai sumber tenaga alternatif.

2.2.2 Keunggulan Teknologi Sel Fuel

Teknologi sel fuel memiliki beberapa keuntungan di antaranya adalah:

1. Teknologi sel fuel boleh menjadi pencetus dalam memudahkan pemuliharaan tenaga. Akibatnya boleh meningkatkan kecekapan pemanfaatan sumber tenaga. Secara amnya, sel fuel memiliki kecekapan yang lebih tinggi berbanding mesin pembakaran kerana sel fuel tidak dibatasi oleh suhu. Nilai kecekapan maksimum mesin pembakaran dibatasi oleh kecekapan Carnot (Xue & Dong 1998). Sistem sel fuel tidak memerlukan perbezaan suhu besar untuk memperoleh kecekapan yang sama kerana kecekapan dipengaruhi oleh nilai tenaga bebas Gibbs (C. Spiegel 2008). Sebagai contoh, kecekapan tertinggi diperoleh oleh mesin pembakaran untuk keluaran kuasa di bawah 250 kW adalah 35%.

2. Mewujudkan berlakunya kepelbagaian sumber tenaga utama. Perkembangan teknologi sel fuel maka mengakibatkan berlakunya upaya untuk menghasilkan hidrogen daripada sumber tenaga terbaharukan.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

3. Mengurangi dan mengatasi kesan pencemaran terhadap persekitaran, antaranya pencemaran CO, CO_2, NOx, SO_x. Hasil samping yang ditimbulkan oleh proses sel fuel akibat tindak balas hidrogen dengan oksigen ialah air, tenaga elektrik dan haba (S.C 2000). Penggunaan teknologi sel fuel boleh membantu mengurangi pelepasan gas rumah kaca, mengurangi pencemaran bandar dan meningkatkan kualiti udara.

4. Teknologi sederhana

   Teknologi sel fuel pada asasnya lebih sederhana berbanding teknologi penghasil tenaga secara konvensional yang ada. Hal ini berlaku kerana teknologi sel fuel hanya terdapat beberapa atau tidak ada bahagian yang bergerak. Bahagian sistem sel fuel yang bergerak adalah hal yang berhubungan dengan aliran pengelolaan air dan haba. Sedangkan teknologi mesin pembakaran memerlukan perawatan khas untuk kemapanan hayatnya.

5. Fleksibel

   Ukuran sel fuel yang digunakan bergantung kepada besar atau kecilnya beban yang diperlukan. Teknologi sel fuel mempunyai jenis yang boleh digunakan untuk aplikasi yang berbeza, misalnya aplikasi untuk pengangkutan dan mudah alih. Pada aplikasi mudah alih, sel fuel mempunyai keunggulan dibandingkan bateri. Sel fuel boleh beroperasi dalam masa yang lama tanpa harus adanya proses pengisian, tetapi kalau bateri untuk waktu lama harus ada masa pengisian kembali.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 2.1 Jenis-jenis dan perbezaan sel fuel

Komponen	**AFC**	**DMFC**	**PAFC**	**PEMFC**	**MCFC**	**SOFC**
Suhu operasi (^oC)	50-100	60-200	160-210	50-80	630-650	800-1000
Bahan api	H_2 tulen atau *hydrazine*	Cecair Metanol	H_2 dari hidrokarbon dan alkohol	H_2 tulen dari hidrokarbon atau metanol	H_2, CO, gas asli, dan propana	Gas alam atau propana
Oksidan	O_2 atau udara	O_2 atau udara	O_2 atau udara	O_2 atau udara	CO_2 atau O_2 atau udara	O_2 atau udara
Elektrolit	*Potassium hydroxide* (KOH)	Membran polimer padat (nafion)	Asid fosfor (H_3PO_4)	Membran polimer padat (nafion)	Litium dan kalium karbonat ($LiAlO_2$)	Stabil oksida elektrolit pepejal (Y2O3, ZrO2)
Kecekapan (%)	40-69	40-55	55	45-60	60-65	55-65
Ketumpatan tenaga (W/cm2)	0.2–0.35	0.04–0.23	0.2–0.25	0.35–0.36	0.1–0.2	0.24–0.3

bersambung…

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

…sambungan

Tindak balas anod	$H_2+2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$CH_2OH+H_2O \rightarrow CO_2+ 6H^+ + 6e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2+CO_3^{2-} \rightarrow H_2O+CO_2+2e^-$	$H_2+O^{2-} \rightarrow H_2O+2^{e-}$
Tindak balas katod	$1/2O_2+H_2O+2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	$1/2O_2+2H^++2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2+2H^++2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2+2H^++2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2+CO_2+2e- \rightarrow CO_3^{2-}$	$1/2O_2+2e^- \rightarrow O^{2-}$
Kekonduksian ion	OH^-	H^+	H^+	H^+	$(CO_3)^{2-}$	O^{2-}
Jangka hayat (jam)	10.000 – 15.000	10.000 – 15.000	40.000 – 60.000	40.000 – 65.000	40.000 – 65.000	40.000 – 80.000
Voltan sel	1,0	0,2 – 1,4	1,1	1,1	0,7 – 1,0	0,8 – 1,0
Kos (US$/kW)	200	200	1000	200	100	1500
Kapasiti	10 kW–100 kW	1 W to 1 kW, 100 kW to 1 MW (penyelidikan)	100 kW, 200 kW, 1.3 MW	30 W, 1 kW, 2 kW, 5 kW, 7 kW, 250 kW	155 kW, 200 kW, 250 kW 1 MW, 2 MW	1 kW, 25 kW, 50 kW, 100 kW, 250 kW, 1.7 MW

bersambung..

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

…sambungan

Kelebihan	Ketumpatan kuasa yang tinggi, *start-up* yang cepat, kecekapan tinggi.	pengurangan kos untuk menghasilkan bahan api, suhu yang rendah	Buangan panas memiliki nilai tinggi, elektrolit lebih stabil, toleransi terhadap kekotoran H_2,.	Ketumpatan kuasa yang tinggi, *start-up* yang cepat, elektrolit padat yang tidak bersifat *corrosive*, suhu yang rendah	Kecekapan yang tinggi, tidak ada logam yang diperlukan.	Elektrolit padat; kecekapan tinggi; buangan haba bernilai tinggi, Guna bahan api fosil langsung
Kelemahan	Harga Pt mahal, bahan api sensitif terhadap kekotoran seperti: CO,H_2S, CO_2 dan CH_4	Kecekapan dan ketumpatan tenaga rendah, metanol *crossover*, hasil sampingan sebagai racun.	Elektrolit cair yang bersifat *corrosive*, bahan bakar sensitif terhadap impurities seperti: CO dan H_2S, *power density* rendah.	Harga Pt mahal, bahan api sensitif terhadap kekotoran seperti: CO dan H_2S	Kos tinggi, elektrolit cecair yang bersifat menghakis, *start-up* lambat, tidak toleransi terhadap sulfur	Kos tinggi, *start-up* lambat, tidak toleransi terhadap sulfur

bersambung..

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

…sambungan

Aplikasi	Pengangkutan udara, kuasa mudah alih	Mengganti bateri di telefon bimbit, komputer dan perangkat *mudah alih* lainnya.	Pengangkutan, kuasa mudah alih.	Perumahan, UPS, layanan kecemasan (hospital, industri pengangkutan)	Pengangkutan (angkuan laut kereta api, industri, utiliti penjana elektrik.	Perumahan, utiliti penjana elektrik, kuasa mudah alih.

Sumber: diolah daripada (A. Boudghene ; Ronald K.A.M 2003; Sopian & Wan Daud 2006; Kirubakaran et al. 2009; Peighambardoust et al. 2010).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

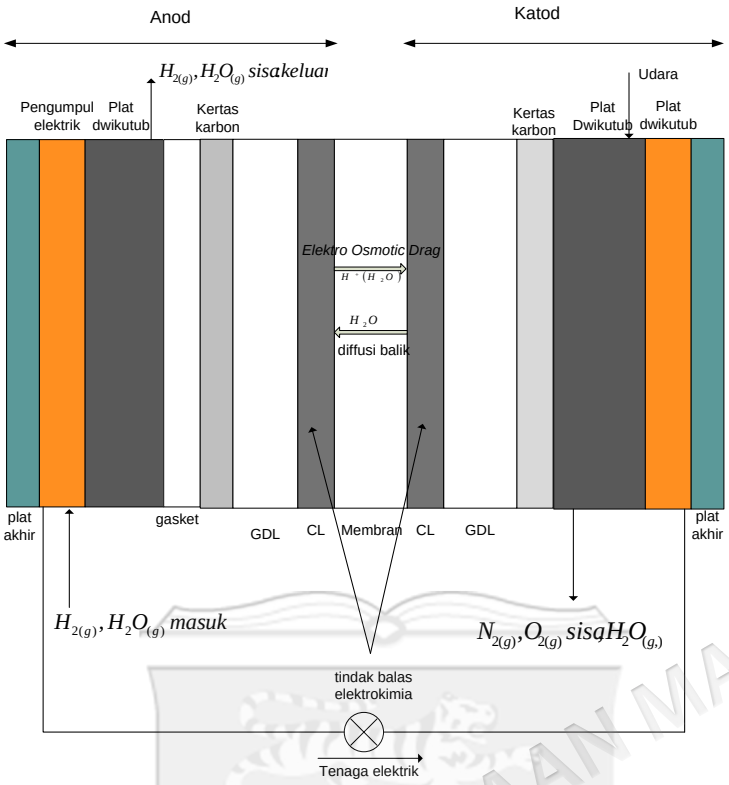
2.3 SISTEM STEK PEMFC

Komponen PEMFC terdiri daripada membran penukar proton, pemangkin, lapisan resapan gas (GDL), plat-plat medan aliran, gasket dan plat-plat hujung seperti terlihat pada Rajah 2.2. Lapisan-lapisan ini disusun berbentuk seperti "*sandwich*" dan digunakan secara bersamaan pada pelbagai proses, dan dikenali sebagai himpunan membran elektrod (MEA). Sistem stek PEMFC yang terdiri daripada beberapa MEA yang posisinya berada di antara medan alir plat dwikutub (Baschuk & Li 2005).

Secara amnya, PEMFC melibatkan interaksi proses yang kompleks seperti tindak balas kimia dan fenomena perpindahan di dalam elektrod berliang. Prestasi sistem PEMFC dipengaruhi oleh banyak faktor seperti: reka bentuk, penghimpunan sel, degradasi bahan, keadaan operasi dan kekotoran (pencemar) di dalam bahan tindak balas (Baschuk & Li 2005; Wu et al. 2008).

Tindak balas hidrogen dan oksigen berlaku pada lapisan pemangkin di dalam stek sel fuel. Molekul-molekul hidrogen terhurai menjadi proton dan elektron di lapisan pemangkin pada sisi anod (Na & Gou 2007). Hidrogen mengalir masuk ke sisi anod sedang oksigen atau udara mengalir masuk ke sisi katod. Membran yang terdapat pada PEMFC berfungsi untuk memisahkan antara gas hidrogen dengan oksigen sehingga tidak saling campur. MEA dilapisi oleh platinum nipis yang berfungsi sebagai pemangkin yang mampu menghuraikan molekul hidrogen menjadi elektron dan proton.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 2.2 Sistem stek PEMFC

Hidrogen terhurai menjadi proton dan elektron pada sisi anod, yang selanjutnya proton berpindah tempat melewati lapisan elektrolit dari sisi anod ke sisi katod. Sedangkan elektron mengalir menuju katod melalui litar bahagian luaran (*external*). Oksigen tidak boleh berpindah melewati lapisan elektrolit pada sisi katod dan oksigen melakukan tindak balas menghasilkan elektrik dengan air dan haba sebagai hasil samping (Rajalakshmi & Dhathathreyan 2007; Lin et al. 2008).

Cabaran utama yang dihadapi untuk mengkomersialkan PEMFC ialah kos, kebolehpercayaan dan jangka hayat. PEMFC sangat dipengaruhi oleh faktor penyusun reka bentuk untuk memperoleh sistem yang optimum. Proses reka bentuk didukung oleh beberapa faktor seperti: suapan bahan api hidrogen, suapan oksidan (oksigen atau udara), pengurusan air dan haba, proses kawalan serta peralatan pendukung (Le & Zhou 2008; Wu et al. 2008). Banyak kes yang berlaku pada stek sel fuel antaranya ialah berlakunya kebanjiran dalam sistem PEMFC, resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod dan penyepadu pengelolaan haba dan jisim selama operasi sistem (Yan et al. 2006; Shimpalee et al. 2007; Liu & Eikerling 2008).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

2.3.1 Lapisan Resapan Gas (GDL)

GDL terdiri daripada dua lapis karbon dan merupakan bahan berliang. Fungsi GDL ialah mengagihkan bahan tindak balas mahupun produk hasil tindak balas ke permukaan elektrod. Pada sisi anod, GDL berfungsi menghantarkan elektron dan juga sebagai media penghantar molekul gas hidrogen dari saluran pemasukan hidrogen ke permukaan mangkin. Pada sisi katod, GDL berfungsi menghantarkan elektron dari lintasan bahagian luar ke permukaan katod dan sebagai pengedar oksigen. GDL mesti mempunyai keliangan tertentu supaya rintangan perpindahan jisimnya ialah kecil. Lapisan GDL bersifat hidrofobik supaya molekul air mudah dibebaskan. Pada bahagian atas GDL ialah merupakan lapisan pemangkin. GDL dan lapisan pemangkin disebut elektrod. Lapisan pemangkin berfungsi sebagai permukaan aktif yang berguna untuk mempercepat berlakunya tindak balas. Prestasi sel dipengaruhi oleh dua parameter iaitu parameter kinetik tindak balas dan parameter perpindahan muatan (elektron dan proton), dan parameter kecepatan perpindahan masa bahan tindak balas dan hasil tindak balas. Kinetik tindak balas dipengaruhi oleh suhu, tekanan dan kepekatan tindak balas. Kelajuan tindak balas akan menentukan besar tenaga yang dihasilkan (Barbir 2005).

2.3.2 Lapisan Pemangkin (CL)

Lapisan pemangkin merupakan tempat separa tindak balas di dalam PEMFC. Komponen pemangkin terdiri daripada gabungan Pt dengan logam aloi contohnya PtCo, Pt-Cr-Ni, dan Pt-Ru-Ir-Sn. Sistem PEMFC secara amnya menggunakan penyokong yang meliputi bahan karbon dan mempunyai permukaan kawasan yang tinggi seperti: Vulcan-XC 72, Ketjen black, or Black pearls BP2000. Lapisan pemangkin tersebut berbentuk kompleks dan heterogen, maka perlu dilakukan reka bentuk supaya memperoleh laju tindak balas yang tinggi dan juga boleh meminimumkan penggunaan pemangkin dalam menghasilkan kuasa.

Hal yang dipertimbangkan berdasarkan isu di atas ialah: besaran antar muka antara elektrolit polimer dengan pemangkin, kecekapan pengangkutan proton yang dihasilkan pada anod dan tindak balas di katod, kemudahan pengangkutan bahan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

tindak balas atau produk gas, penyingkiran air pemeluapan, laluan arus elektronik selanjar antara tempat tindak balas dengan pengumpul arus.

Cho et al. (2007) melakukan penyelidikan tentang pengaruh jumlah platinum di dalam karbon penyokong terhadap prestasi PEMFC yang dihasilkan. Prestasi sel fuel pada penyelidikan menggunakan beban pemangkin berbeza iaitu 20, 40 dan 60 wt%. Pada beban pemangkin Pt/C 20 dan 40 wt % terdapat perbezaan saiz dan luas aktif tindak balas elektrokimia, tetapi perbezaan tersebut tidak menunjukkan pengaruh terhadap prestasi sel tunggal PEMFC. Pada beban pemangkin Pt/C 60wt % menunjukan penurunan prestasi sel terutama pada nilai ketumpatan arus yang tinggi, kerana struktur elektrodnya tidak mempunyai saiz liang yang cukup luas.

Rajalakshmi et al. (2004) melakukan penyelidikan tentang nilai prestasi optimum membran nafion dengan melakukan variasi kepekatan bahan tindak balas, serta peratus nilai platinum pada elektrod sel fuel. Prestasi tertinggi pada 0.6V adalah 1 A/cm^2 dan pada 0.7V adalah 0.5 A/cm^2 dengan menggunakan jumlah terendah beban Pt adalah 0.5%

2.3.3 Himpunan Membran Elektrolit (MEA)

Posisi membran di dalam PEMFC berada antara dua elektrod yang menyerupai seperti *sandwich* dan digunakan untuk memindahkan proton. Membran ini disokong oleh lapisan pemangkin pada sisi anod dan sisi katod. Fungsi membran elektrolit adalah sebagai pemisah oksidan (udara, oksigen) di sisi katod dengan hidrogen yang berada pada sisi anod. Syarat membran elektrolit pada sel fuel ialah meliputi kekonduksian proton yang tinggi, boleh menyerap gas suapan, kestabilan terhadap haba dan bahan kimia, dan lain sebagainya.

Beberapa membran yang digunakan pada sistem PEMFC ialah *perfluorosulfonic acid* (PFSA), *Nafion*® (Dupont™), *Gore-Select*® (Gore™), dan *Aciplex*® dan *Flemion*® (Asahi™) (Wu et al. 2008). Bayrakçeken et al. (2008) melakukan penyelidikan tentang pengaruh komponen MEA terhadap pencapaian prestasi PEMFC. Penelitian ini menunjukan bahawa penggunan membran Nafion ^{R}

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

112 memberikan hasil yang lebih baik terhadap pencapaian prestasi PEMFC berbanding menggunakan Nafion ^{R} 115. Curtin et al. (2004) melakukan analisis bahawa MEA yang dibuat dengan menggunakan Nafion^{R} ST oleh Du Pont mempunyai ketahan terhadap mekanik dan masa hayat . Hasil pencapaianya sama dengan Nafion^{R} NR -111.

2.3.4 Plat Dwikutub

Bahagian luaran elekrod ialah plat dwikutub atau disebut juga sebagai *backplates*. Fungsi utama plat dwikutub iaitu untuk menghomogenkan taburan bahan api (hidrogen) dan oksigen, mengalirkan air, mengumpulkan dan mengirim arus elektrik. Jumlah jisim minimum merupakan masalah besar pada plat dwikutub. Biasanya nilainya tidak lebih tiga per empat dari total jumlah jisim di stek sel fuel. Beberapa bahan yang digunakan sebagai plat dwikutub menurut V.M (2006) seperti emas (masalahnya ialah nilai kos yang tinggi), grafit (mempunyai kekonduksian elektrik yang rendah), *carbon stell* (korosif pada permukaan), *stainles stell* (kontak pada antarmuka meningkat), TiN (memiliki daya konduksi yang tinggi dan sifat kimia yang stabil, tapi memiliki cacat pada masa pelapisan). Masalah yang terkait dengan plat dwikutub ialah pengendalian gas, pengelolaan air, pengumpulan arus dan tekanan pada kedua sisi membran.

2.4 REKA BENTUK SISTEM PEMFC

Sistem PEMFC mempunyai parameter yang saling berhubungan antara satu dengan lainnya. Parameter tersebut ialah keadaan operasi, reka bentuk MEA dan proses sistem PEMFC (Lee & Lalk 1998; Chen et al. 2007). Sistem pada sistem PEMFC didefinisikan sebagai kelompok, objek atau bahan yang digabungkan secara terpadu dan beroperasi bersamaan. Reka bentuk dan pengoptimuman daripada sistem PEMFC merupakan suatu hal yang sangat kompleks kerana berhubungan dengan penggunaan sistem, pemilihan komponen yang tepat dan fungsi dari masing-masing parameter.

Tujuannya melakukan reka bentuk pada proses sistem PEMFC adalah untuk mempertimbangkan kos pembuatan dan pengoperasian, kecekapan sistem, suapan

bahan tindak balas, fleksibiliti dan jangka hayat sistem (Kamarudin et al. 2004; Frangopoulos & Nakos 2006; Santarelli & Torchio 2007; Rajalakshmi et al. 2008). Parameter lain yang terdapat pada sistem seperti tekanan, suhu, komposisi dan utiliti bahan tindak balas dan boleh dilakukan variasi secara bersamaan untuk mencapai prestasi PEMFC yang optimum.

Beberapa kajian yang telah dilakukan berhubungan dengan keadaan operasi daripada reka bentuk PEMFC. Kaytakoglu & AkyalçIn (2007) mempelajari keadaan operasi sel fuel untuk mencapai prestasi yang optimum. Keadaan operasi sistem tersebut diperoleh pada tekanan 5 bar, nisbah stoikiometri kadar alir hidrogen dan oksigen adalah 1 dan 2, suhu operasi $75^{O}C$ dan kelembapan relatif adalah 75%. Ketumpatan kuasa maksimal yang diramalkan adalah 353 mW cm^{-2}, tetapi setelah pembuktian penyelidikan didapat nilainya sebesar 379.64 mW cm^{-2}.

Amirinejad et al. (2006) telah mempelajari mengenai pengaruh parameter operasi seperti suhu, tekanan, kelembapan bahan tindak balas terhadap prestasi PEMFC. Parameter tersebut berpengaruh terhadap proses resapan air dari sisi katod ke sisi anod dan proses perpindahan air dari sisi anod melewati membran ke sisi katod. Jang et al. (2008) mempelajari tentang prestasi masing-masing sel dan stek PEMFC terhadap keadaan operasi. Operasi tersebut meliputi kelembapan, suhu sel, dan kadar aliran gas. Hasil kajian yang dilakukan terhadap penggunaan 5 sel pada stek PEMFC dengan melakukan pengukuran terhadap voltan dan ketumpatan arus untuk masing-masing sel.

Selanjutnya Mench et al. (2003) menyatakan bahawa proses penghilangan wap air yang baik untuk mendapatkan ketumpatan arus yang tinggi boleh dilakukan pada suhu dan nisbah kadar alir yang tinggi dan kelembapan aliran bahan tindak balas yang rendah. Reka bentuk sistem sel fuel di bangun dengan melakukan variasi beberapa parameter yang bertujuan untuk memperoleh keadaan parameter yang tepat untuk mencapai prestasi maksimum.

Heinzel et al. (2005) telah menunjukkan bahawa kecekapan elektrik untuk sistem 2.5 kW boleh diperbaiki dengan melakukan edaran semula gas bahan tindak

balas pada sisi anod. Wu et al. (2005) melakukan kajian dengan cara mengembangkan keadaan operasi optimum dan melakukan pengesahan terhadap hasil simulasi sel fuel yang diperoleh. Sistem PEMFC dikembangkan dengan melakukan kawalan terhadap parameter-parameter penyusun sistem yang terdiri daripada suhu sel, nisbah stokiometri pada sisi katod, tekanan dan kelembapan. Hasil kajian menunjukkan bahawa prestasi sistem sel fuel yang optimal boleh menggunakan sistem yang berbeza. Beban dan ketumpatan arus pada kajian ini dibezakan menjadi kecil, menengah, dan besar. Reka bentuk ini boleh dengan mudah digunakan untuk mengawal beberapa parameter yang lebih besar untuk lebih mengoptimumkan reka bentuk proses sistem PEMFC

Yuan et al. (2010) menyatakan bahawa prestasi PEMFC dipengaruhi oleh tekanan operasi, suhu sel fuel, kelembapan relatif bahan tindak balas dan nisbah stoikiometri. Kenaikan prestasi perastasi sel dipengaruhi oleh kenaikan parameter tersebut. Prestasi terbaik PEMFC berlaku pada hidrogen yang mengalami kelembapan penuh dan peningkatan stoikiometri udara. Beicha (2012) juga menyatakan prestasi sel dipengaruhi oleh parameter diatas. Hasil kajiannya bahawa suhu sel menyebabkabkan peningkatan prestasi yang ketara, sedangkan tekanan dan nisbah stoikiometri tidak ketara.

2.5 GAMBARAN MODEL SEL FUEL

Pemodelan sangat penting untuk mengembangkan proses sistem PEMFC. Pemodelan boleh membantu dalam melakukan reka bentuk awal dan melakukan pengujian prestasi sistem secara cepat. Samping daripada itu, pemodelan juga membantu para pereka bentuk menemukan dan memperbaiki reka bentuk yang sudah ada supaya mempunyai prestasi yang lebih baik.

Sukkee Um et al. (2000) mengembangkan model dua-fasa dan dua dimensi untuk pengangkutan air di dalam GDL. Sukkee Um et al. (2000) mengusulkan model satu fasa, satu domain dan model dua dimensi untuk elektrokimia dan proses pengangkutan di dalam sistem PEMFC. You & Liu (2002) dan You & Liu (2006) memperkenalkan model dua-dimensi yang berhubungan dengan pengangkutan air di

dalam elektrod berliang. Penggunaan model campuran dengan perlakuan dua fasa pada sistem PEMFC, penyelidikan tersebut boleh menggambarkan perlakuan cecair air di dalam GDL dan saluran gas dengan menggunakan perhitungan sederhana dan kos rendah. Shamardina et al. (2010) mengembangkan model dua dimensi pada sesuhu dan keadaan mantap. Pemodelan ini mengkaji tentang bahan tindak balas yang pindah silang (*crossover*) melewati membran PEMFC.

Wang et al. (2001) juga memperkenalkan model campuran untuk menggambarkan perilaku dua-fasa di dalam PEMFC Hasil kajian boleh cecair air jenuh di dalam katod mencapai 6,3% pada 1.4 Acm^{-2} dengan menggunakan udara kering yang mengalir masuk ke dalam katod. Ju et al. (2005) melakukan pengembangan model tiga dimensi dengan keadaan sesuhu. Model ini digunakan untuk menghitung mekanisme haba yang meliputi haba pada tindak balas elektrokimia tidak boleh balik, haba entropi dan joule daripada tahanan ion elektrolit. Fokus utama penyelidikan tersebut adalah untuk mengetahui nilai haba dan pengaruhnya di dalam sistem PEMFC pada masing-masing keadaan operasi dan juga pada perbezaan reka bentuk. Samping daripada itu, juga untuk menentukan parameter penyokong terutama kekonduksian, kelembapan relatif gas suapan dan voltan daripada sel fuel.

Nguyen et al. (2004) melakukan penyelidikan tentang model dinamis mengenai pengiraan bendalir pada sistem PEMFC dengan menggunakan medan aliran yang berkelok-kelok. Pemodelan matematik tersebut menjelaskan tentang perincian jenis pengangkutan jisim, perpindahan haba dan kinetik elektrokimia. Scott & Mamlouk (2009) menggunakan model sesuhu dimensi sifar dan dikembangkan untuk mengetahui hubungan semi emperik untuk keupayaan sel sebagai fungsi ketumpatan arus. Penggunaan model ini boleh menunjukkan kesan penumpukan pemangkin yang mempengaruhi liang dalaman PEMFC.

Hwang (2007) juga melakukan penyelidikan yang menggambarkan pemodelan tentang perilaku daripada dua fasa aliran dan perpindahan haba di dalam elektrod berliang. Model ini hanya mengkaji pada sisi katod dan menggunakan keadaan batas di antar muka dalam penyelesaian numerik. Haraldsson & Wipke (2004) menggunakan pemodelan matematik dalam melakukan reka bentuk sel fuel supaya

boleh langsung mengira prestasi dan kecekapan yang dihasilkan di pelbagai-bagai keadaan operasi. Siegel (2008) mengelompokkan asas pemodelan sistem PEMFC. Sistem sel fuel mempunyai beberapa parameter yang saling berhubungan antara satu dengan lainnya. Prestasi PEMFC ditakrifkan dalam bentuk voltan, ketumpatan tenaga dan kecekapan. Sedangkan prestasi optimum daripada PEMFC dipengaruhi oleh beberapa faktor, yang terdiri daripada: reka bentuk dan perhimpunan, degradasi bahan, syarat operasi, kekotoran dan bahan cemar oleh (Bi & Fuller 2008). Lee & Lalk (1998) dan Chen et al. (2008) menghuraikan tentang parameter penting di dalam PEMFC dan dikelompokkan menjadi tiga bahagian iaitu operasi, reka bentuk dan stek PEMFC. Gambaran tersebut ditunjukkan oleh Jadual 2.2. Panos et al. (2012) mengembangkan model dinamis analitik untuk mengoptimumkan kawalan reka bentuk PEMFC. Pemodelan matematik meliputi pemodelan stek PEMFC dan penunjang lainnya seperti system pemampatan udara, pelembapan dan penyejuk. Jadual 2.2 menunjukan pemisahan operasi dan parameter reka bentuk pada sistem PEMFC. Parameter operasi tersebut berhubungan dengan keadaan operasi sistem sel fuel, sedangkan parameter reka bentuk berhubungan dengan pembinaan (*configuration)* sistem.

Haji (2011) melakukan penyelidikan dengan membangunan reka bentuk proses sistem PEMFC menggunakan model analitik. Pemodelan tersebut berguna untuk menguji prestasi PEMC dan mengetahui kesan suhu, perubahan ketumpatan dan khilangan arus berdasarkan pencirian lengkung ketumpatan arus terhadap voltan. Kesan prestasi tersebut berdasarkan kehilangan yang disebabkan oleh pengaktifan, ohm dan kepekatan.

Kunusch et al.(2010) juga melakukan kawalan terhadap prestasi PEMFC menggunakan pelembap terhadap hidrogen dan udara yang mengalir masuk sel fuel. Kajian ini menggunaan pemodelan yang mengabungkan prinsip teoritis dan analisis semi empiris. Pemodelan tersebut juga sesuai untuk bahan bakar lainnya pada PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 2.2. Parameter- parameter penting dalam reka bentuk sistem PEMFC

Parameter	Perihalan
Operasi:	
Tekanan	: tekanan bahan api dan tekanan operasi pada stek sel fuel
Suhu	: Titik sasaran untuk suhu operasi pada stek sel fuel
Kelembapan	: kelembapan relatif udara mengalir masuk ke dalam PEMFC
Stoikiometri	: jumlah bahan api dan udara yang berlebih pada stek sel fuel
Kadar alir	: kadar alir taburan bahan mentah masuk ke dalam stek fuel sel
Reka bentuk MEA	
Membran	: jenis dan tebal bahan
Mangkin	: jenis dan jumlah yang boleh digunakan pada elektrod
Elektrod	: bahan elektrod , jumlah dan jenis bahan pengisian
Stek	
Kawasan aktif MEA	: kawasan aktif MEA
Aspek nisbah	: nisbah panjang dan lebar plat dwikutub
Jumlah sel	: jumlah sel di dalam stek sel fuel
Bahan plat	: pembinaan bahan bagi plat dwikutub
Tarajah aliran	: berkaitan tempat masuk bahan api terhadap masuk udara
Strategi penyampaian gas	: berkaitan dengan gas-gas melewati stek sel fuel
Bahan plat penyejuk	: pembinaan bahan bagi plat pendinginan
Cecair penyejuk	: cecair yang digunakan bagi plat pendingin
Frekuensi plat penyejuk	: jumlah sel fuel di antara plat penyejuk
Pembinaan stek	: berkaitan dengan komponen individu

Sumber: Giolah daripada Lee and Lalk (1998), Chen et al (2007).

Voltan yang dihasilkan oleh sel fuel (V) adalah:

$$V = E_{thermo} - (\eta_{act,a} - \eta_{act,c}) - \eta_{ohmic} - (\eta_{conc,a} - \eta_{conc,c}) \quad (2\text{-}1)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

E_{thermo} = perkiraan voltan secara termodinanik

$\eta_{act,a}\ dan\ \eta_{act,c}$ = kehilangan aktifasi pada anod dan katod.

Menurut Haji (2011) menyatakan bahawa perkiraan voltan secara termodinamik adalah:

$$E_{thermo} = E^0 + \frac{\Delta s}{nF}(T - T_0) - \frac{RT}{nF} ln\left(\frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} a_{O2}^{0.5}}\right) \quad (2-2)$$

η_{act} digambarkan oleh persamaan Butler -Volmer , yang di turunkan dari persamaan Tafel yaitu:

$$\eta_{act} = a + b\ ln(i) \quad (2-3)$$

$$a = -\frac{RT}{\alpha nF ln\ (i_0)} \quad (2-4)$$

$$b = \frac{RT}{\alpha nF} \quad (2-5)$$

Ketetapan *b* disebut dengan pemalar Tafel

i_0 = perubahan ketumpatan arus, dan merupakan laju tindak balas kehadapan atau balik pada kesetimbangan.

α = variabel yang berhubungan dengan kinetika elektrod

Nilai voltan akibat kehilangan ohm (η_{ohm}) menurut (Kunusch et al. 2010) adalah

$$\eta_{ohm} = i\ R_{ohm} \quad (2-6)$$

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (2-7)$$

R_{ohm} tahanan dalaman dan bergantung pada kelembaban membran dan suhu sel

t_m = tebal membran kering (0.0127 cm untuk nafion 115)

σ_m = konduktiviti membran

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

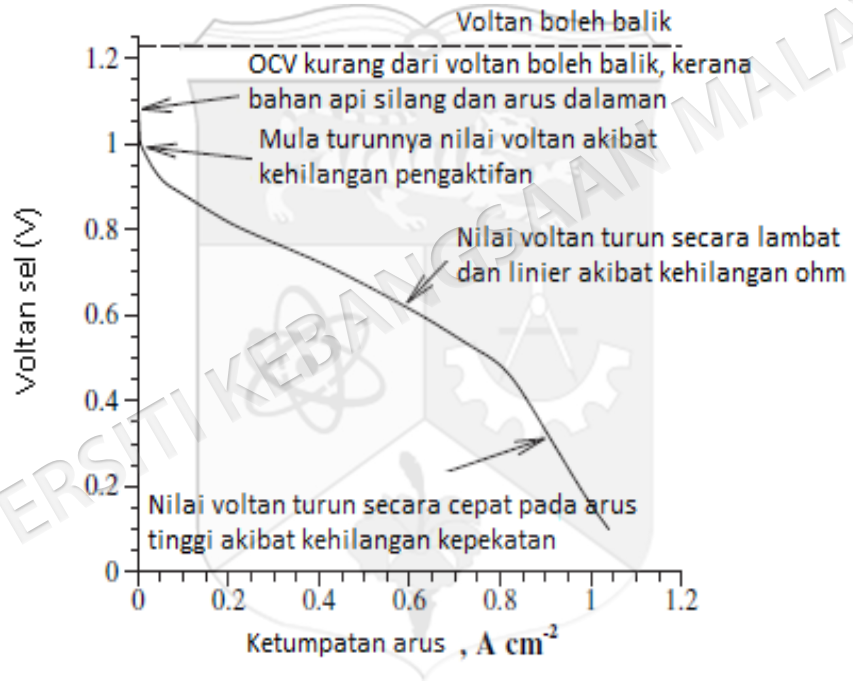
Sedangkan nilai voltan akibat kehilangan kepekatan (η_{conc}) adalah (Haji 2011):

$$\eta_{conc} = c\ ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (2\text{-}8)$$

c adalah pekali kehilangan kepekatan

i_L adalah ketumpatan arus maksimum

Rajah 2.3 berikut ini merupakan gambaran terhadap prestasi PEMFC (Jiao & Li 2011).



Rajah 2.3 Lengkung kekutuban yang tipikal bagi PEMFC

Sumber: Jiao & Li 2011

Penggunaan parameter untuk membangun reka bentuk sistem PEMFC boleh dikembangkan dengan menggunakan model matematika. Hal ini berlaku kerana model mudah untuk dikembangkan, dilakukan pergantian, serta memungkinkan untuk membuat pembinaan yang berbeza terhadap sistem yang akan di simulasikan. Keuntungan membuat pemodelan sistem sel fuel ialah menghemat masa dan kos

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

untuk pemeriksaan parameter yang terkait. Teknik pemodelan yang digunakan di dalam sistem PEMFC juga akan membantu variasi pemeriksaaan parameter sistem.

2.6 PENGURUSAN AIR PADA SISTEM PEMFC.

Pengurusan air pada operasi sistem PEMFC adalah salah satu faktor penting untuk mengelakkan penurunan prestasi dan memperbaiki ketahanan daripada sel. Kelembapan pada salah satu sisi boleh meningkatkan kehilangan tahanan dan voltan. Selain daripada itu juga berlakunya kebanjiran di bahagian katod sehingga menghambat laluan bahan tindak balas.

Hassan et al. (2009) mengatakan bahawa masalah penting pada operasi sistem PEMFC ialah pengurusan air. Pengurusan air meliputi keseimbangan air di dalam dan di luar sistem stek PEMFC. Kesetimbangan air di dalam PEMFC mencakup pengaturan kandungan air yang boleh berada di dalam sel. Sedangkan keseimbangan air di luar sistem PEMFC mencakup pengaturan jumlah kandungan air secara tepat yang di suapkan mengalir masuk ke dalam PEMFC. Sistem keseimbangan air merupakan faktor yang sangat penting dan mesti selalu dikawal keberadaan nya. Pencapaian prestasi PEMFC yang optimal memerlukan keseimbangan air yang tepat sehingga membran di dalam PEMFC tetap mengandung air dan tidak berlaku kebanjiran di dalam sisi katod (Baschuk & Li 2000; Chang et al. 2002; BiyIkoglu 2005) .

Keberadaan air di dalam stek PEMFC mempunyai sifat yang berlawanan. Jika kandungan air di dalam PEMFC rendah, maka menyebabkan membran menjadi kering dan juga boleh mengalami keretakan. Sebaliknya, jika jumlah kandungan air di dalam PEMFC terlalu tinggi maka menyebabkan berlakunya kebanjiran pada sisi katod sehingga menghalangi laluan pada medan aliran dan mencegah penghantaran gas bahan tindak balas (Guvelioglu & Stenger 2007; Falcão et al. 2009; Cheddie 2009). Berdasarkan tindak balas yang berlaku di dalam PEMFC, maka oksigen di antarmuka sisi katod direduksi sehingga menghasilkan air. Air yang dihasilkan mengalir keluar melalui saluran aliran gas (Baschuk & Li 2005; Rajalakshmi & Dhathathreyan 2007; Lin et al. 2008).

Chen, et al. (2008) dan Chen & Peng (2005) menyatakan bahawa jika kandungan air pada membran PEMFC kurang maka mengakibatkan turunnya keberaliran proton dan meningkatnya rintangan, dan mengakibatkan prestasi PEMFC menjadi turun. Sedangkan menurut Fernandes dan Ticianelli (2009) dan Tang, et al. (2007) bahawa prestasi PEMFC menjadi turun dan bahan tindak balas gagal mencapai penukaran maksimum kerana membran sel beroperasi dalam keadaan kering atau berlakunya kekurangan jumlah kandungan air di membran PEMFC

Ketumpatan arus yang rendah di bawah 0.1 A cm^{-2} resapan air dari sisi katod ke sisi anod cukup untuk memenuhi keperluan air membran. Sebaliknya, pada ketumpatan arus tinggi atau besar daripada 0.1 A cm^{-2} resapan air dari sisi katod ke sisi anod tidak cukup membuat membasahi membran sehingga berada dalam keadaan kering (Vasu et al. 2008). Kondisi untuk mengawal membran PEMFC berada dalam keadaan terhidrat iaitu boleh menggunakan pelembap. Pelembap tersebut berfungsi untuk melembapkan gas bahan tindak balas sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC. Pelembapan gas bahan tindak balas memberi kesan terhadap kenaikan prestasi sistem PEMFC yang dihasilkan (Sridhar et al. 2001; Hyun & Kim 2004)

Selama proses operasi sistem berlangsung terdapat beberapa fenomena air di dalam PEMFC. Fenomena tersebut terdiri daripada fenomena *electro osmotic drag* (EOD) yang mana terjadi perpindahan proton bersama-sama air melewati membran dari sisi anod ke sisi katod, resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod, dan resapan air yang berlaku dari atau ke aliran oksidan atau bahan api (Chang et al. 2002 dan Kraytsberg & Ein-Eli 2006). Wap air yang berpindah bersama-sama proton bergabung dengan air yang dihasilkan oleh tindak balas pada sisi katod. Kecerunan kepekatan air pada sisi anod dan sisi katod menyebabkan berlakunya resapan wap air. Kecerunan kepekatan air pada sisi anod dan sisi katod ditentukan oleh tebal membran, kandungan air dan kelembapan gas bahan tindak balas. Kelembapan gas bahan tindak balas mengalir masuk ke dalam stek PEMFC bergantung pada suhu dan tekanan (Janssen & Overvelde 2001; Liu et al. 2007; Park & Caton 2008; Lee et al. 2009).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Pada ketumpatan arus yang rendah, resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod lebih dominan berbanding perpindahan wap air pada fenomena EOD. Sebaliknya, jika nilai ketumpatan arus tinggi maka resapan wap air pada fenomena EOD lebih dominan akibatnya sisi anod mengalami kekeringan sedangkan sisi katod terhidrat. Kandungan air pada membran digunakan untuk memperoleh kekonduksian yang baik tetapi juga boleh menghambat laluan aliran proton ke permukaan pemangkin (Stumper et al. 2005; dan Liu et al. 2006). Kandungan air yang tinggi di dalam aliran gas dan di dalam liang akan menghambat aliran gas di GDL dan CL sehingga mengakibatkan penurunan aktifasi pemangkin di dalam CL. Samping itu, cecair air yang dihasilkan pada lapisan pemangkin di katod mempengaruhi prestasi PEMFC secara kentara dan berpotensi menyebabkan berlakunya kebanjiran (Das et al. 2010). Jika kandungan air terlalu tinggi mengakibatkan berlakunya kebanjiran. Kebanjiran mempengaruhi penurunan nilai ketumpatan arus yang dihasilkan sehingga mengakibatkan berlakunya penurunan prestasi sistem PEMFC (Saleh et al. 2007; Sun et al. 2007; Yousfi-Steiner et al. 2008).

Fenomena kebanjiran juga terbentuk pada ketumpatan arus yang rendah disebabkan oleh keadaan operasi tertentu, seperti suhu rendah, kelembaban tinggi dan laju alir gas yang rendah. Fenomena kebanjiran berlaku kerana disebabkan laju perubahan ke fasa tepuan lebih cepat berbanding perubahan ke fasa wap (Okada 1999; Spernjak et al. 2007). Fenomena banjir boleh terjadi pada kedua-dua sisi elektrod (anod dan katod), tetapi banjir yang berlaku pada bahagian katod adalah sangat penting kerana melibatkan tindak balas reduksi oksigen menghasilkan air (Barbir et al. 2005; Rao et al. 2007). Lee et al. (2011) menyatakan bahawa meningkatnya keliangan GDL menyebabkan air yang dikeluarkan menjadi meningkat kerana penumpukan air berkurang.

Amirinejad et al. (2006) melaporkan bahawa pencapaian prestasi PEMFC dipengaruhi oleh beberapa keadaan operasi sistem yang terdiri daripada suhu, tekanan, dan kelembapan gas bahan tindak balas. Hasil penyelidikan tersebut menunjukkan bahawa keadaan optimum operasi sistem berlaku pada tekanan tertinggi, kenaikan suhu dan kelembapan bahan tindak balas. Kelembapan boleh mengakibatkan nilai ketumpatan arus menjadi rendah dan juga boleh menyebabkan peningkatan jumlah

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

kandungan air membran pada sisi katod. Sebaliknya, kenaikan nilai ketumpatan arus mengakibatkan berlakunya peningkatan suapan air yang mengalir masuk ke dalam sisi anod. Selain itu, halaju gas perolakan akan memudahkan proses pengangkutan hidrogen daripada saluran aliran gas ke lapisan pemangkin di sisi anod. Tetapi kesan lainnya menghalangi proses pengangkutan oksigen di sisi katod (Baschuk & Li 2009) .

(Park et al. 2008). Yan et al. (2006) mempelajari pengaruh berbagai keadaan operasi sistem PEMFC, termasuk kadar bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod, suhu operasi, dan kelembapan pada aliran masuk katod terhadap prestasi PEMFC. Hasil penyelidikan menunjukkan bahawa prestasi PEMFC boleh ditingkatkan dengan peningkatan kadar aliran gas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod, meningkatkan suhu dan pelembapan. Li & Sabir (2005) menyatakan bahawa proses reka bentuk yang dibuat mampu melakukan penyingkiran air oleh aliran gas yang mengalir melewati saluran dan tidak ada pembentukan area genangan (*stagnant*) pada permukaan katod sebagai akibat mengumpulnya air. Fenomena pengangkutan air pada sistem PEMFC mempunyai pengaruh yang kuat terhadap kecekapan operasi dan tenaga yang dihasilkan. Kandungan air katod selama operasi PEMFC bergantung pada imbangan air yang dihasilkan PEMFC. Imbangan air dipengaruhi oleh tindak balas di dalam sel, pengangkutan air pada fenomena EOD dan resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod, dan resapan air dari atau ke aliran gas bahan tindak balas. Proses akhir yang berlaku pada PEMFC iaitu: resapan wap air, perolakan (*convection*) dan pengangkutan rerambut (*capillary*) air melewati liang katod dan lapisan sokongan katod. Kandungan air membran dikawal oleh kelembapan aliran gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sel ketika nilai arus elektrik berada di bawah tingkat tertentu.

Besarnya nilai *elektro osmotic drag* (EOD) ($\mathcal{N}_{drag}$)di dalam sistem PEMFC adalah (Zong et al. 2006):

$$\mathcal{N}_{drag} = \frac{n_d(x)I(x)}{F} \tag{2-9}$$

Dimana:

$\mathcal{N}_{drag}$ = fluks elektroosmotik drag (mol/s^{-})

$n_d(x)$ = pekali EOD (jumlah molekul air yang dibawa oleh satu proton)

Resapan air dari sisi anod ke sisi katod PEMFC adalah (Zong et al. 2006; del Real et al. 2007; Gao et al. 2010)

$$\mathcal{N}_{back\ diffusi\ H20} = D_w \frac{(C_{K,v} - C_{A,v})}{x_m} \quad (2\text{-}10)$$

Dimana:

D_w = purata pekali resapan air di dalam membran ($m^2\ s^{-1}$)

$C_{K,v}$= kepekatan air pada sisi katod

$C_{A,v}$ = kepekatan air pada sisi anod

x_m = tebal membran (m)

$$C_{K,v} = \frac{\rho_{kering}}{M_e} \lambda_K \quad (2\text{-}11)$$

$$C_{A,v} = \frac{\rho_{kering}}{M_e} \lambda_A \quad (2\text{-}12)$$

Dimana:

ρ_{kering} = ketumpatan kering dari membran ($kg\ m^{-3}$)

λ_K =kandungan air membran pada sisi katod

λ_A = kandungan air membran pada sisi anod

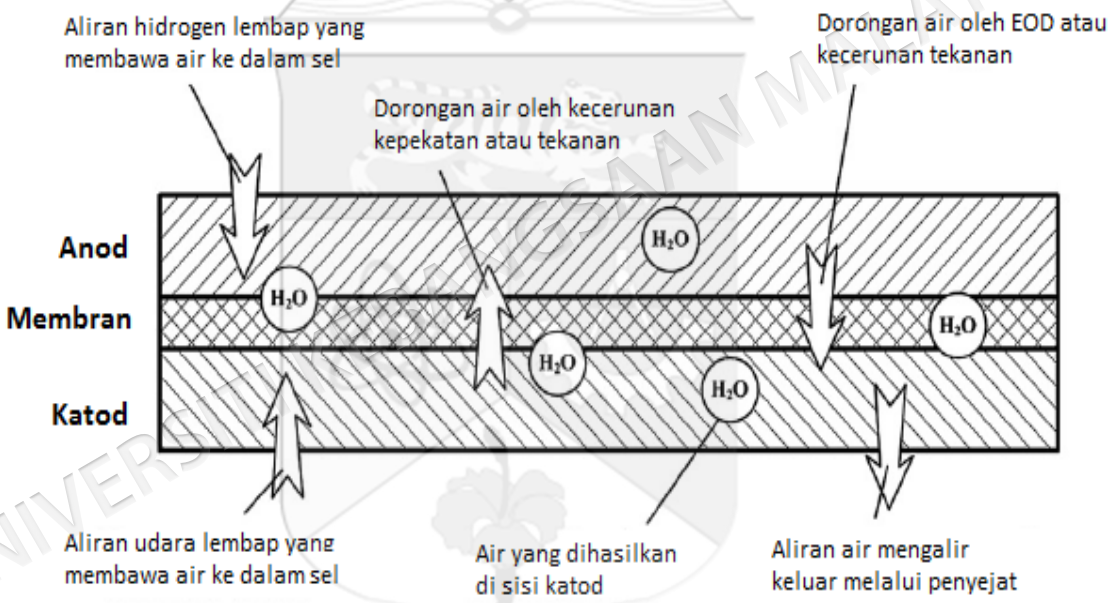
M_e = jisim ekivalen daripada membran ($kg\ mol^{-1}$)

$$\mathcal{N}_{back\ diffusi\ H20} = \frac{\rho_{kering}}{M_e} \frac{D_w}{x_m} (\lambda_K - \lambda_A) \quad (2\text{-}13)$$

Operasi sistem PEMFC yang berlangsung pada keadaan tetap (*steady state),* seluruh air yang dihasilkan pada sisi katod boleh dihilangkan oleh aliran oksigen. Jika ketumpatan arus melebihi nilai tertentu, perpindahan air pada fenomena EOD dan tindak balas akan melebihi penyingkiran air dari pemangkin katod atau lapisan-lapisan sokongan. Jika tumpukan jumlah air mengambil tempat maka berlaku pembanjiran pada elektrod, penurunan kadar oksigen yang mengalir ke permukaan pemangkin di

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

dalam sisi katod, pembatasan jisim bahan tindak balas di elektrod, dan terjadi penurunan kuasa pada sistem PEMFC (Kraytsberg & Ein-Eli 2006 dan Baschuk & Li 2009). Operasi sistem PEMFC sangat penting untuk memperoleh keseimbangan air membran yang boleh berada di dalam sistem PEMFC sehingga prestasi optimum sel boleh dicapai (Li et al. 2008 dan Yousfi-Steiner et al. 2008). Berning (2011) mengembangkan model untuk pengangkutan air di membran PEMFC selama operasi. Kajian ini melakukan pendekatan keseimbangan EOD dan repasan air melewati membran. Hasil kajian ini menunjukan bahawa membran sisi katod mengalami hidrasi lebih rendah berbanding sisi anod. Skema perilaku air yang terdapat di dalam sistem PEMFC boleh ditunjukkan oleh Rajah 2.4 berikut (Yuan et al. 2010)



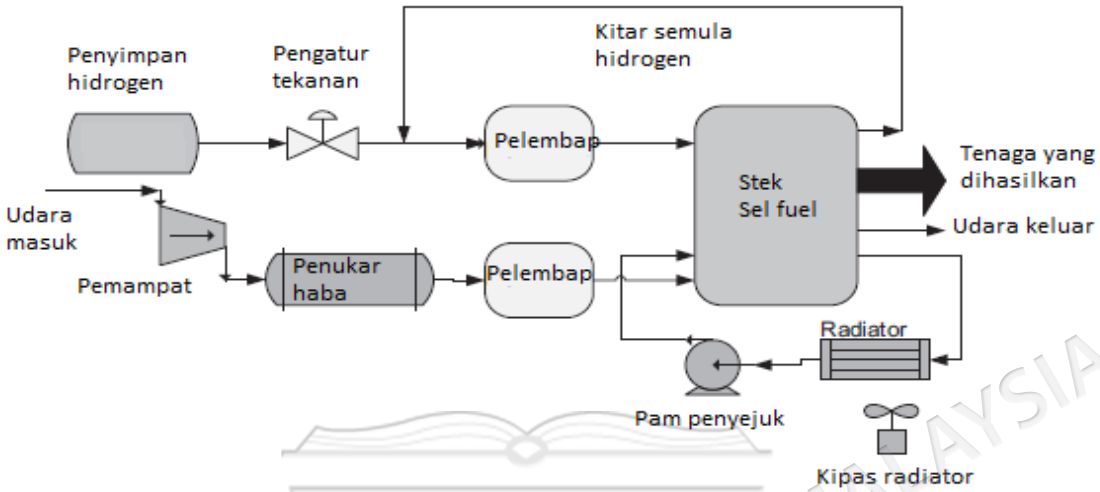
Rajah 2.4. Skema perilaku air di dalam sistem PEMFC

Sumber: Yuan et al. 2010

2.7 PENGGUNAAN HIDROGEN LANGSUNG PADA SISTEM PEMFC

Sistem PEMFC biasanya melibatkan beberapa subsistem seperti bekalan oksidan (oksigen atau udara), bekalan gas hidrogen, pengurusan haba, pengurusan air, keadaan tenaga, instrumen dan pengawalan sistem. Reka bentuk proses sistem PEMFC yang menggunakan hidrogen sebagai gas bahan tindak balas langsung untuk menghasilkan

elektrik telah dikembangkan oleh (Mert et al. 2012) dan ditunjukan oleh Rajah 2.5 berikut:



Rajah 2.5. Reka bentuk sistem penggunaan hidrogen langsung pada proses PEMFC

Sumber: Mert et al. 2012

Bekalan oksigen yang mengalir masuk ke dalam PEMFC disuapkan secara berlebihan daripada stoikiometri yang diperlukan. Nisbah stoikiometri yang digunakan biasanya adalah daripada 1.2 hingga 1.3, sedangkan sebanyak 20% hingga 30% ialah oksigen berlebih. Oksigen berlebih yang disuapkan mengalir masuk ke dalam PEMFC boleh membawa produk air yang dihasilkan dari sel. Kelebihan oksigen pada sistem PEMFC mengalir keluar daripada sel. Pada sebahagian besar sistem sel fuel, aliran oksigen beroperasi dalam konfigurasi loop tertutup dan kelebihan oksigen dikembalikan balik pada aliran masuk sel (Qi & Kaufman 2002; Barbir et al. 2005; Frano 2005).

Weng et al. (2007) menyatakan bahawa jika nisbah stoikiometri oksigen lebih besar maka oksigen membawa wap air lebih banyak untuk tindak balas. Kepekatan wap air hasil tindak balas sistem PEMFC nilainya akan tetap jika pertukaran tindak balas sudah mencapai nilai maksimum walaupun nisbah stoikiometri oksigen berlebih. Friedl et al. (2008) menyatakan bahawa nisbah stoikiometri udara mempunyai pengaruh yang penting terhadap keseimbangan air sistem PEMFC pada suhu rendah,

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

kerana sistem boleh membawa air mengalir keluar dari sisi katod. Sistem PEMFC yang beroperasi pada suhu rendah selalu dioperasikan dengan menggunakan nisbah stoikiometri udara yang tinggi. Tujuannya adalah supaya operasi sistem PEMFC menjadi stabil, nilai voltan yang dihasilkan lebih stabil dan prestasi sistem PEMFC menjadi optimum.

Jang et al. (2008) menyatakan bahawa prestasi sel tunggal dan stek sel fuel tidak menunjukkan hasil yang berbeza jika berlakunya kenaikan nisbah stoikiometri gas bahan tindak balas pada sisi anod, tetapi prestasi sel tunggal dan stek sel fuel menjadi naik dengan meningkatnya nisbah stoikiometri bahan tindak balas pada sisi katod.

Zamel & Li (2013) menyatakanan bahawa faktor paling kritikal bagi mengatasi masalah PEMC adalah pengelolaan air dan haba. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahawa peningkatan prestasi sel dikesan oleh peningkatan tekanan dan suhu opersi. Penurunan prestasi juga disebabkan oleh penurunan kelembapan relatif bahan tindak balas dan kenaikan tebal membran. Samping itu, peningkatan laju stoikiometri hidrogen dan oksigen hingga 3 juga menyebabkab kenaikan prestasi.

Secara prinsip, aliran udara dan hidrogen yang mengalir masuk ke dalam PEMFC mesti berada pada keadaan lembap. Tujuan hidrogen dilembapkan sebelum mengalir masuk ke dalam sel adalah untuk memastikan pada peristiwa EOD membran tidak mengalami kekeringan pada sisi anod. Tujuan udara harus dilembapkan walaupun menghasilkan air pada sisi katod adalah untuk memastikan bahawa kelebihan gas kering pada aliran masuk boleh membawa air yang dihasilkan pada tindak balas elektrokimia.

2.8 PELEMBAPAN PADA SISTEM PEMFC

Air yang dihasilkan pada bahagian dalam PEMFC disebabkan oleh tindak balas pengurangan oksigen pada sisi katod tidak menjamin bahawa membran sel berada dalam keadaan terhidrat. Pengaruh akibat mengalirkan bahan tindak balas dalam keadaan kering boleh mengakibatkan penghilangan air daripada GDL sehingga

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

mengakibatkan membran sel berada dalam keadaan kering. Pengurusan air pada sistem operasi PEMFC merupakan salah satu faktor penting guna mencegah penurunan prestasi dan memperbaiki ketahanan daripada sel. Kelembapan pada salah satu sisi PEMFC boleh meningkatkan kehilangan tahanan voltan dan berlakunya kebanjiran. Banjir pada sisi katod boleh menghambat laluan bahan tindak balas menuju permukaan pemangkin untuk bertindak balas.

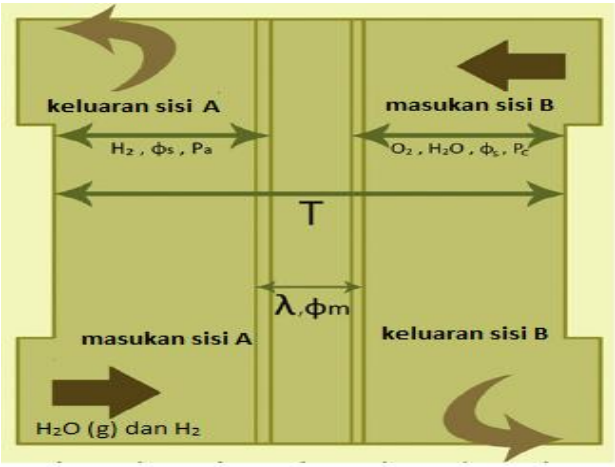
Penyelidikan yang dilakukan oleh Lee et al. (2011) menyatakan bahawa peningkatan prestasi sel fuel dipengaruhi salah satunya oleh peningkatan kelembapan relatif bahan tindak balas. Kelembapan relatif di anod pengaruhnya lebih kentara berbanding kelembapan relatif di katod (Yuan et al. 2010). Peningkatan kelembapan di katod lebih sensitif menimbulkan kebanjiran berbanding kenaikan di anod (Jamekhorshid et al. 2011).

Salah satu cabaran yang dihadapi untuk mencapai prestasi sel fuel yang optimum adalah memperoleh kelembapan yang tepat pada proses sistem PEMFC. Kesan kelembapan pada sistem sel fuel sangat penting kerana (Sridhar et al. 2001; Ceraolo et al. 2003; Kang et al. 2010):

1. Kurangnya penghidratan pada membran PEMFC menyebabkan turunnya keberaliran proton, berlakunya peningkatan kehilangan rintangan, turunnya nilai ketumpatan tenaga dan turunnya kawasan panas secara tiba-tiba boleh mengurangkan hayat membran.
2. Jika terdapat jumlah air berlebih pada membran PEMFC maka berlakunya kebanjiran di dalam MEA. Jika berlaku kebanjiran boleh menyebabkan terhambat aliran bahan tindak balas ke permulaan pemangkin sel fuel, sehingga mengurangkan laju tindak balas kimia dan menghasilkan peningkatan kelebihan keupayaan (*over-potential*). Selain itu juga menyebabkan kerugian terhadap prestasi dan umur daripada PEMFC.

Model reka bentuk tentang pengangkutan air di dalam stek seperti yang ditunjukan oleh Rajah 2.6 berikut:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 2.6 Pengangkutan air di dalam stek

Sumber: Abedini et al. 2012

Menurut (Park & Oh 2009) bahawa nilai kelembapan relatif adalah:

$$\varphi = \frac{P_w}{P_{sat}} \quad (2\text{-}14)$$

Dimana:

P_w adalah tekanan separa air dan P_{sat} adalah tekanan wap tepu air.

Sedangkan fluks jisim air yang mengalir melewati membran ($\mathcal{N}_w^{mem}$) adalah:

$$\mathcal{N}_w^{mem} = k_w(x_w \gamma_w P_{sat} - y_w P) \quad (2\text{-}15)$$

Dimana:

k_w = kebolehtelapan air

x_w = pecahan mol air dalam fasa cecair

γ_w = pekali aktiviti air

P_{sat} = tekanan tepu air pada suhu yang diberikan

y_w = pecahan mol air dalan fasa wap

P = tekanan total.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

2.8.1 Kaedah Pelembapan Membran

Terdapat beberapa kaedah untuk mewujudkan keadaan lembap pada sistem PEMFC iaitu dengan menggunakan kaedah pelebapan dalaman dan luaran. Kaedah pelembapan dalaman ialah gas bahan tindak balas dipanaskan di bahagian luaran PEMFC, selanjutnya gas yang dipanaskan tersebut dilembapkan di dalam sistem PEMFC. Sedangkan pada kaedah pelembapan luaran adalah gas bahan tindak balas dipanaskan dan dilembabkan di luar PEMFC (Sridhar et al. 2001) Pelembap dalaman merujuk kepada penambahan air langsung ke dalam sistem PEMFC, atau kaedah menyimpan air yang dihasilkan oleh tindak balas di dalam sel fuel. Pelembap luaran melibatkan penambahan penggunaan unit pelembapan untuk menyediakan gas bahan tindak balas yang lembap sebelum mengalir maasuk ke dalam sel.

Banyak kaedah pelembapan dalaman telah dicadangkan, seperti yang dilakukan oleh Choi et al. (1998). Reka bentuk yang dibuat iaitu gas pelembap berasal dari wap air yang mengalir keluar dari sistem PEMFC. Air penyejuk untuk sistem PEMFC dialirkan pada salah satu sisi pelembap membran manakala gas kering masuk melewati sepanjang sisi membran yang lain. Kaedah ini berkesan jika menggunakan jenis membran yang sesuai. Samping daripada itu, juga memiliki kerumitan dalam hal reka bentuk stek sistem PEMFC dan jumlah air penyejukan yang berkurang dari masa ke masa.

Jung S. Yi & Nguyen (1998). melakukan penyelidikan tentang kaedah penggunaan pelembapan pada sistem PEMFC menggunakan suntikan langsung cecair air ke dalam saluran aliran gas bahan tindak balas. Cecair air di dalam aliran ini tersejat bersama-sama ke dalam gas bahan tindak balas. Pelembapan luaran ini jika dioperasikan pada suhu yang tinggi adalah lebih baik menggunakan suntikan cecair air kerana suhu yang tinggi lebih banyak air akan diserap oleh aliran gas kering.

Penggunaan wap air yang dihasilkan sistem PEMFC untuk di kitar semula sebagai pemanas dan pelembapan pada unit pelembap pada reka bentuk proses sistem PEMFC. Metode tersebut memiliki beberapa kelebihan adalah sebagai berikut (Vasu et al. 2008):

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

1. Tidak memerlukan penambahan tenaga dalam bentuk elektrik untuk menaikkan suhu yang mengakibatkan terjadinya kehilangan kuasa PEMFC.
2. Jumlah tenaga elektrik yang digunakan oleh radiator untuk menyejukkan PEMFC,boleh dikurangkan jumlahnya dengan ketara.
3. Boleh mengelakan berlakunya kebanjiran yang disebabkan oleh pemeluwapan wap air pada muka bidang aliran elektrod tanpa mengira suhu operasi PEMFC

2.8.2 Jenis Jenis Pelembapan luaran

Pelembap luaran pada sistem PEMFC terdiri daripada beberapa jenis iaitu: muncung semburan (*spray nozzle*), gelembung gas (*gas bubbling*), pelembap roda entalpi (*enthalpy wheel humidifier*) dan pelembap membran.

a. Pelembap muncung semburan

Pelembap muncung semburan ialah jenis pelembap yang beroperasi dengan cara menyemburkan titisan air ke udara yang beredar (Strindehag et al. 1991). Pada pelembap muncung semburan, sistem pemampatan udara adalah sangat penting untuk kitaran udara lembap. Pengagihan kadar aliran, pekali pemindahan haba, dan titisan air terbentuk sangat bergantung kepada tekanan pemampatan yang digunakan. Secara amnya, prestasi pelembap dipengaruhi oleh suhu air dan kadar aliran gas. Dalam sistem PEMFC, suhu suntikan air meningkat jika berlaku kenaikan titik embun gas pelembapan dan penurun suhu jika berlaku kenaikan aliran gas (Jung et al. 2007; Xu et al. 2007).

Semburan muncung dan mekanisme menggelegak gas tidak sentiasa memberi penggalakan kelembapan relatif tinggi pada suhu operasi PEMFC. Hal ini disebabkan oleh kehilangan haba proses pengewapan dan rendahnya suhu masuk bahan tindak balas. Pemanas air boleh ditambah untuk memberi kuasa kawalan tambahan, tetapi hal ini tidak disukai kerana menambah beban dan kos (Chen & Peng 2005). Mekanisme peranti pelembap roda entalpi dan pelembap membran menggunakan semula ekzos haba dan wap air daripada PEMFC untuk memanaskan dan melembabkan gas kering untuk meningkatkan kecekapan keseluruhan sistem (Miachon & Aldebert 1995; Choi

UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

et al. 1998; Staschewski & Mao 1999). Kaedah gas menggelegak ialah melewatkan gas bahan tindak balas melalui botol air panas. Pada jenis pelembap ini berlaku penurunan tekanan yang besar dan tidak boleh dielakkan. Penurunan tekanan tersebut diimbangi dengan kenaikan tekanan udara yang mengalir masuk stek. Pelembap gas menggelegak biasanya sesuai untuk sel fuel yang kecil dan tekanan rendah.

b. Pelembap gelembung gas

Pelembap gelembung gas merupakan pelembap yang amnya digunakan sebagai pelembap luaran. Gas aliran bahan tindak balas dalam pelembap gelembung mengalir melalui penyembur ke dalam kolom air panas dan udara kontak dengan air untuk dilembapkan. Jumlah air yang dipindahkan ke aliran gas adalah fungsi haba air, sentuhan antar muka air-udara, dan masa untuk sentuhan gelembung udara dengan air (Rajalakshmi et al. 2002).

Pelembap gelembung ini boleh memberikan pelembapan yang cukup baik pada berbagai perbezaan kadar aliran dan suhu. Pelembap jenis ini dibatasi oleh beberapa soalan yang meliputi: panjang aliran dan ukuran untuk menghasilkan gelembung dengan ukuran kecil, reka bentuk untuk kadar alir yang tinggi memiliki kendala terhadap tinggi turus dan penurunan tekanan, terdapat kerugian yang kentara terhadap kehilangan tenaga kerana digunakan untuk memanaskan turus gelembung (Glises et al. 2005).

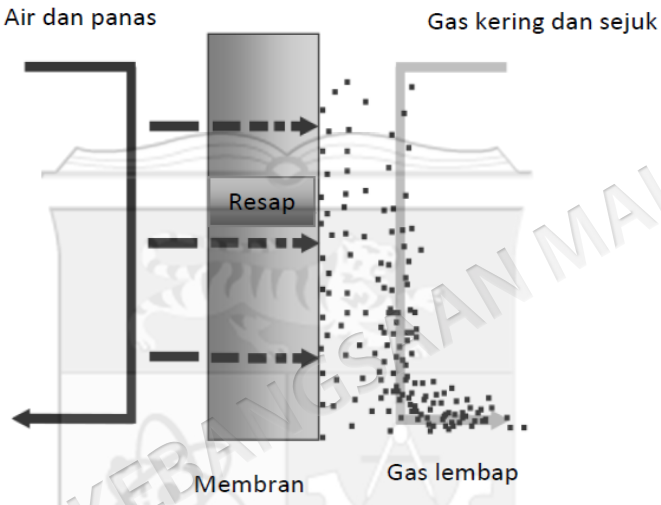
c. Pelembap roda entalpi

Kaedah pelembap entalpi roda telah dikembangkan dengan menggunakan roda seramik berputar sebagai medium untuk pertukaran haba dan pelembapan. Pemanasan aliran gas sejuk dicapai dengan menggunakan gas ekzos yang panas dan lembap daripada PEMFC itu sendiri. Kelembapan udara dikawal oleh kelajuan putaran roda atau jika diperlukan pengawalan pembukaan pintasan untuk menentukan berapa banyak gas ekzos diarahkan ke arah roda entalpi. Pelembap entalpi kaedah roda boleh menyebabkan rentas aliran dan masalah pada pembuat kerana kerumitan dan kos penyelenggaraan (Chu & Jiang 1999 dan Hwang et al. 2012).

d. Pelembap membran

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Pelembap membran terdiri daripada saluran gas kering dan wap air (saluran gas lembap) dan dipisahkan oleh membran telap air. Disamping wap air mengalir pada alirannya, wap air juga berpindah melewati membran dari saluran air atau gas lembap ke saluran gas kering disebabkan kecerunan kelembapan relatif merentasi membran. Akibat sistem ini, gas kering yang mengalir masuk ke dalam pelembap dan jika mengalir keluar adalah gas lembap. Mekanisme perpindahan yang berlaku pada pelembap membran boleh dilihat pada Rajah 2.7 berikut:



Rajah 2.7 Prinsip perpindahan pada pelembap membran

Sumber : S.K Park et al. 2005

Chen et al. (2008) menggunakan pelembapan luaran untuk mengawal kelembapan PEMFC. Kajian ini menunjukan bahawa kadar wap membran meningkat dengan ketara dengan suhu masuk udara dan air, sebaliknya menjadi turun dengan kadar alir udara. Pelembap roda entalpi dan membran lebih sesuai untuk aplikasi mudah alih. Pelembap jenis ini menggunakan semula sejumlah besar haba dan kelembapan yang dijalankan sistem oleh aliran berlebihan dalam PEMFC. Perbezaan antara pelembap roda entalpi dan pelembap membran adalah keperluan motor elektrik pada pelembap roda entalpi (Park et al. 2008; Kang et al. 2010).

Berikut ini merupakan perbandingan jenis-jenis pelembapan luaran yang digunakan untuk aplikasi sistem PEMFC dan boleh dilihat pada Jadual 2.3 berikut:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual.2.3. Kelebihan dan kekurangan kaedah pelembapan

Strategi pelembapan	**Kelebihan**	**Kekurangan**
Tanpa pelembap	Tiada komponen tambahan	Terhad pada operasi rejim sel fuel Kemungkinan peningkatan kegagalan membran sel fuel
Pelembap dalaman	Tiada komponen tambahan Pelembapan dihad oleh diri sendiri	Reka bentuk sel fuel yang rumit Masalah terhadap ketahanan terhad pada rejim operasi
Kolom gelembung	Kawalan pelembapan yang tepat dan baik Ketahanan yang tinggi	Kerugian kuasa yang besar disebabkan pemanasan turus air Memerlukan kawalan yang rumit Secara realistiknya terhad pada skala makmal
Suntikan cecair atau stim	Kawalan tingkat pelembap yang tepat Ketahanan yang tinggi	Memerlukan kawalan yang rumit Kehilangan kuasa akibat pemanasan dan pengewapan udara Kemungkinan terhadap kegagalam mekanikal
Roda entalpi	Kitar semula ekzos haba dan pelembapan Kawalan pasif	Kehilangan kuasa yang kecil Kemungkinan kegagalan bahagian dan kedap mekanik

bersambung...

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

...sambungan

Kelompang dan tiub	Kitar semula ekzos haba dan pelembap Kawalan pasif	Behan serat berongga yang mahal Tidak sesuai dimasukan ke dalam sistem
Plat dan bingkai	Kitar semula ekzos haba dan pelembap Kawalan pasif	Jumlah yang besar untuk dihimpun
Reka bentuk berlipat	Kitar semula ekzos haba dan pelembap Kawalan pasif Kenaikan isipadu terhadap nisbah membran	Sukar meramalkan pengagihan aliran Meningkatnya susutan tekanan

Sumber: Diolah daripada Huizing R 2007

2.8.3 Pelembapan Membran

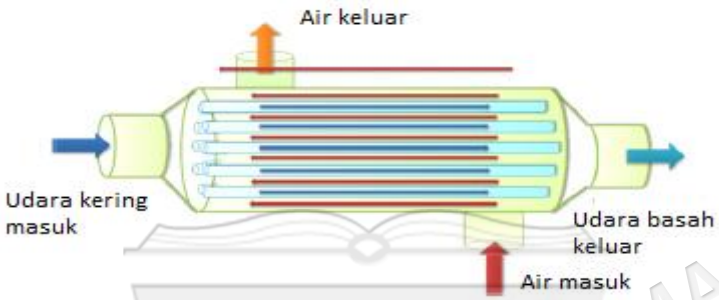
Reka bentuk pelembapan membran untuk melembapkan gas kering dibahagi menjagi dua bahagian iaitu bentuk satah dimana serupa dengan bentuk plat dan bingkai, dan bentuk tiub yang serupa dengan bentuk penukar haba kelompang dan tiub. gas panas dan gas sejuk dipisahkan oleh membran supaya tidak saling campur.

a. Bentuk kelompang dan tiub

Pada pelembapan membran boleh terjadi perpindahan dari gas ke gas atau cecair ke gas. Di dalam pelembapan ini gas ekzos yang panas dan basah dari PEMFC dialirkan melalui membran tiub. Sementara itu, pada sebelah kelompang atau sebelah luaran membran tiub mengalir masuk gas sejuk dan kering. Kepekatan dan kecerunan haba antara kedua-dua sisi pelembap membran tesebut mengakibatkan terjadinya perpindahan air dan haba daripada membran tiub ke sisi kelompang. Akibat

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

perpindahan ini menyebabkan gas dingin dan kering menjadi gas lembap dan suhunya meningkat. Pelembap membran berbentuk kelompang dan tiub boleh dilihat pada Rajah 2.8. Kang et al. (2010 dan 2012) menggunakan pelembapan jenis membran untuk melembapkan bahan tindak balas PEMFC dan memperoleh prestasi sel yang lebih baik. Kajian ini melakukan kawalan isi padu yang meliputi kelompang, membran dan tiub.



Rajah 2.8. Bentuk pelembap kelompang dan tiub

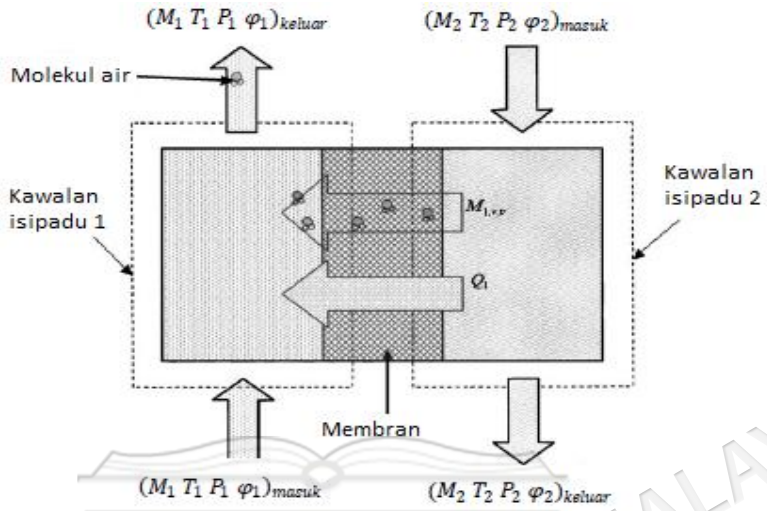
Sumber: Kang et al. 201

b. Bentuk plat dan bingkai

Pelembap membran berbentuk plat dan bingkai membolehkan berlakunya perpindahan gas ke gas atau cecair ke gas , dimana serupa dengan bentuk kelompong dan tiub. Bentuk pelembap jenis ini mempunyai dua sisi yang dipisahkan oleh membran yang serupa dengan bentuk sel pada PEMFC. Sisi yang terdapat pada pelembap ini dilalui oleh gas panas dan lembap, manakala sisi sebelah membran satunya lagi dilalui oleh gas sejuk dan kering. Membran yang digunakan pada jenis pelembap ini mesti bersifat telap air. Perpindahan haba dan air melalui membran dari sisi laluan gas panas basah ke sisi laluan gas sejuk dan kering. Kadylak et al. (2009) menggunakan pelembapan jenis plat dan bingkai untuk menentukan keberkesanan terpendam dan bilangan pendam. Park & Oh (2009) juga menggunakan jenis pelembapan membran yang sama untuk memeriksa kapasiti pelembap membran nafion. Kajian ini dilakukan dengan membangun model kualitatif satu dimensi.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

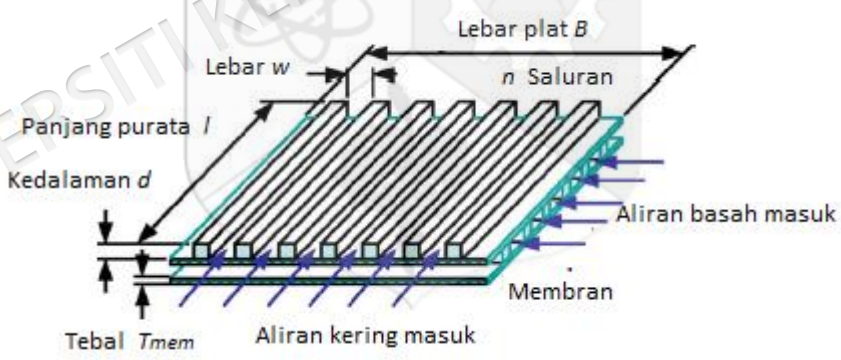
Rajah 2.9 berikut ini menunjukkan gambaran tentang pelembap membran berbentuk plat dan bingkai



(a)

Dimana :

$M, T, P\ dan\ \varphi$ adalah jisim bahan tindak balas, suhu, tekanan dan kelembapan relatif.



(b)

Rajah 2.9. Sistem pelembap membran berbentuk plat dan bingkai (a) kawalan isipadu pada unit pelembap membran (b) lapisan plat saluran pelembapan membran

Sumber: (a) Chen & Peng 2005 dan (b) Kadylak & Mérida 2010

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB III

KAEDAH PENYELIDIKAN

3.1 PENGENALAN

Sebagai pusat suatu sistem, proses PEMFC mesti disokong oleh beberapa faktor yang meliputi bekalan udara dan hidrogen, pengurusan air dan haba, proses kawalan suhu, peralatan dan penyeliaan (A. Boudghene ; Yan et al. 2006; Shimpalee et al. 2007; Liu & Eikerling 2008). Beberapa cabaran yang dihadapi sistem PEMFC untuk mencapai prestasi optimum ialah kadar aliran bahan tindak balas, terjadinya kebanjiran di dalam sel, penyebaran bahan tindak balas pada lapisan elektrod, keseimbangan jisim dan tenaga dan lainnya. Masalah ini boleh di atasi dengan membuat pemodelan matematik yang berguna untuk mengetahui kesan penggunaan beberapa parameter operasi dan memperkirakan prestasi sistem yang boleh dicapai (Miachon & Aldebert 1995).

Kandungan air membran pada PEMFC berguna untuk membolehkan pengaliran proton. Samping daripada itu, kekonduksian membran juga bergantung kepada kandungan air, tetapi jika membran mengandungi jumlah air yang tinggi maka di dalam PEMFC berlaku kebanjiran. Sebaliknya jika membran berada pada keadaan hidrasi maka menyebabkan berlakunya kegagalan fungsi membran pada PEMFC (Guvelioglu & Stenger 2007; Falcão et al. 2009; Ibrir & Cheddie 2009). Oleh itu, imbangan air diperlukan di dalam PEMFC dan dicapai dengan melakukan pengaturan pada keadaan operasi optimum seperti kelembapan, suhu, tekanan dan nisbah stoikiometri bahan tindak balas pada sisi anod dan katod sel fuel. Di samping itu, wap air yang dihasilkan oleh PEMFC berguna untuk melembapkan bahan tindak balas

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

sebelum masuk ke dalam sisi anod dan katod. Wap air keluar dari PEMFC, selanjutnya mengalir masuk ke dalam unit pelembapan membran. Pada unit ini air berfungsi untuk melembapkan bahan tindak balas iaitu hidrogen dan udara sebelum masuk ke dalam sisi anod dan katod. Nilai kecekapan sistem perubahan tenaga yang terdapat pada proses sistem PEMFC dan peralatan lainnya tidak mencapai 100%. Jumlah tenaga bahan api yang tidak diubah menjadi tenaga elektrik akan menjadi haba. Haba yang dihasilkan oleh sistem PEMFC boleh dimanfaatkan untuk meningkatkan suhu aliran bahan yang ada pada sistem.

3.2. RANCANGAN KAJIAN

Analisis yang digunakan terhadap masalah yang berlaku pada PEMFC berguna untuk memahami proses reka bentuk pada sistem PEMFC. Selanjutnya, membuat kerangka strategi optimum untuk memperoleh peningkatan prestasi PEMFC. Prestasi proses sistem PEMFC bergantung pada jenis variasi parameter kelembapan relatif, suhu dan tekanan operasi, nisbah stoikiometri hidrogen pada sisi anod dan udara pada sisi katod. Analisis yang dilakukan pada kajian ini bertujuan untuk memahami dan mendapatkan kesan yang berbeza daripada keadaan parameter ini terhadap prestasi sistem. Secara keseluruhan, analisis yang terdapat pada kajian ini mengikuti langkah-langkah seperti berikut:

1. Reka bentuk proses sistem PEMFC menggunakan hidrogen tulen dan udara sebagai bahan tindak balas
2. Penetapan andaian sistem
3. Pembangunan model model reka bentuk yang terdapat pada unit unit poses sistem PEMFC.
4. Penyelesaian model menggunakan perisian Simulink Matlab
5. Analisis hasil simulasi
6. Pengesahan model dengan hasil penyelidikan yang sedia ada.

3.3 REKA BENTUK SISTEM PEMFC

Secara keseluruhannya, reka bentuk proses sistem PEMFC terdiri daripada dua unit proses utama iaitu pelembapan membran dan stek PEMFC. Pelembap membran

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

berguna untuk melembapkan bahan tindak balas, sedangkan stek PEMFC berguna untuk melakukan tindak balas hidrogen dengan oksigen menghasilkan elektrik. Rajah 3.1 menunjukkan gambaran mengenai reka betuk proses sistem PEMFC yang menggunakan hidrogen tulen langsung sebagai bahan tindak balas dan mengalir masuk ke dalam sisi anod. Sedangkan gas bahan tindak balas lainnya ialah udara yang mengalir masuk ke dalam sisi katod.

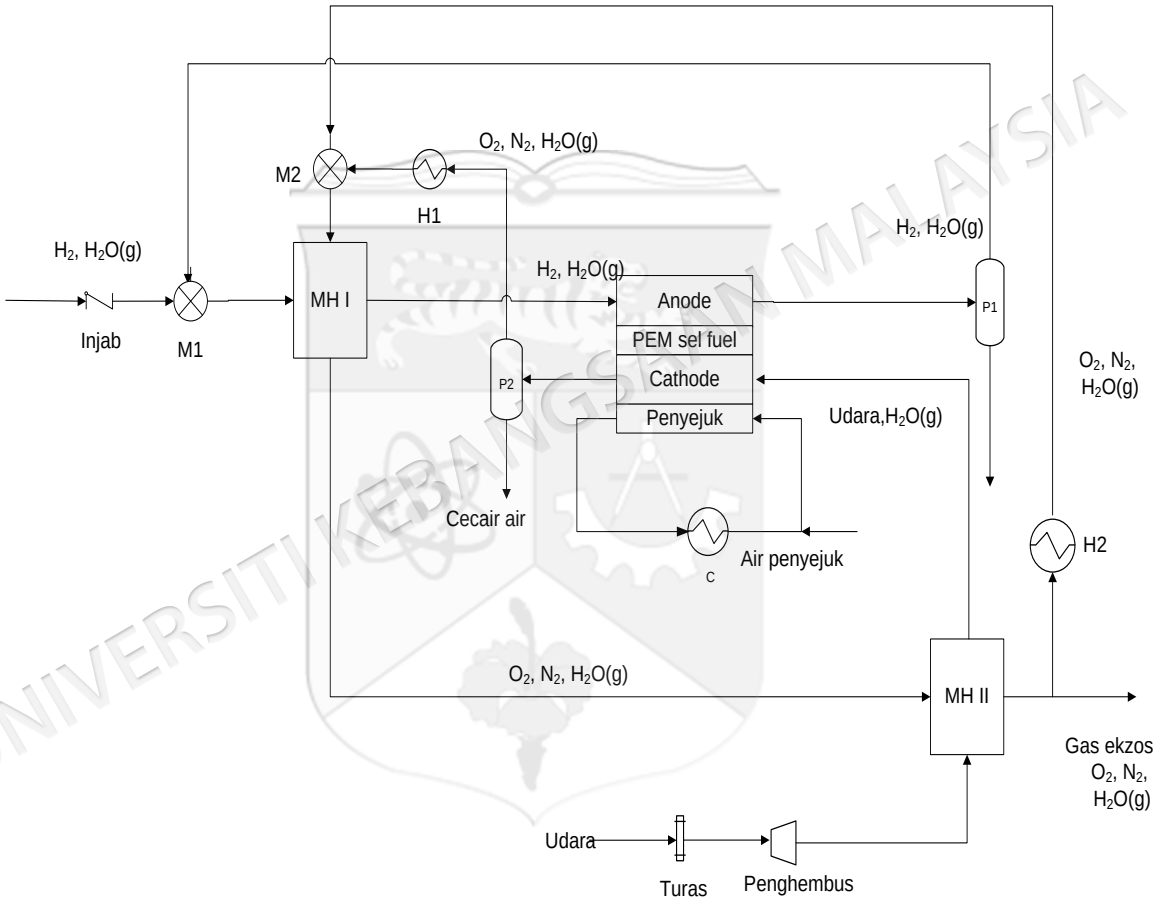
Dilakukan variasi nilai kelembapan relatif terhadap gas hidrogen dan udara yang mengalir masuk ke dalam sistem PEMFC. Nilai kelembapan relatif pada masing gas bahan tindak balas tersebut di bezakan mulai daripada 0 hingga 100%. Kandungan wap air yang berada di dalam gas bahan tindak balas tersebut merupakan jumlah maksimum yang air yang sesuai dengan kelembapan relatif yang telah ditetapkan. Samping daripada itu, suhu masing-masing kondisi operasi PEMFC dibezakan daripada 303 hingga 363 K. Sedangkan nilai tekanan pada masing-masing sisi PEMFC juga dibezakan daripada 1 hingga 3 atm.

Gas-gas bahan tindak balas sebelum di suapkan masuk ke dalam sistem PEMFC dilembapkan terlebih dahulu di pelembap membran untuk mencapai kondisi kelembapan relatif yang diinginkan. Fungsi utama pelembapan membran ialah melembapkan hidrogen dan udara sesuai dengan kelembapan yang diinginkan daripada 0 hingga 100%.

Hidrogen mengandung wap air keluar dari pelembapan membran mengalir masuk ke dalam sisi anod. Di dalam anod berlaku perpindahan wap air pada fenomena EOD iaitu wap air bersama sama proton berpindah melewati membran polimer elektrolit dari sisi anod ke sisi katod. Pada sisi katod mengalir masuk udara yang mengandung wap air. Di dalam katod berlaku tindak balas kimia yang menghasilkan elektrik, haba dan wap air. Jika kepekatan wap air pada sisi katod lebih besar daripada kepekatan wap air di sisi anod maka berlaku resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod.

Hidrogen dan udara yang mengalir masuk ke dalam PEMFC biasanya disuapkan dengan jumlah berlebih. Variasi nisbah stoikiometri terhadap gas hidrogen

dan oksigen dilakukan untuk mengetahui kesannya terhadap prestasi sistem PEMFC yang dihasilkan. Baki hidrogen yang tidak mengalami tindak balas di dalam anod bersama-sama dengan sejumlah wap air yang berasal daripada air yang tidak ikut pada peristiwa EOD dan ditambah wap air dari resapan balik dari katod mengalir keluar bersama sama dari sisi anod. Baki hidrogen dan wap air yang mengalir keluar dari sisi anod digunakan kembali sebagai bahan tindak balas di mana sebelumnya dilembapkan pada unit pelembap membran.



Rajah 3.1 Cadangan rajah skema reka bentuk proses sistem PEMFC

Keterangan:

MH : Pelembapan membran

H : Pemanas

C : Penyejuk

P : Pemisah

M : Pencampuran

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Pada sisi katod PEMFC beberapa komponen yang terdiri daripada oksigen baki yang tidak mengalami tindak balas, nitrogen dan wap air yang berasal daripada air mengalir masuk yang ikut bersama-sama udara ke dalam katod, air hasil tindak balas dan air yang berpindah dari sisi anod ke sisi katod pada EOD akan mengalir keluar bersama sama dari sisi katod. Samping daripada itu, wap air yang ikut bersama udara berfungsi untuk mengikat wap air hasil tindak balas untuk dibawa keluar dari sisi katod. Komponen yang mengalir keluar dari sisi katod diandaikan mempunyai nilai kelembapan relatif maksimum adalah 100%. Baki air pada keadaan kelembapan relatif tersebut adalah berada dalam fasa cecair.

Hidrogen yang tidak mengalami tindak balas di elektrod boleh digunakan lagi dan disuapkan masuk ke dalam sisi anod. Baki hidrogen dan wap air ini bergabung dengan hidrogen suapan dan secara bersama-sama mengalir masuk ke dalam pelembap membran I (MH I). Tujuan dialirkan masuk ke MH I adalah untuk mendapatkan kelembapan relatif yang sesuai dengan yang ditetapkan pada sisi anod. Pelembap membran mempunyai dua sisi iaitu sisi A dan sisi B.

Sisi A yang berfungsi sebagai tempat untuk mengalirkan aliran gas kering yang sejuk (hidrogen) dan sisi B berfungsi untuk mengalirkan gas lembap basah (wap air panas). Sisi A dan sisi B pada pelembap membran dipisahkan oleh membran Nafion yang berfungsi untuk meresapkan air dari sisi B ke sisi A. Unit pelembapan pada reka bentuk proses sistem PEMFC ada dua jenis iaitu pelembapan membran I (MH I) yang berfungsi untuk melembapkan gas hidrogen dan pelembapan membran II (MH II) yang berfungsi untuk melembapkan udara. Pada MH I gas hidrogen yang mengalir masuk pada sisi A dilembapkan oleh wap air yang mengalir masuk pada sisi B MH I. Wap air ini merupakan keluaran daripada sisi katod PEMFC. Hidrogen yang dilembapkan di MH I mengalir keluar dari sisi A sebagai gas hidrogen lembap basah dan panas yang selanjutnya mengalir masuk ke dalam sisi anod. Sedangkan komponen yang terdiri daripada baki wap air bersama dengan oksigen dan nitrogen mengalir keluar daripada sisi B MH I dan selanjutnya mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Wap air yang terdapat pada MH II berfungsi untuk melembapkan udara yang dipersiapkan sebagai suapan bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Baki wap air, oksigen dan nitrogen mengalir keluar dari sisi B MH II. Selanjutnya sebahagian wap air tersebut bergabung dengan wap air keluaran daripada sisi katod untuk melembapkan gas hidrogen pada MH I. Sebelum bergabung, wap air dialirkan ke unit pemisah yang sebanyak 50% gas tersebut mengalir ke masuk ke dalam sisi B MH I dan 50% lainnya adalah merupakan gas ekzos dan dibuang ke persekitaran.

Nilai **s**uhu PEMFC dikawal pada keadaan tetap dengan cara mengalirkan air penyejuk pada sistem PEMFC. Air panas yang keluar dari PEMFC boleh digunakan untuk menaikkan suhu komponen yang mengalir keluar dari sisi anod untuk dialirkan masuk ke dalam sisi B MH I. Samping daripada itu, haba tersebut boleh berguna untuk menaikkan suhu komponen yang keluar dari sisi B MH II untuk dialirkan masuk ke dalam sisi B MH I.

3.4. PENETAPAN ANDAIAN SISTEM

Kajian yang dijalankan menggunakan model matematik satu dimensi bagi menentukan imbangan jisim dan haba. Imbangan jisim digunakan untuk merakum semua mekanisma perpindahan jisim bahan tindak balas dan air di dalam proses sistem EMFC. Imbangan haba digunakan untuk penyepadu haba pada sistem PEMFC. Penggunaan model matematik yang dikembangkan pada kajian ini ialah mengkaji reka bentuk proses sistem PEMFC yang dilakukan secara penyepadu dan linier. Pemodelan matematik yang digunakan menerangkan secara terperinci tentang imbangan air yang berlaku pada sistm PEMF, prestasi sel tuggal PEMFC, pembentukan cecair air pada sistem PEMFC, sistem kawalan air untuk memperoleh kelembapan bahan tindak balas dan penjimatan penggunaan haba sistem. Samping itu, kajian ini mengambil kira semua parameter yang terlibat seperti suhu PEMFC, tekanan operasi, kelembapan relatif, nisbah stoikiometri bahan tindak balas dan sebagainya. Pada penyelidikan ini menggunakan beberapa andaian dalam membangun reka betuk sistem PEMFC, iaitu:

1. Kelembapan relatif (RH) gas bahan tindak balas yang mengalir keluar dari pelembap membran ialah serupa dengan kelembapan relatif bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC.
2. Sistem PEMFC adalah dalam keadaan mantap.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

3. Stek PEMFC adalah keadaan sesuhu.
4. Semua gas bahan tindak balas di dalam sistem sel bahan api PEM ialah gas unggul.
5. Penurunan tekanan di dalam sel boleh diabaikan.
6. Air yang mengalir masuk ke dalam sistem PEMFC berada dalam fasa gas.
7. Suhu bahan tindak balas yang mengalir keluar daripada pelembap membran luaran sama dengan suhu bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC.
8. Pemodelan matematik yang melibatkan persamaan linier pada keadaan mantap dengan menggunakan perisian Simulink Maltab.

3.5 PEMODELAN MATEMATIK

Pemodelan matematik yang diterbitkan berguna untuk membantu meramalkan kajian-kajian yang ingin dicapai dalam pengembangan reka bentuk proses sistem PEMFC. Terdapat beberapa bahagian pemodelan matematik yang meliputi: Imbangan jisim air pada reka bentuk PEMFC, prestasi sel tunggal PEMFC, kawalan kandungan air bahan tindak balas dan penjimatan penggunaan haba pada proses sistem PEMFC.

a. Imbangan jisim air

Persamaan yang dikembangkan untuk pemodelan kajian imbangan jisim air pada sistem PEMFC terbabit berasakan penurunan imbangan jisim. Imbangan jisim pada reka bentuk proses PEMFC digunakan untuk menyokong penyelesaian model matematik yang diterbitkan dan meramalkan tentang fenomena wap air PEMFC. Fenomena tersebut meliputi:

- Jumlah air yang mengalir masuk kedalam PEMFC bersama sama dengan hidrogen dan udara yang mengalir masuk kedalam PEMFC.
- Jumlah kandungan air pada peristiwa EOD air yang berlaku di dalam anod iaitu wap air bersama dengan proton berpindah melewati membran dari sisi anod ke sisi katod.
- Jumlah air yang meresap daripada sisi katod ke sisi anod.
- Jumlah kandungan wap air yang mengalir keluar bersama sama baki bahan tindak balas daripada PEMFC.
- Pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan katod PEMFC.
- Kawalan kandungan air pada PEMFC menggunakan pelembapan membran

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

b. Prestasi sel tunggal PEMFC.

Pada unit ini, pemodelan matematik yang bertujuan untuk memperoleh prestasi sel tunggal PEMFC iaitu berupa nilai ketumpatan arus dan voltan yang diperoleh oleh kajian ini. Pembangunan model matematik meliputi beberapa unit yang meliputi:

- Pemodelan mengenai nilai voltan yang boleh balik
- Pemodelan mengenai kehilangan nilai voltan yang diakibtkan oleh pengaktifan, ohm dan kepekatan.

c. Penjimatan penggunaan haba pada reka bentuk proses sistem PEMFC

Pemodelan yang dibangun untuk memperoleh penggunaan haba minimum berasaskan kepada imbangan jisim dan haba pada proses sistem PEMFC. meliputi:

- Kecekapan haba sistem PEMC. Membangun pemodelan imbangaan haba dengan menggunakan imbangan jisim sebagai asas.
- Analisis penyepaduan haba pada reka bentuk system PEMFC menggunakan teknik jepitan. Tahapan ini meliputi pembangunan pemodelan matematik yang berhubungan dengan ekstrak data guna membuat lengkung komposit .
- Perhitungan tentang nilai peralatan yang melibatkan rangkaian penukar haba yang diperoleh .

Semua tahapan pemodelan matematik yang terdapat pada reka bentuk proses sistem PEMFC yang dilakukan kajian ini secara terperinci dijelaskan masing-masing pada Bab IV, V, VI,VII dan VIII.

3.6 ALGORITMA PENYELESAIAN MODEL

Penyelesaian model matematik yang telah dibangun dilakukan dengan mengikuti unit proses pada sistem PEMFC. Pemodelan matematik yang telah diterbitkan boleh menjelaskan tentang imbangan jisim air, prestasi sel tunggal dan penjimatan penggunaan haba proses sistem PEMFC. Pengembangan pemodelan matematik

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

tersebut bermula daripada membangun pemodelan tentang imbangan jisim dan haba yang dipergunakan untuk penyelesaian pemodelan matematik PEMFC .

Tahapan pertama dalam pembangunan simulasi sistem PEMFC ialah menggunakan model imbangan jisim untuk kajian imbangan jisim air. Terdapat beberapa parameter yang terlibat di dalam penerbitan model imbangan jisim airi iaitu - kelembapan relatif hidrogen dan udara dikaji dalam julat 0 hingga 100%, suhu PEMFC divariasikan daripada 303 K hingga 373 K, tekanan operasi di anod dan katod 1 atm, nisbah stoikiometri ialah 1.4 untuk hidrogen dan 2 untuk oksigen, dan ketumpatan arus ialah 5 A cm^{-2}. Tahapan kajian ini, parameter penyokong imbangan jisim tersebut berguna untuk menentukan nilai kandungan wap air yang berlaku pada fenomena yang berlaku didalam sistem PEMFC. Kajian tentang jisim wap air air di dalam jisim bahan tindak balas dilakukan dengan membuat variasi nilai kelembapan relatif dan suhu terhadap pemodelan bahan tindak balas masuk stek PEMFC. Tekanan total pada tahapan ini iaitu 1 atm, sedangkan tekanan wap jenuh nilainya sesuai dengan nilai suhu yang divariasikan. Kandungan wap air dalam bahan tindak balas ini mempengaruhi nilai wap air pada EOD dan resapan balik. Pada tahapan ini dilakukan variasi nilai kelembapan relatif di anod (RHA) dan di katod (RHK) dalam julat 0 hingga 100%. Kandungan wap air pada resapan balik juga dipengaruhi oleh nilai pekali perpindaha jisim kelembapan wap air (k_g). Nilai pekali ini berasal daripada kajian (Hassan et al. 2009). Kandungan wap air di bahan tindak balas, EOD dan resapan balik digunakan untuk menentukan jumlah wap air dan cecair air yang keluar daripada stek PEMFC. .Jumlah wap air yang terbentuk terhad pada nilai kelembapan relatif.

Nilai maksimum kelembapan relatif keluar stek PEMFC di andaikan 100%, sedangkan diatas kelembapan ini baki air ialah merupakan cecair air. Tahapana ini juga dilakukan variariasi RHA, RHK dan suhu PEMFC masing-masing di anod dan katod. Tekanan operasi, nisbah stoikiometri dan ketumpatan arus adalah tetap. Pemodelan juga mengkaji jumlah pembentukan cecair air yang mengalir keluar daripada anod dan katod pada nilai ketumpatan arus yang berbeza. Nilai ketumpatan arus divariasikan daripada 0.1 hingga 0.9 A cm^{-2} dengan tekanan dan nisbah stoikiometri bahan tindak bals adalah tetap.

Disamping itu, pemodelan jisim air sistem juga digunakan untuk menentukan kawalan jumlah air pada pelembapan luaran jenis membran. Kandungan air pada pelembap membran tersebut berpunca daripada keluaran dan mengalir masuk stek PEMFC. Parameter yang digunakan sama dengan parameter yang berlaku pada stek PEMFC. Pekali resapan air pada pelembap membran berbeza dengan stek PEMFC. Pekali resapan air pada pelembapan membran (D_w) berdasarkan kajian (Del Real et al 2007; Chen et al 2008; Gao et al 2008). Kandungan wap air yang mengalir keluar daripada stek MH II sebanyak 50% dikitar semula ke dalam MH I dan 50% di buang ke pesekitaran. Samping itu, reka bentuk luas pelembap membran berbanding luas stek PEMFC yang dibuat pada nisbah 1:1, 1.5 :1 dan 2 :1. Kajian tentang kawalan jisim air ini mengetahui penggunaan parameter operasi terhadap jumah wap air yang mengalir masuk dan keluar pelembap membran, resapan wap air, jumlah sel pelembap membran yang diperlukan, dan mengetahui keadaan operasi sistem dimana wap air yang mengalir keluar MH II mencukupi dikitar semula untuk melembapkan bahan tindak balas.

Tahap kedua membangun simulasi untuk mengetahui prestasi sel tunggal sistem PEMFC. Penentuan prestasi PEMFC ditunjukkan oleh nilai voltan, ketumpatan arus dan ketumpatan tenaga yang dihasilkan. Simulasi pada unit ini juga dilakukan terhadap variasi parameter RHA dan RHK dalam julat 0 hingga 100%, suhu PEMFC dalam julat 303 K hingga 363 K, tekanan operasi di anod (PA) dan di katod (PK) dalam julat 1 hingga 2.5 atm, nisbah stoikiometri hidrogen dalam julat 1.2 hingga 1.8 dan oksigen dalam julat 1 hingga 3 atm, dan jisim pemangkin iaitu 0.2 hingga 1 mg cm^{-2}. Prestasi sel tunggal PEMFC dipengaruhi oleh kehilangan nilai voltan yang disebabkan kerana pengaktifan, ohm dan kepekatan. Pemodelan kehilangan nilai voltan akibat pengaktifan menggunakan nilai perubahan ketumpatan arus yang nilainya 10^{-2} hingga 10^{-8} A. Tebal membran nafion yang digunakan adalah 0.0005 cm.dan beban pemangkin yang digunakan 0.0002 g cm^{-2}. Pengujian prestasi sel tunggal PEMFC dilakukan dengan melihat perubahan ketumpatan arus daripada 0 hingga 1.6 A cm^{-2} pada berbagai variasi parameter terhadap nilai voltan dan ketumpatan kuasa yang dihasilkan. Samping itu, juga dikaji hubungan prestasi sel tunggal yang dihasilkan terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar daripada anod dan katod PEMFC. Tahapan ini juga dilakukan variasi parameter

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

kelembapan relatif dan suhu PEMFC. Sedangkan tekanan dan nisbah stoikiometri dijaga tetap.

Tahap ketiga mengenai pemodelan penyimatan penggunaan haba reka bentuk proses sistem PEMFC. Pada tahapan ini, pemodelan imbangan jisim digunakan untuk menghitung imbangan haba sistem PEMFC. Terdapat tiga kajian pada bahagian ini, iaitu; kecekapan haba sistem PEMFC yang dihasilkan, analisis jepitan dan anggaran kos alat penukar haba. Terdapat beberapa kondisi yang digunakan iaitu kondisi 1 menggunaka RHA 70% dan RHK 90%, kondisi 2 iaitu RHA 50% dan RHK 90%, kondisi 3 iaitu RHA 50% dan RHK 70%, kondisi 4 iaitu RHA dan RHK 50%. Nilai ketumpatan arus menggunakan nilai pada prestasi maksimum iaitu 1.18 A cm^{-2}. Simulasi pemodelan tentang kecekapan iaitu mengetahui hubungan suhu PEMFC terhadap kecekapan haba yang dihasilkan oleh sistem PEMFC.

Tahapan simulasi analisis penjimatan haba menggunakan suhu PEMFC sebesar 363 K untuk keadaan 1 hingga 4. Samping itu, keadaan 1 juga menggunakan suhu PEMFC sebesar 353 K. Menetapkan suhu yang mengalir masuk dan keluar unit penyokong seperti pemanas dan pelembap membran. pada masing- masing kondisi. Parameter sistem reka bentuk tersebut digunakan untuk mnghitung nilai kadar alirjisim dan beban haba alir. Data data tersebut berguna untuk analisis jepitan, lengkung komposit besar dan rangkaian penukar haba dengan andaian selisih suhu sebesar 10^{o}C. Analisis jepitan menggambarkan suhu jepitan yang diperoleh dan nilai suhu penyejuk dan pemanas minimum. Lengkung komposit menggambarkan hubungan nilai entalpi sistem terhadap nilai suhu.sistem . Sedangkan rangkaian penukar haba menunjukan gambaran mengenai aliran pemanas dan penyejuk terhadap besaran suhu yang berada diatas dan dibawah suhu jepitan. Rangkaian ini berguna untuk menentukan jumlah penukar haba yang diperlukan pada reka bentuk proses sistem PEMFC.

Anggaran kos alat penukar haba digunakan mengkira besar anggaran kos penukar haba yang diperlukan pada reka bentuk sistem PEMFC yang dilakukan setelah melakukan analisis penyepaduan penjimatan haba tiap luas area pada tahun 2013.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Anggaran kos ini berdasarkan perbezaan saiz peralatan degan mempertimbangkan perubahan nilai inflasi.

3.7 PENYELESAIAN MODEL

Penyelesaian pemodelan matematik yang telah dibangun pada reka bentuk sistem PEMFC dilakukan dengan mengunakan perisian SimulinkMatlab. Perisian ini berguna untuk menjalankan persamaan persamaan yang dalam bentuk blok – blok simulasi. Penyelesaian dapat dilakukan secara penyepadu untuk keseluruhan proses system PEMFC. Khas untuk pemulihan haba, analisis jepitan dilakukan dengan menggunkan perisian teknik jepitan atas talian yang dibuat oleh Jeffrey S. Umbach.

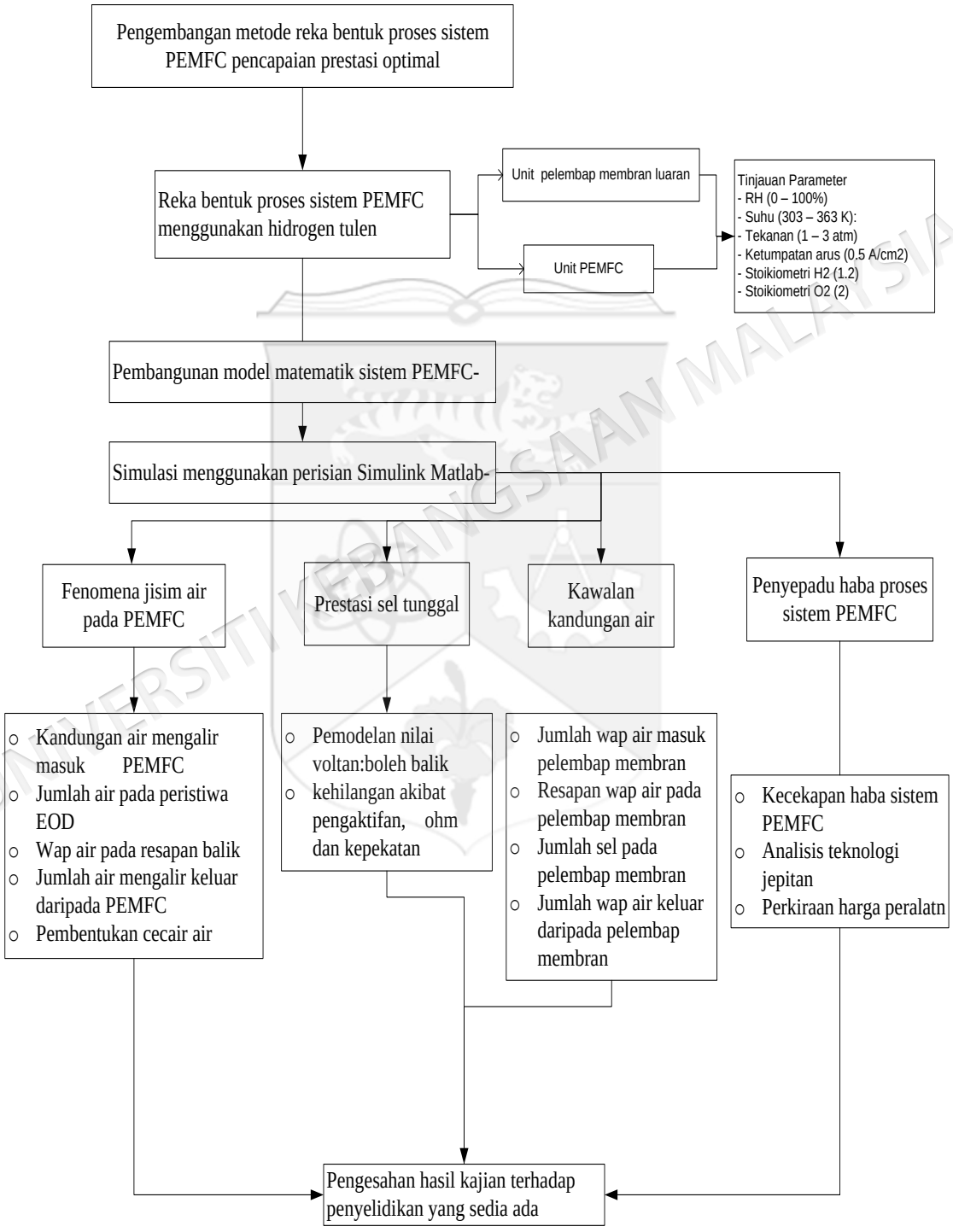
3.8. PENGESAHAN MODEL TERHADAP HASIL PENYELIDIKAN YANG SEDIA ADA.

Kajian yang diperoleh terhadap beberapa objektif kajian menggunakan perisian Simulink Matlab dilakukan pengesahan dengan membandingkan terhadap kajian penyelidikan yang sedia ada. Perbandingan ini meliputi: imbangan jisim iaitu penyelidikan Cai et al (2006) tentang hubungan kelembapan relatif di katod terhadap total air di dalam wap air, Yan et al (2005) iaitu tentang hubungan ketumpatan arus terhadap jumlah wap air yang meresap dari sisi katod ke anod, Bonnet et al (2008) iaitu tentang hubungan nilai stoikiometri udara terhadap cecair air di sebelah katod, Dai et.al (2008) iaitu tentang hubungan kadar alir udara terhadap jumlah air dalam udara sebelah katod. Perbandingan ini diterangkan pada Bab IV.

Selanjutnya prestasi sel tunggal PEMFC terdiri daripada: penyelidikan . Haji (2011) dan Kunusch et al (2010) iaitu tentang hubungan nilai ketumpatan arus terhadap nilai voltan yang dihasilkan. Hal ini dijelaskan pada Bab V. Tentang pembentukan cecair air terdiri daripada penyelidikan Cai et al(2006) tentang hubungan nilai ketumpatan arus terhadap jisim air, peyelidikan Karnik et al (2006) tentang hubungan ketumpatan arus terhadap jumlah cecair air di katod. Hal ini dijelaskan pada Bab VI. Tentang kawalan kandungan air menggunakan pelembap membran terdiri daripada penyelidikan Park et al (2008) dan Sabharwal et al (2008) iaitu tentang hubungan kadar alir udara kering masuk pelembap membran terhadap

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

resapan wap air. Hal ini dijelaskan pada Bab VII. Terakhir mengenai penyepadu haba pada Bab VII, iaitu membandingkan hasil yang diperoleh terhadap penyelidikan yang dilakukan oleh Cao & Guo (2002), Hwang et al.(2010) dan Neto et al. (2013). Sebagai carta alir kaedah reka bentuk proses sistem PEMFC ditunjukan oleh Rajah 3.2.



Rajah 3.2 Carta alir kaedah reka bentuk proses sistem PEMFC

BAB IV

KESEIMBANGAN AIR PADA REKA BENTUK SISTEM PEMFC

4.1 PENGENALAN

Reka bentuk sistem PEMFC masih terus dikembangkan dan diperbaiki untuk mencapai prestasi dan kecekapan optimum. Komponen utama sistem PEMFC ialah stek sel fuel. Prestasi optimum sistem PEMFC salah satunya bergantung daripada operasi stek sel fuel. Masalah penting dalam operasi PEMFC ialah pengurusan air di dalam stek sel fuel (Hassan et al. 2009). Imbangan jisim air diperlukan untuk mencapai prestasi PEMFC yang optimum. Imbangan jisim air berguna untuk memastikan bahawa membran PEMFC selalu mengandung air dan mencegah berlakunya kebanjiran pada sisi katod (Baschuk & Li 2000; Chang et al. 2002; BiyIkoglu 2005) .

Prestasi PEMFC boleh dinyatakan sebagai voltan, ketumpatan kuasa dan kecekapan. Nilai-nilai tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor: seperti bahan-bahan penyusun , keadaan operasi dan reka bentuk sistem. PEMFC sebagai pusat sistem operasi disokong oleh beberapa aspek seperti bekalan oksida dan bahan api, pengurusan haba, pengurusan air dan sistem kawalan operasi. Penyelidikan ini di fokuskan terhadap analisis keseimbangan air di dalam sistem PEMFC yang menggunakan pelembapan luaran jenis membran sebagai kawalan kelembapan. Kesan pengangkutan air di dalam sistem PEMFC dihitung dengan menggunakan simulasi berdasarkan pada pengembangan model matematik. Kajian penyelidikan ini melaporkan kesan pelbagai faktor keseimbangan air di dalam PEMFC, yang parameternya terdiri daripada kadar aliran bahan tindak balas kelembapan, suhu

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

operasi, fenomena EOD, resapan wap air dari sisi katod ke sisi anod dan pembentukan cecair air pada sisi anod dan katod PEMFC.

4.2 KESEIMBANGAN AIR SISTEM PEMFC

Pengurusan air di dalam PEMFC merupakan hal yang sangat penting untuk mencapai prestasi yang baik. Sistem PEMFC mesti beroperasi pada keadaan air yang terhasil didalam stek tidak boleh berada pada penyejatan yang lebih cepat untuk menjaga agar membran tidak berada dalam keadaaan kekeringan. Kerana itu suhu sistem PEMFC amnya tidak boleh lebih daripada 100^0C. Imbangan jisim air di dalam sistem PEMFC mesti diketahui secara tepat, ini boleh dilakukan dengan mengawal dengan baik keberadaan air di dalam PEMFC. Buruknya pengurusan kandungan air dalam sistem PEMFC boleh menyebabkan kandungan air yang rendah. Rendahnya kandungan air di membran menyebabkan membran menjadi kering dan retak. Sebaliknya, kandungan air yang tinggi di dalam PEMFC menyebabkan terjadinya pembentukan air cecair dan berlakunya banjir pada sisi katod (Guvelioglu & Stenger 2007; Falcão et al. 2009). Keberadaan air dalam PEMFC memberikan kesan baik dan juga buruk. Air berguna untuk meningkatkan sifat kekonduktivitian ion pada membran, akan tetapi air juga boleh menghambat aliran gas bahan tindak balas menuju permukaan pemangkin untuk melakukan tindak balas (Stumper et al. 2005; Liu et al. 2006; Liu et al. 2006). Kandungan air pada membran PEMFC ditentukan oleh jumlah air yang dihasilkan oleh tindak balas kimia, air yang mengalir bersama-sama proton melewati membran dari sisi anod ke sisi katod pada fenomena EOD, resapan air dari sisi katod ke sisi anod dan resapan air ke atau dari oksida atau bahan api (Kraytsberg & Ein-Eli 2006; Yan et al. 2006).

Keseimbangan air di dalam sistem PEMFC boleh dicapai dengan menggunakan pelembapan luaran untuk melembapkan bahan tindak balas sebelum masuk ke dalam PEMFC. Pelembapan luaran merupakan alternatif pengganti pelembapan dalaman yang terdapat pada proses sistem PEMFC. Pelembapan luaran beroperasi sesuai dengan keadaan operasi yang ditetapkan dan boleh mengawal tingkat kelembapan bahan tindak balas yang masuk dan keluar dari sisi anod dan katod (Yan et al. 2006; Zhou et al. 2006). Kelembapan gas bahan tindak balas yang

mengalir masuk ke dalam PEMFC bergantung kepada suhu dan tekanan operasi PEMFC (Janssen & Overvelde 2001; Liu et al. 2007; Park & Caton 2008; Lee et al. 2009). Sun et al. (2007) menggunakan pelembap dalaman pada sistem PEMFC untuk menyiasat pengaruh kelembapan, perbezaan suhu di antara sisi anod dan katod, dan medan aliran *serpentine* terhadap ketumpatan arus tempatan PEMFC. Hasil kajian penyelidikan ini menunjukkan terjadi perbezaan ketumpatan arus ketika suhu kelembapan terlalu tinggi atau terlalu rendah. Selain daripada itu, kelembapan membran dipengaruhi oleh kadar aliran gas, kawasan membran, dan jenis membran (Sridhar et al. 2001). Pelembapan juga menjejaskan keupayaan tindak balas pemangkin untuk mengurangkan oksida (Bi et al. 2009). Apabila kandungan air terlalu tinggi dalam sistem PEMFC maka berlaku fenomena kebanjiran sehingga boleh menurunkan prestasi sistem PEMFC (Liu et al. 2007; Owejan et al. 2009).

4.3 REKA BENTUK PENYELIDIKAN

Penyelidikan ini bertujuan untuk menentukan imbangan jisim air yang berlaku pada sistem PEMFC, dengan mengetahui fenomena perpindahan air yang terdapat pada sistem. PEMFC terdiri daripada dua bahagian iaitu bahagian anod dan katod. Sisi anod terdapat saluran bahan tindak balas yang berfungsi untuk mengalirkan gas hidrogen ke permukaan lapisan pemangkin serta mengeluarkan baki hidrogen dan wap air keluar dari PEMFC. Pada sisi katod terdapat saluran gas bahan tindak balas yang berfungsi untuk mengalirkan udara atau oksigen ke permukaan lapisan pemangkin, serta mengeluarkan baki oksigen, nitrogen dan air. Sisi anod dan katod dipisahkan oleh membran polimer elektrolit. Himpunan elektrolit membran (MEA) yang terdapat pada PEMFC terdiri daripada membran, lapisan penyerapan gas dan lapisan pemangkin. Di dalam PEMFC berlaku dua fenomena yang berkaitan dengan pengangkutan air. Pertama ialah berlakunya fenomena EOD iaitu proton berpindah bersama-sama wap air melewati membran dari sisi anod ke sisi katod. Kedua ialah berlakunya resapan wap air dari sisi katod ke sisi anod disebabkan oleh perbezaan kepekatan wap air pada kedua sisi PEMFC tersebut.

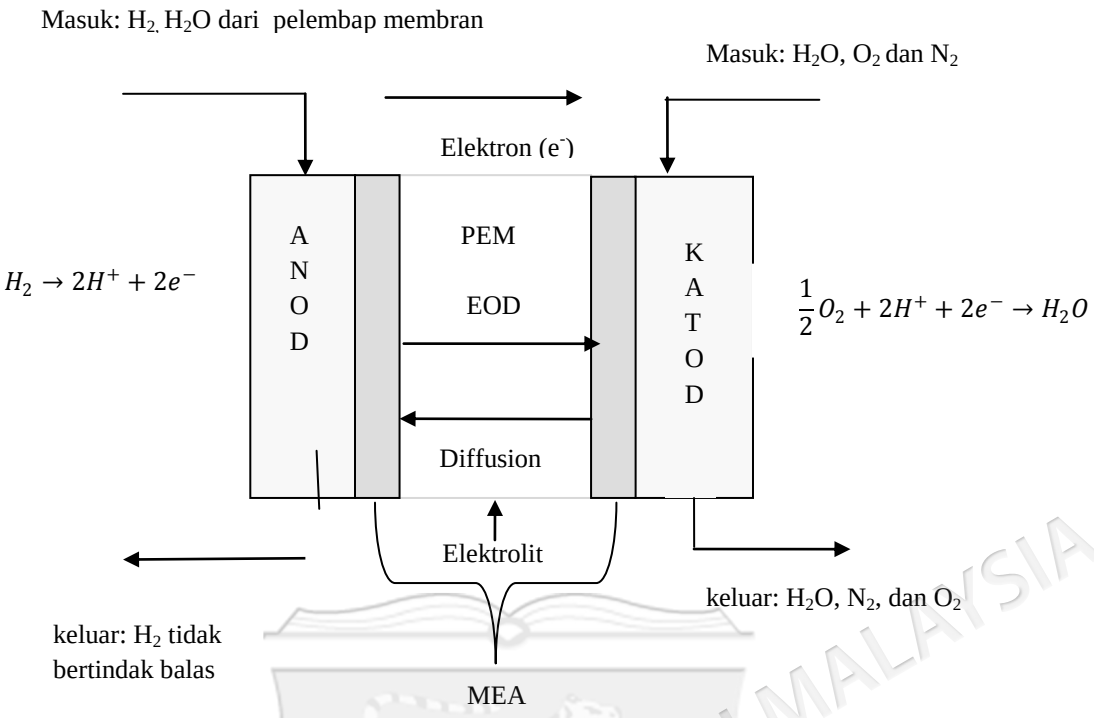
Tujuan utama kajian ini ialah mengetahui kesan beberapa parameter operasi terhadap imbangan air yang berlaku di dalam sistem PEMFC. Parameter operasi

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

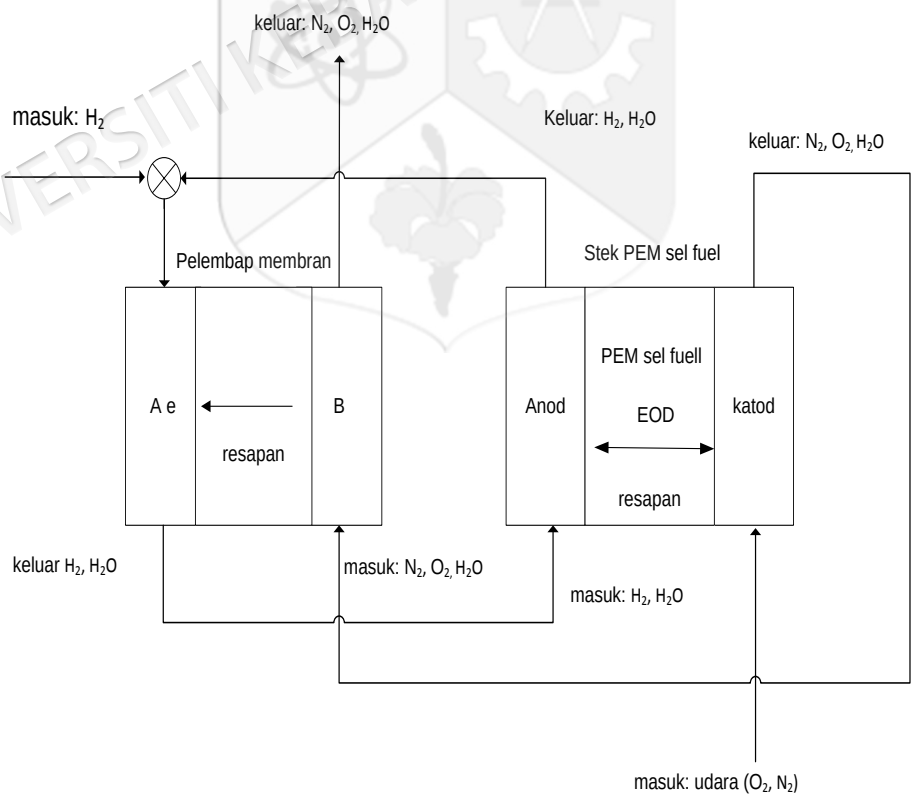
tersebut terdiri daripada kelembapan relatif, suhu operasi dan kepekatan bahan tindak balas. Analisis mengenai imbangan air difokuskan terhadap fenomena pengangkutan air yang berlaku di dalam PEMFC. Rajah 4.1 menunjukkan gambar rajah skema sistem PEMFC. Rajah ini juga menunjukkan fenomena EOD, resapan wap air dari sisi katod ke sisi anod, dan pengeluaran produk sampingan air pada sisi katod sel fuel. Analisis keseimbangan air yang dilakukan pada sistem PEMFC untuk mendapatkan keadaan operasi yang sesuai. Selain daripada itu, juga dilakukan analisis untuk menentukan keadaan awal bahagi pembentukan cecair air terhadap komponen yang mengalir keluar dari sisi anod dan katod.

Reka bentuk proses sistem PEMFC mempunyai dua unit utama iaitu pelembap luaran dan PEMFC, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.2. Pelembap membran merupakan satu unit yang berguna untuk mengawal kelembapan bahan tindak balas sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC. Baki hidrogen yang tidak bertindak balas selanjutnya dikitarsemula dengan terlebih dahulu dialirkan ke dalam pelembap membran. Pelembap ini berguna untuk memperoleh kelembapan hidrogen yang sesuai untuk dialirkan masuk ke dalam sisi anod. Wap air yang terdapat di dalam sisi katod mengalir keluar dan digunakan untuk melembapkan hidrogen pada unit pelembap membran.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 4.1 Gambar rajah skema PEMFC



Rajah 4.2 Reka bentuk proses sistem PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

4.4 MODEL MATEMATIK

Bahagian ini menerangkan model matematik terhadap kajian reka bentuk sistem PEMFC. Analisis keseimbangan jisim di dalam sistem berguna untuk memperoleh model keseimbangan air di dalam sistem PEMFC.

Tindak balas yang terjadi di dalam sistem PEMFC ialah:

Anod: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ (4-1)

Katod: $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ (4-2)

Keseluruhan: $H_{2(gas)} + 1/2\ O_{2(gas)} \rightarrow H_2O$ + haba + arus elektrik (4-3)

4.4.1 Komponen yang Mengalir Masuk ke Dalam PEMFC

Kepekatan hidrogen $\mathcal{N}_{H2}$ yang dibekalkan masuk ke dalam anod sel fuel ialah:

$$\mathcal{N}_{H2} = \frac{I}{2F} \quad (4\text{-}4)$$

F = pemalar faraday, 96485 C/mol elektron
I = ketumpatan arus (A cm^{-2})

Stoikiometri hidrogen $\mathcal{S}_{H_2}$ pada aliran masuk anod yang di perlukan untuk bekalan ialah:

$$\mathcal{S}_{H_2} = \frac{\mathcal{N}_{H_2 bekalan}}{\mathcal{N}_{H_2}} \quad (4\text{-}5)$$

Atau:

$$\mathcal{N}_{H_2} = \frac{\mathcal{N}_{H_2 bekalan}}{S_{H_2}} \quad (4\text{-}6)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$\frac{\mathcal{N}_{H_2 bekalan}}{\mathcal{S}_{H_2}} = \frac{I}{2F} \tag{4-7}$$

$$\mathcal{N}_{H_2} = \mathcal{S}_{H_2} \frac{I}{2F} \tag{4-8}$$

Kepekatan hidrogen yang mengalir masuk ke dalam anod sel fuel ialah jumlah hidrogen yang diperlukan didarab dengan nilai nisbah stoikiometri dan jumlah sel pada stek PEMFC.

$$\mathcal{N}_{H_2\ masuk} = \mathcal{N}_{H_2}.\ \mathcal{S}_{H_2}.n_{cell} \tag{4-9}$$

$$\mathcal{N}_{H_2 masuk} = \frac{\mathrm{I}}{2F}\ \mathcal{S}_{H_2}.n_{cell} \tag{4-10}$$

n_{cell} adalah jumlah sel
Atau:

$$\frac{m_{H_2\ masuk}}{M_r H_2} = \frac{I}{2F}\mathcal{S}_{H_2}.n_{cell} \tag{4-11}$$

Kadar gas oksigen yang mengalir masuk ke dalam sel adalah berdasarkan perbandingan stoikiometri tindak balas pada persamaan (4-3), maka kepekatan oksigen $\mathcal{N}_{O_2}$ yang mengalir masuk ke dalam sisi katod ialah:

$$\mathcal{N}_{O_2\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{o_2}.n_{cell} \tag{4-12}$$

Dimana :

$$\mathcal{N}_{O_2} = \frac{I}{4F}$$

Nilai stoikiometri ialah:

$$\mathcal{S}_{O_2} = \frac{\mathcal{N}_{\mathrm{O}_{2\ \mathrm{bekalan}}}}{\mathcal{N}_{\mathrm{O}_2}}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Bahagian oksigen berlebih ε ialah:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{N}_{O_2\ \text{supply}} - \mathcal{N}_{O_2}}{\mathcal{N}_{O_2}}$$

$$\varepsilon = \mathcal{S}_{O_2} - 1 \tag{4-13}$$

Persamaan (4-13) dimasukkan ke persamaan (4-12) maka kepekatan oksigen $\mathcal{N}_{O_2 masuk}$ yang mengalir masuk katod adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{N}_{O_2 masuk} = \mathcal{S}_{O_2} \frac{I}{4F} n_{cell} \tag{4-14}$$

Persamaan (4-14) boleh dikembangkan lagi menjadi:

$$\mathcal{N}_{O_2 masuk} = \mathcal{S}_{O_2} \mathcal{N}_{O_2} n_{cell}$$

Atau:

$$m_{O_2 masuk} = \frac{M_r O_2 . \mathcal{S}_{O_2} . n_{cell}}{4F} \tag{4-15}$$

M_r = molekul relatif

Kepekatan udara yang mengalir masuk katod $\mathcal{N}_{udara\ masuk}$ ialah:

$$\mathcal{N}_{udara\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2} . \mathcal{N}_{O_2} . n_{cell} . \frac{peca\ han\ mol\ udara}{peca\ han\ mol\ O_2} \tag{4-16}$$

$$= \mathcal{S}_{O_2} . \mathcal{N}_{udara} . n_{cell} . \frac{\frac{mol\ udara}{(mol\ O_2 + mol\ N_2)}}{\frac{mol\ O_2}{(mol\ O_2 + mol\ N_2)}} . \tag{4-17}$$

$$= \mathcal{S}_{O_2} . \mathcal{N}_{udara} . n_{cell} . \frac{1}{\frac{mol\ O_2}{(mol\ O_2 + mol\ N_2)}} \tag{4-18}$$

$$\mathcal{N}_{udara\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2} . \mathcal{N}_{udara} . n_{cell} . \frac{1}{X mol\ O_2} \tag{4-19}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$XmolO_2$ = pecahan mol oksigen

$$\mathcal{N}_{udara\ \ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1}{XO_2} \tag{4-20}$$

$$m_{udara\ \ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.M_r udara.\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1}{XmolO_2} \tag{4-21}$$

Kepekatan nitrogen $\mathcal{N}_{N_2\ masuk}$ yang mengalir masuk ke dalam katod PEMFC ialah:

$$\mathcal{N}_{N_2\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{peca\,han\ mol\ N_2}{peca\,han\ mol\ O_2} \tag{4-22}$$

$$= \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{\frac{mol\ N_2}{(mol\ N_2+mol\ O_2)}}{\frac{mol\ O_2}{(mol\ N_2+mol\ O_2)}} \tag{4-23}$$

$$= \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{\frac{mol\ N_2+mol\ O_2-mol\ O_2}{(mol\ N_2+mol\ O_2)}}{\frac{mol\ O_2}{(mol\ N_2+mol\ O_2)}} \tag{4-24}$$

$$= \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-\frac{mol\ O_2}{(mol\ N_2+mol\ O_2)}}{\frac{mol\ O_2}{(mol\ N_2+mol\ O_2)}} \tag{4-25}$$

$$\mathcal{N}_{N_2\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-Xmol\ O_2}{XmolO_2} \tag{4-26}$$

$$\mathcal{N}_{N_2\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1-XmolO_2}{Xmol\ O_2} \tag{4-27}$$

Atau:

$$m_{N_2\ masuk} = \mathcal{S}_{O_2}.M_r N_2\,\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1-Xmol\ O_2}{XmolO_2} \tag{4-28}$$

$m_{N_2\ masuk}$ = jumlah jisim nitrogen

4.4.2 Komponen Tindak Balas Pada PEMFC

Komponen tindak balas di dalam PEMFC ialah hidrogen dan oksigen. Jika χH_2 adalah merupakan penukar tindak balas hidrogen, maka kepekatan hidrogen yang bertindak balas di dalam PEMFC ialah:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$\mathcal{N}_{H_2\ bertindak\ \ balas} = \chi H_2 . \frac{I}{2F} . n_{cell} \quad (4\text{-}29)$$

$$m_{H_2 bertindak\ \ balas} = \chi H_2 . M_r H_2 \frac{I}{2F} . n_{cell} \quad (4\text{-}30)$$

Kepekatan hidrogen yang tidak bertindak balas ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2\ tidak\ \ bertindak\ \ balas} = \left(\mathcal{S}_{H_2} . \frac{I}{2F} . n_{cell}\right) - \left(\chi H_2 . \frac{I}{2F} . n_{cell}\right) \quad (4\text{-}31)$$

$$\mathcal{N}_{H_2\ tidak\ \ bertindak\ \ balas} = \left(\frac{I}{2F} . n_{cell}\right)\left(\mathcal{S}_{H_2} - \chi H_2\right) \quad (4\text{-}32)$$

$$\mathcal{N}_{H_2\ tidak\ \ bertindak\ \ balas} = \left(\frac{I}{2F} . n_{cell}\right)\left(\mathcal{S}_{H_2} - \chi H_2\right)$$

Penukar tindak balas hidrogen ialah jumlah mol hidrogen yang diperlukan berbanding jumlah mol hidrogen yang di bekalkan ke sel fuel.

$$\chi H_2 = \frac{\frac{I}{2F} . n_{cell}}{\mathcal{S}_{H_2} . \frac{I}{2F} . n_{cell}} \quad (4\text{-}33)$$

$$\chi H_2 = \frac{1}{\mathcal{S}_{H_2}} \quad (4\text{-}34)$$

Kepekatan hidrogen yang tidak bertindak balas ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2\ tidak\ \ bertindak\ \ balas} = \left(\frac{I}{2F} . n_{cell}\right)\left(\mathcal{S}_{H_2} - \frac{1}{\mathcal{S}_{H_2}}\right) \quad (4\text{-}35)$$

$$\mathcal{N}_{H_2\ tidak\ \ bertindak\ \ balas} = \mathcal{N}_{H_2}\, n_{cell}\left(\mathcal{S}_{H_2} - \frac{1}{\mathcal{S}_{H_2}}\right) \quad (4\text{-}36)$$

Atau:

$$m_{H_2\ tidak\ \ bertindak\ \ balas} = M_r H_2 \frac{I}{2F} . n_{cell}\left(\mathcal{S}_{H_2} - \frac{1}{\mathcal{S}_{H_2}}\right) \quad (4\text{-}38)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Komponen oksigen yang tidak bertindak balas ialah jumlah mol oksigen yang di bekal ke dalam PEMFC dikurangi dengan mol oksigen yang bertindak balas.

Jika $N_{O_2} = \frac{1}{2} N_{H_2}$

Maka:

$$\mathcal{N}_{O_2\ tidak\ \ bertindak\ \ \ balas} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} - \left(\frac{1}{2}\chi H_2 \mathcal{N}_{H_2}.n_{cell}\right) \quad (4\text{-}39)$$

$$\mathcal{N}_{O_2\ tidak\ \ bertindak\ \ \ balas} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} - \left(\frac{\mathcal{N}_{H_2}.n_{cell}}{2\mathcal{S}_{H_2}}\right)$$

Mol air yang terbentuk sebanding dengan mol hidrogen yang bertindak balas, maka kepekatan air yang terbentuk dari hasil tindak balas ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ terbentuk} = \chi H_2.\frac{\mathcal{S}_{H_2}.I}{2F}.\eta_{cell} \quad (4\text{-}40)$$

$$\mathcal{N}_{H_2O\ terbentuk} = \frac{1}{\mathcal{S}_{H_2}}.\frac{\mathcal{S}_{H_2}.I}{2F}.\eta_{cell} \quad (4\text{-}41)$$

$$\mathcal{N}_{H_2O\ terbentuk} = \frac{\mathcal{N}_{H_2\,supply}}{\mathcal{S}_{H_2}} \quad (4\text{-}42)$$

4.4.3 Cecair Air di Dalam Bahan Tindak Balas

Komponen wap air yang mengalir masuk bersama hidrogen sebagai bahan tindak balas ke dalam PEMFC ialah (Barbier, F. 2005):

$$\mathcal{N}_{H_2O} = \frac{\mathcal{S}_{H_2}}{2F}.\eta_{cell}.nisbah\ molar\ gas \quad (4\text{-}43)$$

$$\mathcal{N}_{H_2O\ dalam\ \ H_2} = \frac{\mathcal{S}_{H_2}.I}{2F}.\eta_{cell}.\mathcal{y} \quad (4\text{-}44)$$

Komposisi wap air di dalam hidrogen atau udara dikira berdasarkan nisbah kelembapan jisim x menurut (Hassan et al. 2009) ialah:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$x = \frac{G_v}{G_a} = \frac{gram\ \ wap\ \ air}{gram\ \ gas\ kering} \tag{4-44}$$

Molar nisbah kelembapan $\mathcal{y}$ adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{y} = \frac{\mathcal{N}_v}{\mathcal{N}_a} = \frac{mol\ \ wap\ \ air}{mol\ \ gas\ kering} \tag{4-45}$$

Hubungan jisim dan molar kelembapan ialah

$$\mathcal{y} = \frac{\frac{G_v}{M_w}}{\frac{G_a}{M_a}} \tag{4-46}$$

$$\mathcal{y} = \frac{G_v.M_a}{G_a M_v} \tag{4-47}$$

$$\mathcal{y}\frac{M_v}{M_a} = \frac{G_v}{G_a} \tag{4-48}$$

$$\mathcal{y}\frac{M_v}{M_a} = x \tag{4-49}$$

Kerana kelembapan relatif, φ, diukur berdasarkan penyelidikan maka diperlukan hubungan antara pecahan mol dan kelembapan relatif. Pecahan mol wap air boleh diertikan sebagai berikut (Hassan et al. 2009):

$$y = \varphi \frac{P_{sat}}{P} \tag{4-50}$$

Dimana P_{sat} ialah tekanan wap jenuh air (atm), and P ialah tekanan total (atm). Nilai tekan wap jenuh air p_{H2O} adalah sebagai berikut (Zhang et al. 2008):

$$P^o_{H_2O}(T) = 6.02724\ x\ 10^{-3} + 4.38484\ x\ 10^{-4}(T - 273.15) + 1.39844\ x\ 10^{-5}(T - 273.25)^2 + 2.71166\ x\ 10^{-7}(T - 273.15)^3 + 2.57731\ x\ 10^{-9}(T - 273.15)^4 + \quad 2.82254\ x\ 10^{-11}(T - 273.15)^5 \tag{4-51}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Hubungan nisbah molar $\mathcal{y}$ dengan tekanan separa ialah:

$$\mathcal{y} = \frac{P_v}{P_a} = \frac{P_v}{P - P_v} \tag{4-52}$$

P_v = tekanan separa wap air (atm)

P_a = tekanan separa gas (atm)

P = tekanan total

Berdasarkan persamaan (4-49), maka:

$$\mathcal{y} = \frac{x.M_a}{M_w} \tag{4-53}$$

Dengan mengganti persamaan (4-53) ke dalam persamaan (4-50), maka:

$$\frac{P_v}{P - P_v} = \frac{x.M_a}{M_w} \tag{4-54}$$

Ganti nilai P_v dengan persamaan (4-52)

$$\frac{\varphi.P_{V_s}}{P - \varphi.P_{V_s}} = \frac{x.M_a}{M_w} \tag{4-55}$$

$$x = \frac{M_w}{M_a} \frac{\varphi.P_{V_s}}{P - \varphi.P_{V_s}} \tag{4-56}$$

Sehingga:

$$\mathcal{y} = \frac{\varphi.P_{V_s}}{P - \varphi.P_{V_s}} \tag{4-57}$$

Maka jumlah mol wap air yang terdapat di dalam hidrogen ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2 O dalam\ \ H_2} = \frac{\delta_{H_2}.I}{2F} . \eta_{cell} \cdot \frac{\varphi.P_{V_s}}{P - \varphi.P_{V_s}} \tag{4-58}$$

Atau:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ H_2} = \mathcal{S}_{H_2}.\mathcal{N}_{H_2}.\eta_{cell}.\frac{\varphi.P_{V_s}}{P_a-\varphi.P_{V_s}} \quad (4\text{-}59)$$

Dimana: P_a ialah tekanan aliran wap di dalam hidrogen mengalir masuk ke dalam anod. Sedangkan jumlah wap air di dalam oksigen yang mengalir masuk PEMFC ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ O_2} = \frac{\mathcal{S}_{O_2}.I}{4F}.\eta_{cell}.\mathcal{Y} \quad (4\text{-}60)$$

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ O_2} = \frac{\mathcal{S}_{O_2}.I}{4F}.\eta_{cell}\ \frac{\varphi.P_{V_s}}{P_a-\varphi.P_{V_s}} \quad (4\text{-}61)$$

Atau:

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ O_2} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.\eta_{cell}\ \frac{\varphi.P_{V_s}}{P_c-\varphi.P_{V_s}} \quad (4\text{-}62)$$

Di mana P_c ialah tekanan aliran wap air di dalam oksigen mengalir masuk ke dalam anod. Jumlah wap air di dalam udara yang mengalir masuk PEMFC ialah:

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ udara} = \mathcal{S}_{O_2}.\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1}{XO_2}.\mathcal{Y} \quad (4\text{-}63)$$

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ udara} = \mathcal{S}_{O_2}.\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1}{XO_2}.\frac{\varphi.P_{V_s}}{P_c-\varphi.P_{V_s}} \quad (4\text{-}64)$$

Atau:

$$\mathcal{N}_{H_2O dalam\ udara} = \mathcal{S}_{O_2}.n_{cell}\ \frac{\mathcal{N}_{O_2}}{XO_2}\ \frac{\varphi.P_{V_s}}{P_c-\varphi.P_{V_s}} \quad (4\text{-}65)$$

4.4.4 Kepekatan Komponen yang Keluar Dari PEMFC

Kepekatan komponen yang mengalir keluar dari sistem PEMFC terdiri daripada:

1. Kepekatan nitrogen yang keluar katod nilainya adalah sama dengan nitrogen yang mengalir masuk katod.

$$\mathcal{N}_{N_2 keluar} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-Xmol\ O_2}{Xmol O_2} \quad (4\text{-}66)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

2. Jumlah udara mengalir keluar dari katod ialah jumlah nitrogen mengalir masuk ditambah jumlah oksigen yang tidak bertindak balas.

$$\mathcal{N}_{N_2\ tidak\ \ bereaksi} + \mathcal{N}_{O_2\ tidak\ \ bereaksi} = \mathcal{S}_{O_2}.\frac{I}{4F}.n_{cell}.\frac{1-XmolO_2}{Xmol\ O_2} + \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} - \left(\frac{1}{2}\mathcal{N}_{H_2}.n_{cell}\right) \quad (4\text{-}67)$$

Maka jisim udara yang keluar ialah:

$$= \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-XmolO_2}{Xmol\ O_2} + \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} - \left(\frac{1}{2}\mathcal{N}_{H_2}.n_{cell}\right)$$

$$= \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-XmolO_2}{XmolO_2} + \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} - \left(\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}\right)$$

$$= \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-XmolO_2}{XmolO_2} + \mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}\left(\mathcal{S}_{O_2}-1\right)$$

$$= \left(\mathcal{S}_{O_2}\frac{1-XmolO_2}{XmolO_2}\right)\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} + \mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}\left(\mathcal{S}_{O_2}-1\right)$$

$$= \left[\left(\mathcal{S}_{O_2}\frac{1-XmolO_2}{XmolO_2}\right) + \left(\mathcal{S}_{O_2}-1\right)\right]\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}$$

$$\mathcal{N}_{udara\ \ keluar\ \ stek} = \left[\left(\mathcal{S}_{O_2}\frac{1-XmolO_2}{Xmol\ O_2}\right) + \left(\mathcal{S}_{O_2}-1\right)\right]\frac{I}{4F}n_{cell} \quad (4\text{-}68)$$

Atau jisim udara yang keluar dari PEMFC ialah:

$$\mathrm{m}_{udara\ \ keluar\ \ stek} = \left[\left(M_r N_2.\mathcal{S}_{O_2}\frac{1-XmolO_2}{Xmol\ O_2}\right) + M_r O_2\left(\mathcal{S}_{O_2}-1\right)\right]\frac{I}{4F}n_{cell} \quad (4\text{-}69)$$

Nilai yang akan ditentukan ialah:

a. Jumlah air yang mengalir keluar dari anod ialah jumlah wap air yang ikut bersama bahan tindak balas (hidrogen) dikurangi jumlah wap air yang ikut pada peristiwa EOD ditambah jumlah wap air pada peristiwa resapan balik.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

b. Jumlah wap air yang mengalir keluar dari katod ialah jumlah wap air yang ikut bersama bahan tindak balas (udara) ditambah jumlah wap air yang terbentuk dari hasil tindak balas ditambah jumlah wap air yang ikut pada peristiwa EOD dikurangi dengan jumlah wap air pada peristiwa resapan balik.

4.4.5 EOD dan Resapan Balik

Jumlah proton yang berpindah dari sisi anod ke sisi katod PEMFC ($\mathcal{N}_{drag}$) pada fenomena EOD boleh dihitung berdasarkan persamaan berikut (Yu et al. 2005; Zhou et al. 2006; Zong et al. 2006):

$$\mathcal{N}_{drag} = \frac{n_d}{F} I \tag{4-70}$$

Nilai pekali EOD (n_d) boleh didefenisikan berdasarkan persamaan berikut:

$$n_d = \frac{2.5\ \lambda pem}{22} \tag{4-71}$$

Dimana λpem ialah kandungan air membran yang boleh dihitung berdasarkan persamaan berikut (Chu et al. 2007; Gao et al. 2010):

$$\lambda = 0.043 + 17.81 a_{H2O} - 39.85\, a_{H2O}^2 + 36.\, a_{H2O}^3 \qquad 0 < a_{H2O} \leq 1 \tag{4-72}$$

Aktiviti air membran a_{H2O} dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$a_{H2O} = \frac{a_{H2O,a} + a_{H2O,k}}{2} \tag{4-73}$$

Dimana $a_{H2O,a}$ ialah aktiviti air membran pada sisi anod, and $a_{H2O,k}$ ialah aktiviti air membran pada sisi katod. Resapan air dari sisi katod ke sisi anod PEMFC $\mathcal{N}_{diff,H20}$ ialah didefinisikan sebagai berikut (Zong et al. 2006; del Real et al. 2007; Gao et al. 2010):

$$\mathcal{N}_{diff,H20} = D_w \frac{(C_{K,v} - C_{A,v})}{x_m} \tag{4-74}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

(Hassan et al. 2009) menyatakan bahawa resapan air dari sisi anod ke sisi katod pada sistem PEMFC adalah sebagai berikut:

$$J_w = k_g(y_a - y_c) \tag{4-75}$$

J_w = fluks kelembapan merentasi membran

Seluruh pekali perpindahan jisim lembapan gas k_g pada sisi anod and katod boleh ditetapkan daripada pekali perpindahan jisim lembapan anod k_A dan katod k_c, masing masingnya sebagai berikut:

$$\frac{1}{kg} = \frac{K}{k_{A.}} + \frac{1}{k_{C.}} \tag{4-76}$$

Dimana:

$k_{A.}$= pekali pemeluwapan

$k_{C.}$= pekali perpindahan jisim penyejatan

k_g = pekali perpindahan jisim

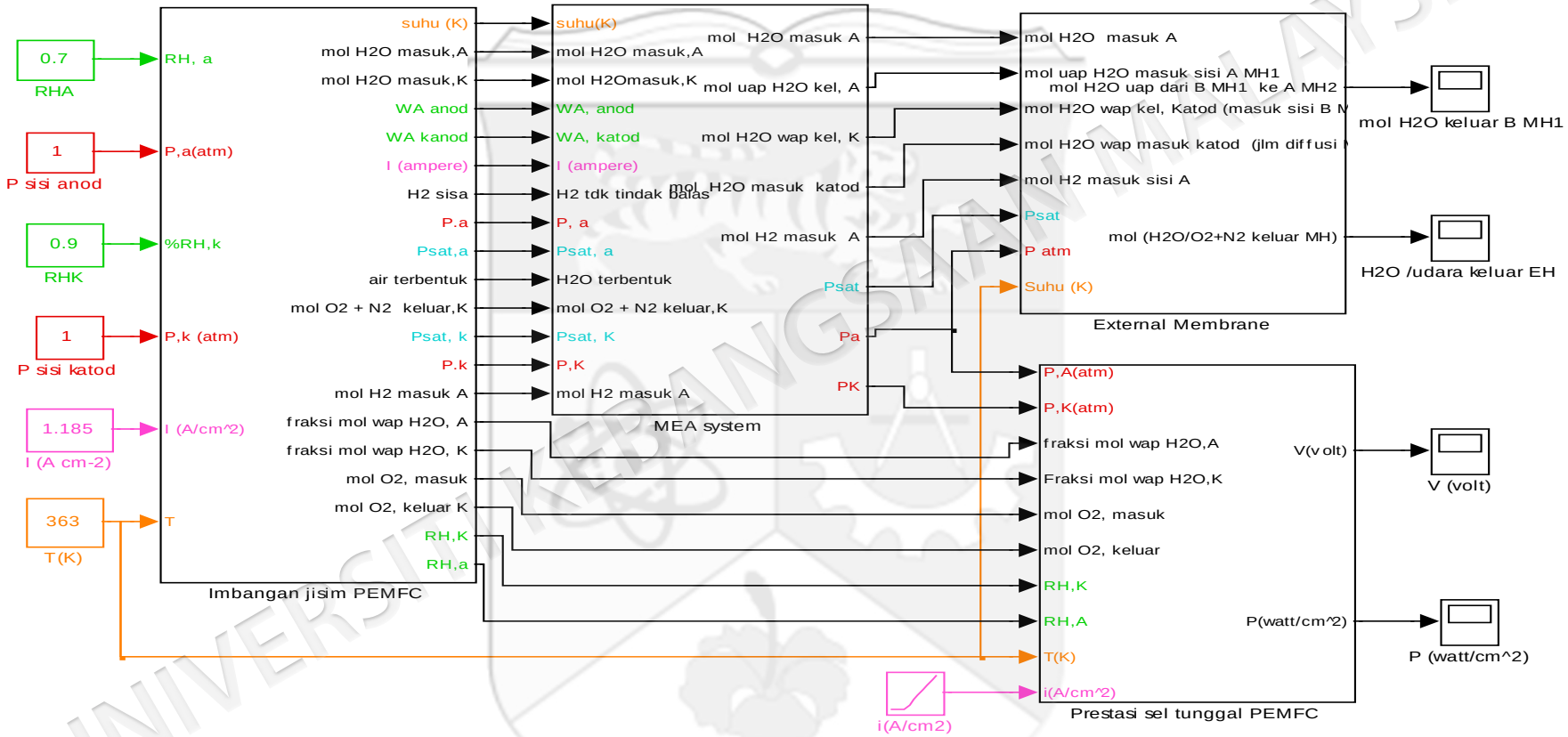
K = pekali kelembapan

4.5 SIMULASI IMBANGAN JISIM AIR

Kajian yang dilakukan tahapan ini iaitu membangun simulasi menggunakan perisian Simulink Matlab yang berhubungan dengan imbangan jisim air pada sistem PEMFC. Pembangunan simulasi menggunakan imbangan jisim pada stek PEMFC sebagai asas untuk mengkaji fenomena yang terdapat pada stek PEMFC. Simulasi yang dibangun menggunakan persamaan matematik yang telah dibangun yang meliputi: imbangan jisim pada sisi anod dan katod, imbangan pada MEA, kandungan wap air pada EOD dan resapan balik, serta pembentukan cecair air keluaran sisi anod dan katod. Pembangunan simulasi tersebut ditunjukan oleh Rajah 4.3 hingga Rajah 4.11.

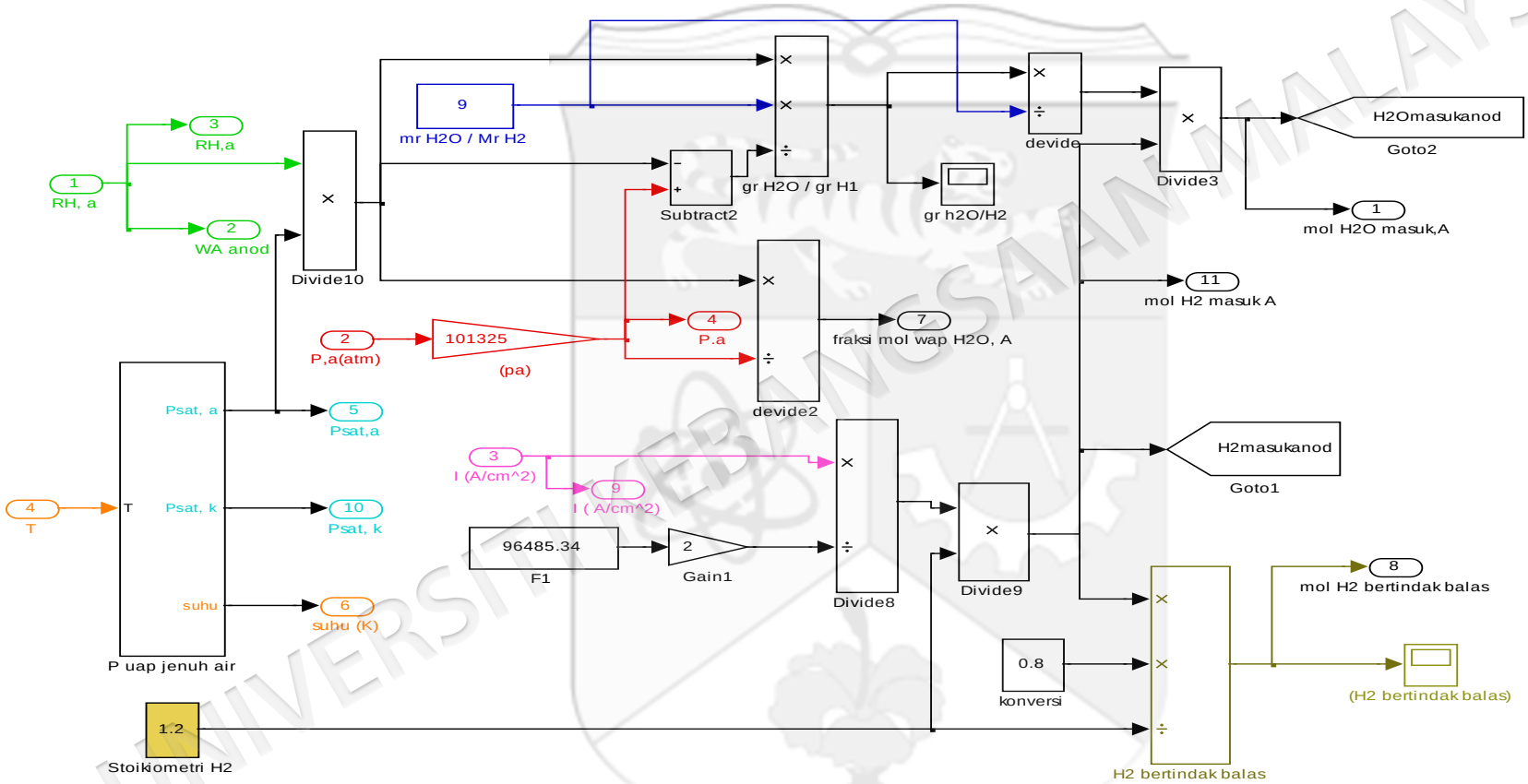
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

A. Reka bentuk sistem PEMFC



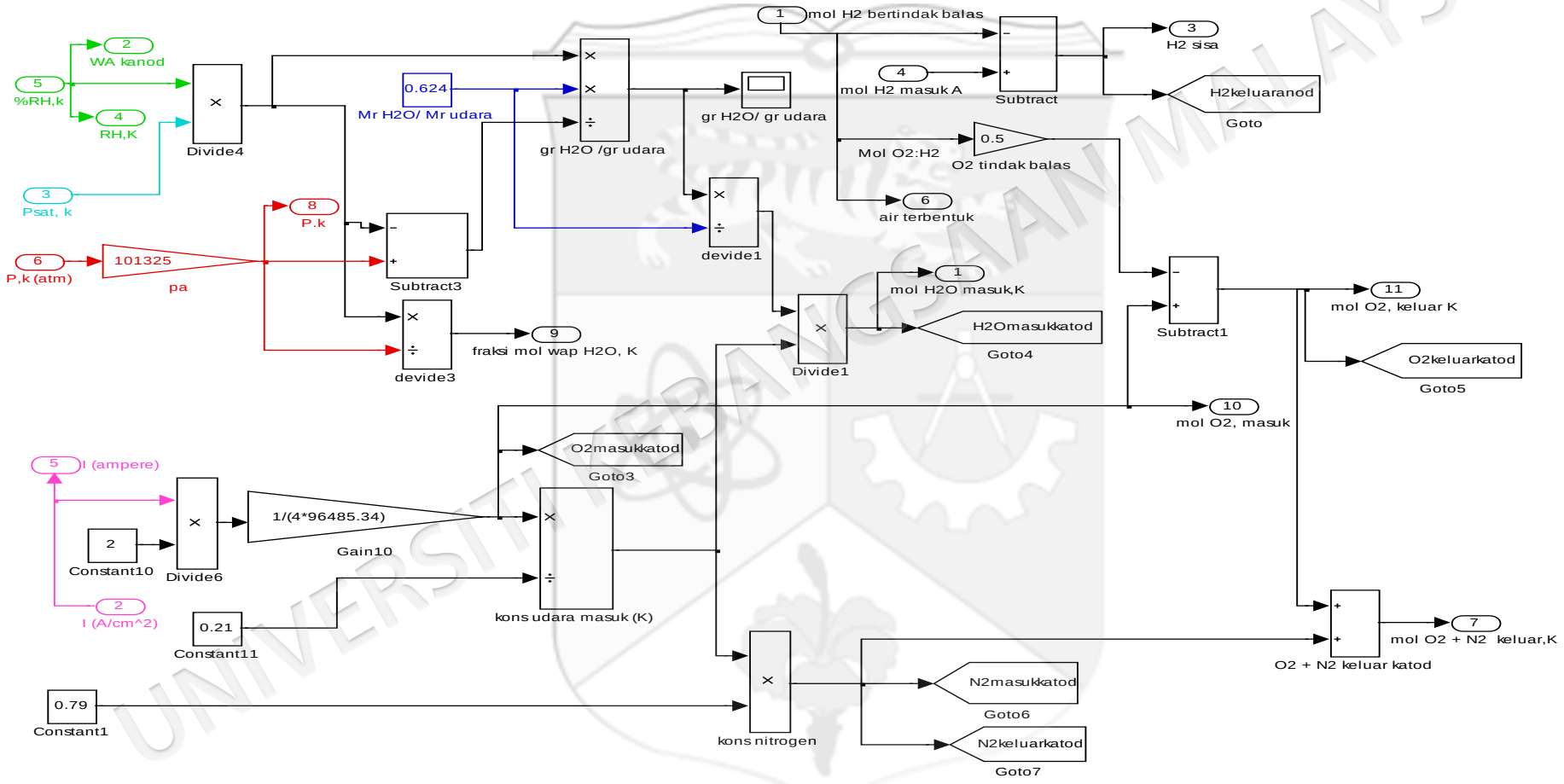
Rajah 4.3 Imbangan jisi pada sistem PEMFC

B. Bahagian sisi anod PEMFC



Rajah 4.4 Imbangan jisim pada sisi anod

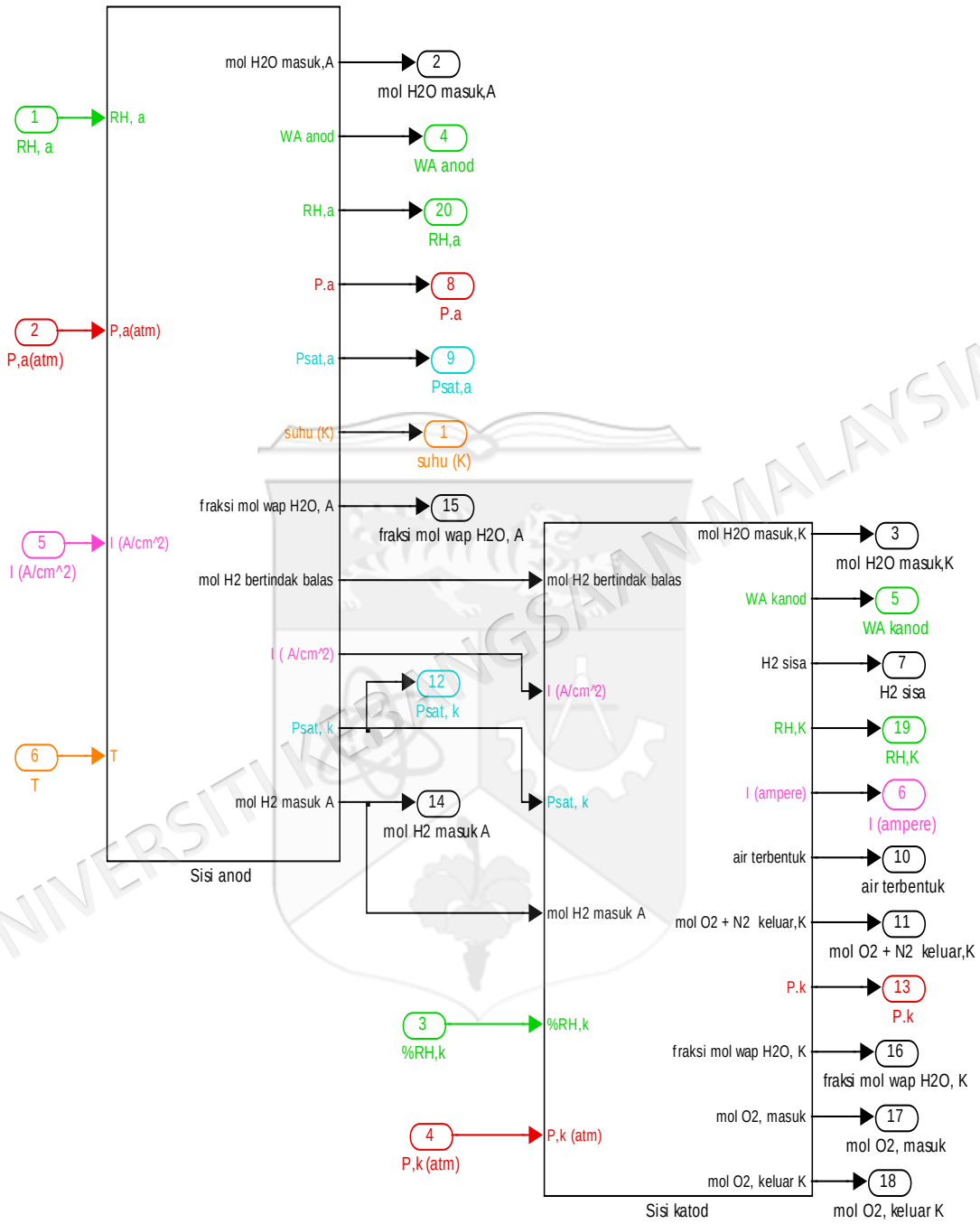
C. Bahagian sisi katod PEMFC



Rajah 4.5 Imbangan jisim pada sisi katod

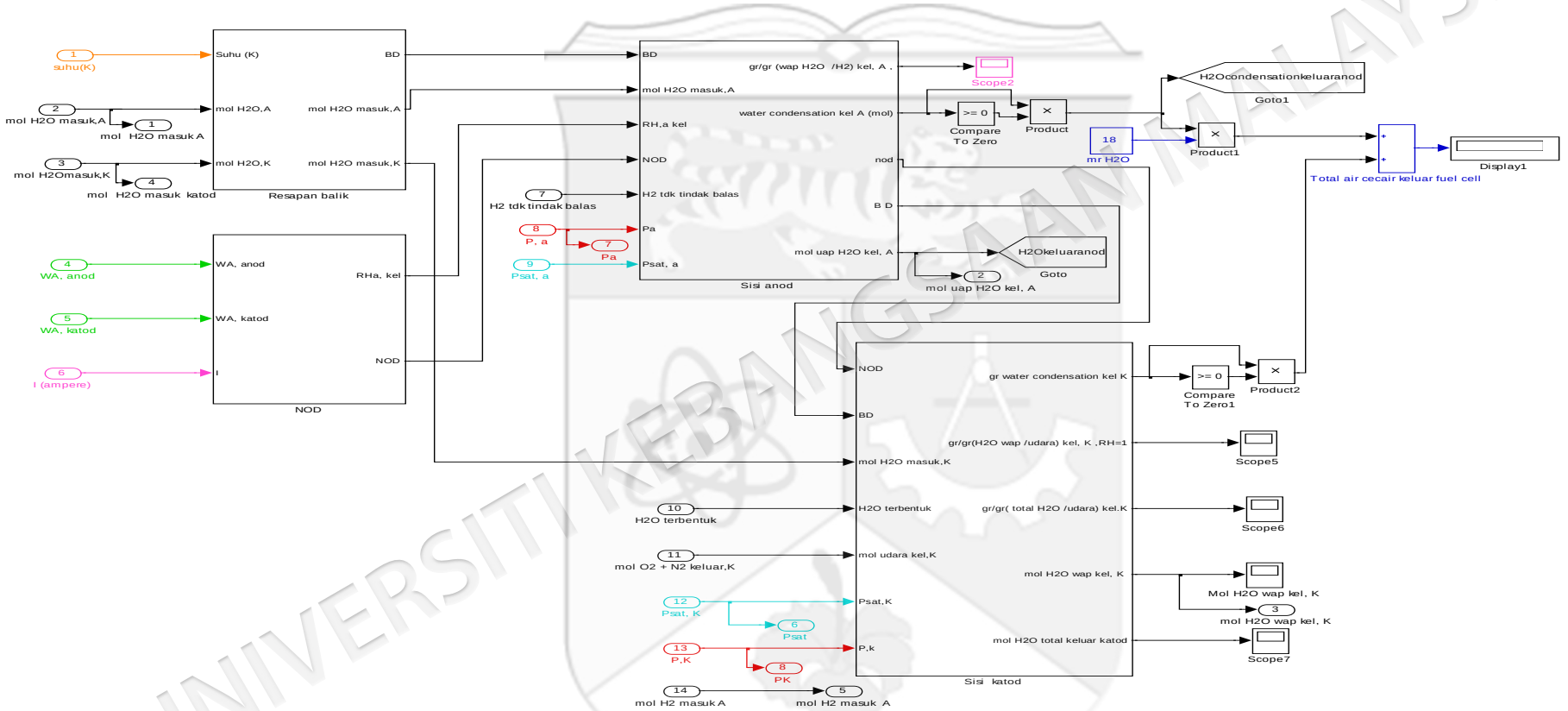
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

D. Bahagian anod dan katod



Rajah 4.6 Imbangan jisim di anod dan katod

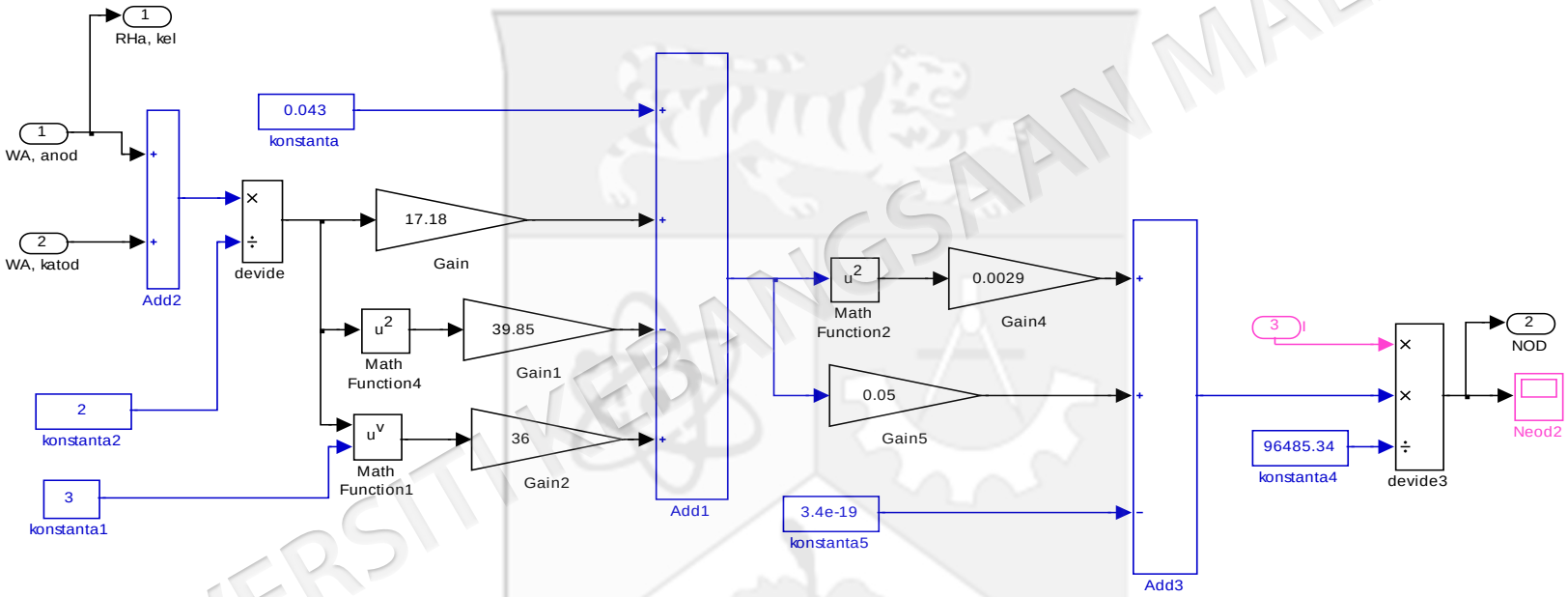
E. Sistem himpunan membran elektrod (MEA)



Rajah 4.7 Imbangan pada sistem MEA

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

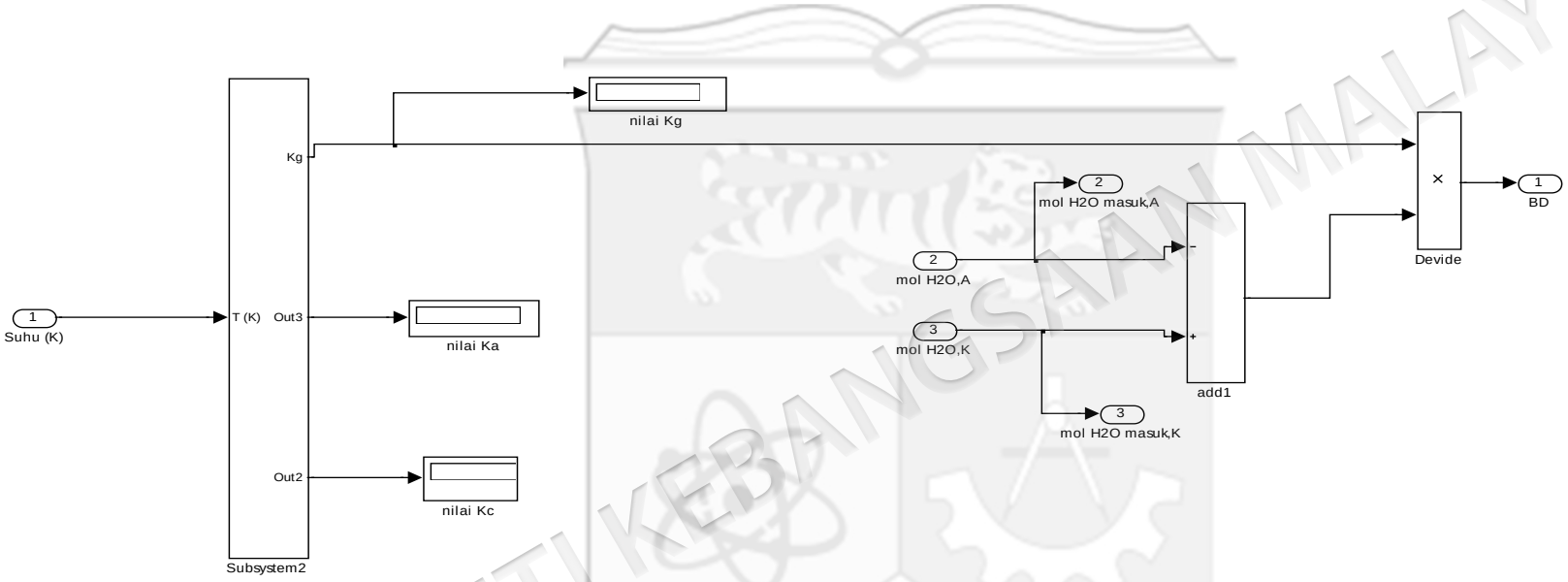
F. Sistem elektro osmotic drag (NOD)



Rajah 4.8 Imbangan pada sistem EOD

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

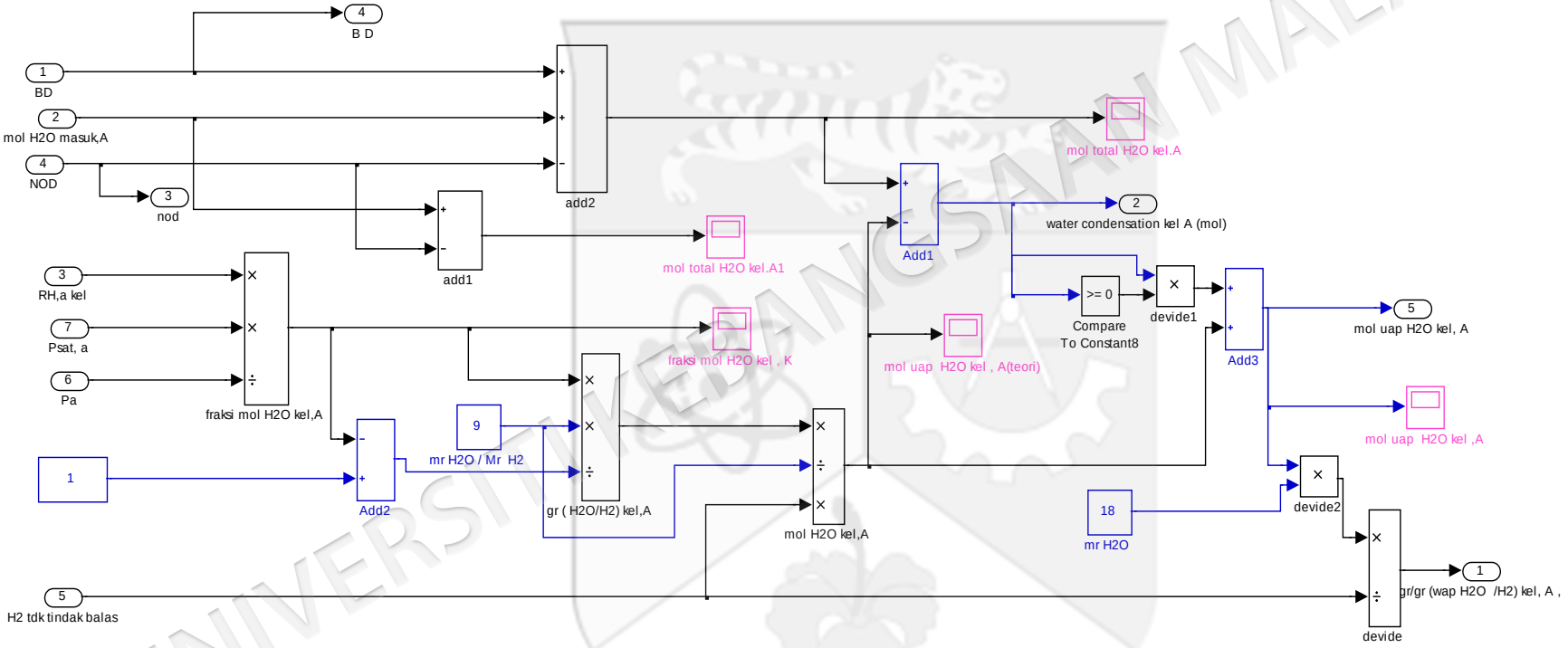
G. Sistem Resapan Balik Wap Air



Rajah 4.9 Imbangan pada sistem resapan balim PEMFC

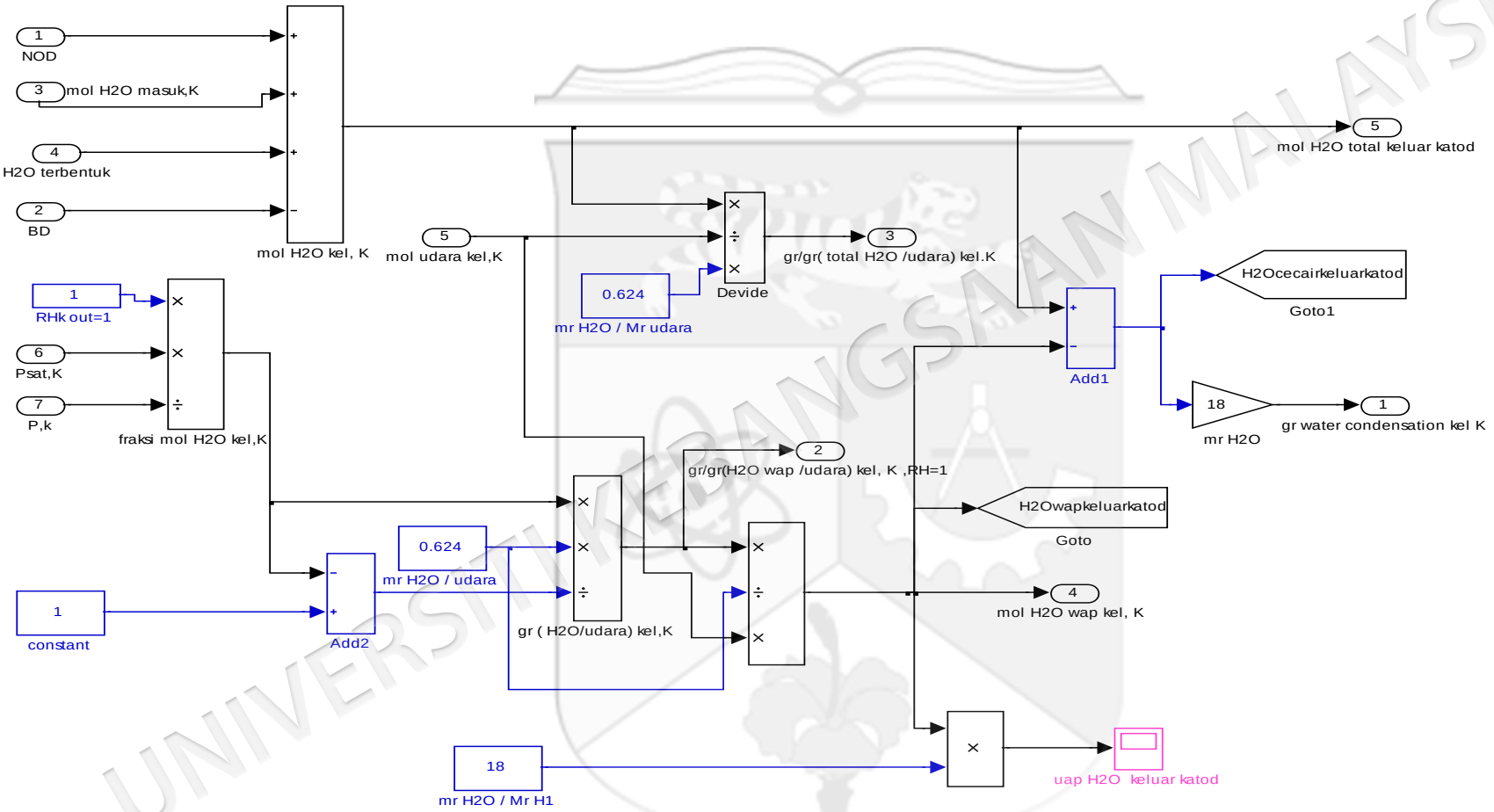
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

H. Pembentukan cecair air



Rajah 4.10 Pembentukan cecair air pada sisi anod PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 4.11 Pembentukan cecair air pada sisi katod PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

4.6 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Salah satu yang mempengaruhi prestasi PEMFC ialah kawalan keseimbangan air pada sistem operasi. Prestasi maksimum PEMFC boleh berlaku jika operasi pada sistem telah mencapai keseimbangan air. Keadaan operasi yang digunakan pada kajian ini adalah sebagai berikut: tekanan pada sisi anod dan sisi katod ialah 1 atm, ketumpatan arus ialah 500 mA cm^{-2}, dan nisbah stoikhiometri ialah 1.4 untuk hidrogen dan 2 untuk oksigen. Hidrogen disuapkan dan mengalir masuk ke dalam sisi anod sedangkan udara disuapkan mengalir masuk ke dalam sisi katod. Berikut ini ialah gambaran tentang pengaruh beberapa parameter terhadap fenomena yang terjadi pada sistem PEMFC.

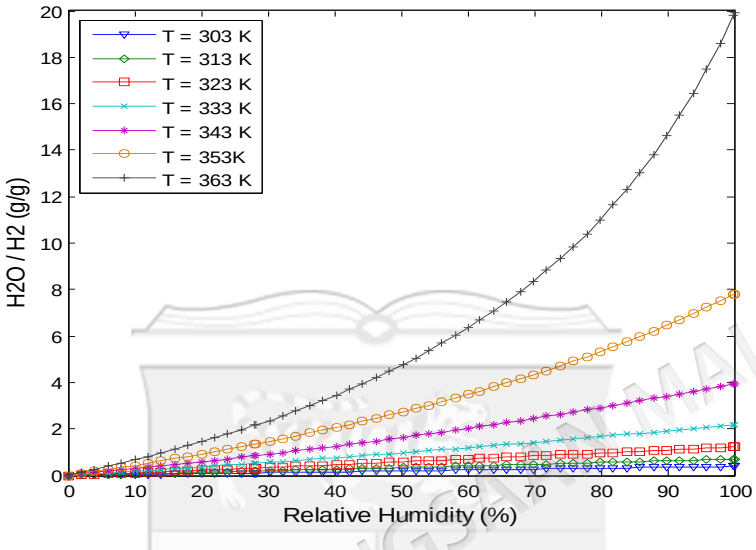
4.6.1 Jumlah Wap Air di Dalam Gas Yang Mengalir Masuk ke Dalam PEMFC

Sistem PEMFC terdiri daripada sisi anod dan sisi katod. Bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC iaitu hidrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi anod dan udara yang mengalir masuk ke dalam sisi katod. Kedua bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC mempunyai kelembapan tertentu. Pada bahagian ini digambarkan perbezaan jumlah kandungan air yang terdapat di dalam bahan tindak balas. Jumlah kandungan air di dalam bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC ditunjukkan oleh Rajah 4.12 Rajah tersebut menunjukkan hubungan antara jumlah wap air terhadap kelembapan relatif dan suhu operasi PEMFC.

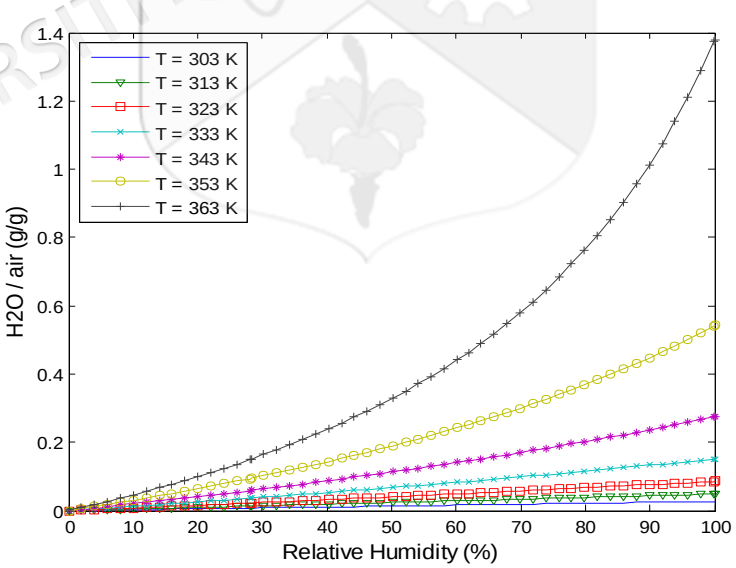
Hasil yang ditunjukkan oleh Rajah 4.12 mempunyai julat kelembapan relatif adalah dari 0 hingga100% dan julat suhu adalah dari 303 K hingga 363 K. Hubungan ini boleh digunakan untuk meramalkan jumlah wap air di dalam gas bahan tindak balas pada nilai kelembapan relatif dan nilai suhu yang berbeza. Hasil yang diperoleh ini menunjukkan bahawa peningkatan nilai suhu dan kelembapan relatif mengakibatkan terjadinya peningkatan jumlah wap air pada kedua sisi PEMFC iaitu sisi anod dan sisi katod. Hal ini boleh dilihat pada Rajah 4.12.a untuk keadaan di sisi anod dan Rajah 4.12.b untuk keadaan di sisi katod. Pada suhu operasi sistem PEMFC yang lebih besar daripada 353 K, jumlah kandungan wap air di dalam bahan tindak

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

balas ialah jauh lebih besar jumlahnya daripada jumlah kandungan wap air pada suhu operasi sistem PEMFC kurang daripada 353 K. Kandungan air dalam gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi anod dipengaruhi oleh suhu operasi sel PEMFC.



a. Sisi anod



b. Sisi katod

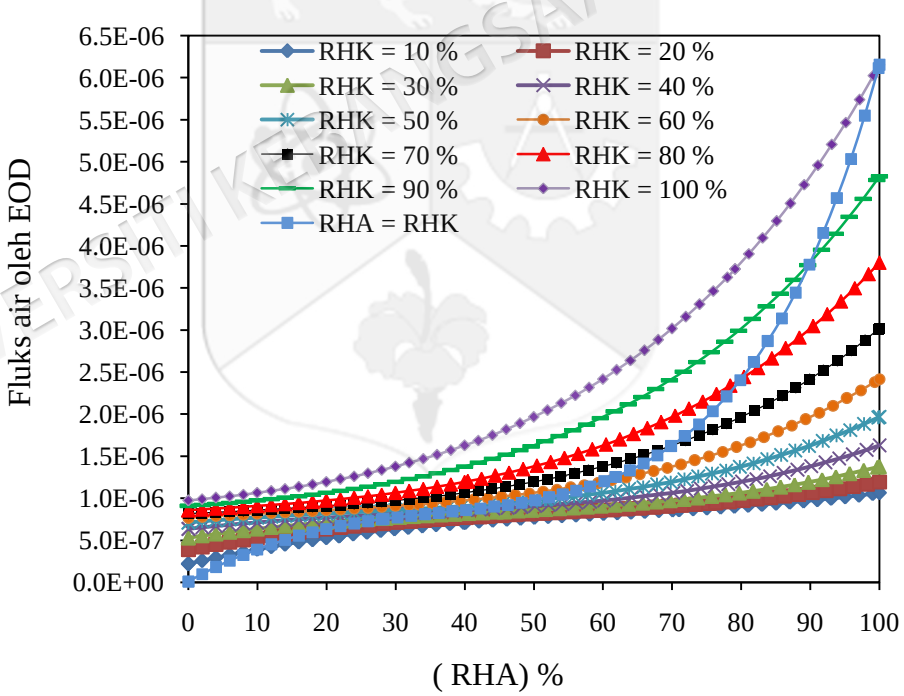
Rajah 4.12: Hubungan antara kelembapan relatif dan jumlah air yang mengalir masuk: (a) sebelah anod dan (b) sebelah katod

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Kandungan air di dalam gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi anod dipengaruhi oleh suhu operasi PEMFC. Jumlah kandungan wap air maksimum di dalam bahan tindak balas ialah 20 g H_2O/g H_2 pada aliran masuk ke dalam sisi anod dan 1.4 g H_2O/g udara pada aliran masuk ke dalam sisi katod. Jumlah kandungan wap air maksimum pada kedua sisi PEMFC iaitu sisi anod dan sisi katod beroperasi pada suhu 363 K dan kelembapan relatif 100%.

4.6.2 Kepekatan Air pada EOD

Nilai pekali EOD pada sistem PEMFC sangat penting kerana nilai tersebut secara langsung memberi kesan terhadap keseimbangan air di dalam sistem PEMFC. Rajah 4.13 berikut menunjukkan jumlah kandungan air yang meresap melalui peristiwa EOD di dalam PEMFC dengan perbezaan nilai kelembapan relatif di anod (RHA) dan nilai kelembapan relatif katod (RHK).



Rajah 4.13: Hubungan antara kelembapan relatif gas bahan tindak balas mengalir masuk ke dalam anod terhadap nilai pekali EOD sistem PEMFC.

Kajian ini telah dijalankan dengan pelbagai nilai kelembapan relatif pada sisi anod dalam julat 0 hingga 100% dan nilai kelembapan relatif pada sisi katod adalah daripada 10 hingga100%. Di dalam PEMFC terdapat sejumlah wap air yang meresap

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

melalui peristiwa EOD dari sisi anod ke sisi katod PEMFC. Apabila nilai RHA bertambah manakala RHK tetap dikekalkan, maka pekali EOD mengalami kenaikan sehingga mengakibatkan jumlah fluks air melalui EOD meningkat (Zhou et al. 2006).

Rajah 4.13 menunjukkan bahawa peningkatan nilai kelembapan relatif pada sisi anod dan katod mengakibatkan berlakunya peningkatan jumlah kandungan air yang meresap melalui peristiwa EOD. Jika nilai RHA adalah sama dengan nilai RHK, maka berlaku peningkatan fluks air yang ditunjukkan oleh nilai kelembapan relatif lebih daripada 60%. Apabila keadaan nilai RHA dan RHK yang digunakan berbeza, maka terjadi sedikit peningkatan pada fluks air yang ditunjukkan oleh nilai RHK kurang daripada 50%. Pada nilai RHK lebih daripada 50%, maka berlaku peningkatan nilai fluks air yang ditunjukkan oleh nilai RHA adalah lebih daripada 65%. Perpindahan nilai fluks air yang besar pada peristiwa EOD disebabkan oleh peningkatan jumlah air di dalam bahan tindak balas pada sisi anod sehingga juga mengakibatkan kelembapan relatif meningkat.

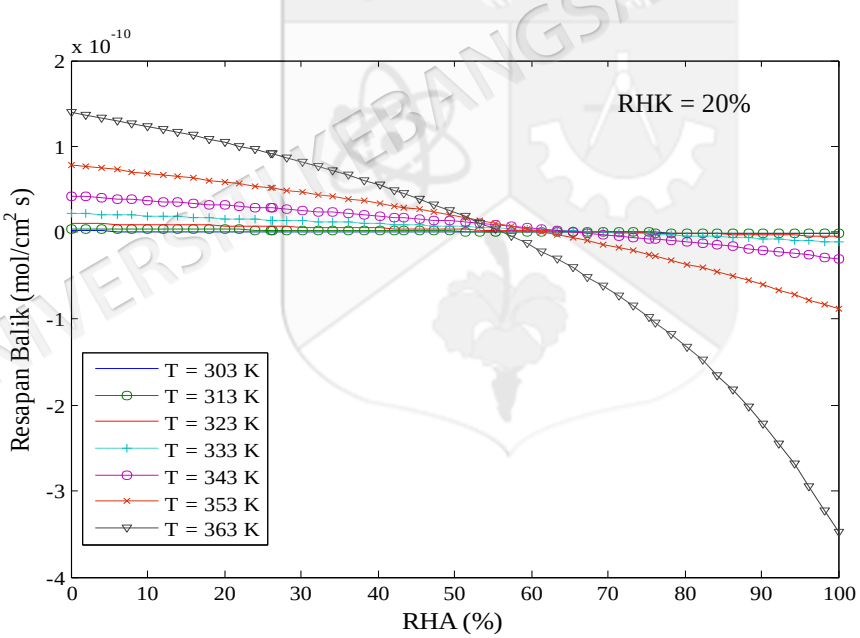
Jadual 4.1 menunjukkan perbandingan antara pekali EOD yang telah dikira dalam penyelidikan ini terhadap nilai pekali EOD hasil penyelidikan yang dilakukan oleh (Zhou et al. 2006). Keadaan operasi yang digunakan oleh Zhou et al. yang telah dihitung adalah seperti berikut: nilai RHK ialah 100%, nisbah stoikiometri H_2/O_2 ialah 2/2 dan nilai RHA ialah 50%, 75% dan100%._Nilai pekali EOD yang diperoleh daripada hasil simulasi kajian yang dilakukan ini adalah hampir sama dengan hasil yang diperoleh oleh Zhou et al. Peningkatan nilai RHA dari 50% kepada 100% menyebabkan berlakunya peningkatan nilai pekali EOD dari 0.35 hingga1.3 berdasarkan nilai penyelidikan dari Zhou et al. dan 0.38 hingga1.3 berdasarkan nilai daripada penyelidikan kajian ini.

Jadual 4.1 Perbandingan pekali nilai EOD (n_d) hasil penyelidikan terhadap penyelidikan dilakukan oleh (Zhou et al. 2006)

RHA	**Simulation**	**(Zhou et al. 2006)**
100%	1.2	1.3
75%	0.62	0.62
50%	0.38	0.35

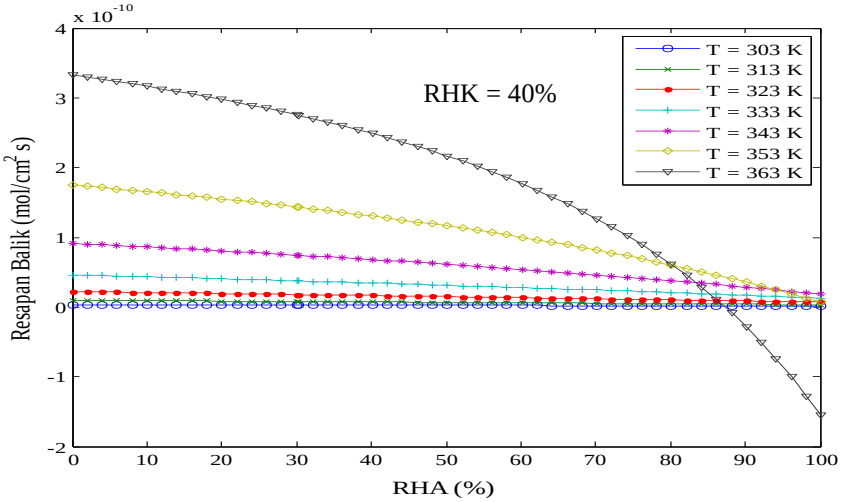
4.6.3 Resapan Balik

Pengangkutan air di dalam membran oleh resapan balik secara amnya dipengaruhi oleh suhu PEMFC, ketumpatan arus, kelembapan gas yang disuapkan masuk ke dalam PEMFC dan kandungan air membran (Yan et al. 2006). Rajah 4.14 menunjukkan kesan kelembapan relatif pada kedua-dua sisi PEMFC iaitu sisi anod dan sisi katod dan kesan suhu sel bahan api pada resapan air merentasi membran dari sisi katod ke sisi anod. Apabila nilai RHK tetap dan nilai RHA meningkat maka resapan air dari sisi katod ke sisi anod jumlahnya berkurangan. Hasil ini berlaku kerana terjadi peningkatan jumlah kandungan air pada sisi anod PEMFC. Samping daripada itu, apabila jumlah kandungan air di katod dikekalkan tetap maka akan mengakibatkan berlakunya penurunan kadar resapan air. Bagaimanapun, peningkatan nilai suhu pada PEMFC menyebabkan berlakunya peningkatan terhadap resapan air dari sisi katod ke sisi anod.

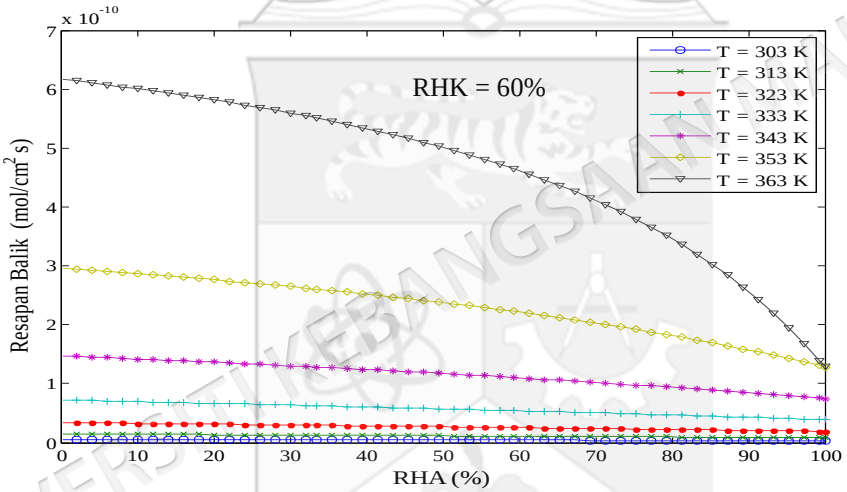


(a)

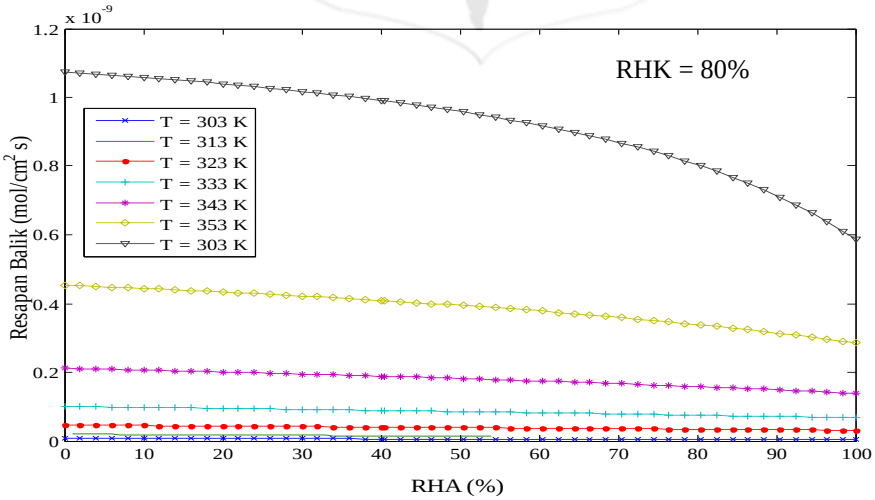
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(b)

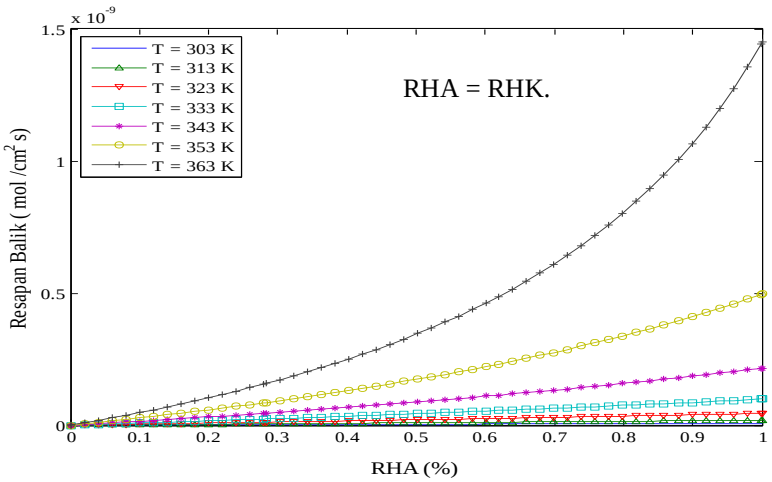


(c)



(d)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(e)

Rajah 4.14: Hubungan antara kelembapan relatif gas bahan tindak balas yang mengalir masuk PEMFC terhadap resapan air di dalam sistem PEMFC: (a) RHK = 20%, (b) RHK = 40%, (c) RHK = 60%, (d) RHK = 80% dan (e) RHA = RHK.

Rajah 4.14a dan 4.14b menunjukkan nilai resapan balik wap air yang mempunyai nilai positif dari sisi katod ke sisi anod PEMFC. Nilai negatif (kurang daripada sifar) menunjukkan resapan air berlaku dari sisi anod ke sisi katod. Nilai resapan balik berkurangan jika berlaku kenaikan RHA. Sebaliknya, nilai resapan balik wap air meningkat jika berlaku peningkatan nilai RHK dan suhu PEMFC. Fenomena ini boleh ditunjukkan dalam Rajah 4.14a dan 4.14d.

Penurunan nilai resapan balik wap air sistem PEMFC berlaku pada suhu antara 303 K dan 323 K, walaupun terjadi peningkatan nilai RHK dan RHA. Penurunan nilai resapan balik disebabkan kerana sedikitnya peningkatan jumlah kandungan air di dalam gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC. Peningkatan jumlah kandungan air pada keadaan ini ditunjukkan oleh Rajah 4.12.

Kepekatan air pada sisi katod sama dengan kepekatan air pada sisi anod iaitu berlaku pada RHK 20% dan 58% RHA. Fenomena ini ditunjukan oleh Rajah 4.14a. Keadaan ini menunjukan tidak berlakunya resapan balik wap air di dalam sistem PEMFC. Kenaikan nilai RHK menyebabkan berkurangnya perpundahan wap air dari sisi anod ke sisi katod. Fenomena ini ditunjukan Rajah 4.14a hingga 4.14d.. Keadaan

RHK di atas 60% kepekatan air di katod lebih besar daripada di anod, akibatnya berlaku resapan balik daripada sisi katod ke sisi anod pada semua nilai RHA.

Rajah 4.14e menunjukkan bahawa nilai RHA adalah sama dengan nilai RHK, akibat peningkatan nilai kelembapan relatif dan suhu menyebabkan berlakunya peningkatan nilai resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod. Hal ini berlaku kerana kepekatan air pada sisi anod adalah lebih rendah berbanding pada sisi katod. Hasil yang diperoleh pada penyelidikan ini dibandingkan dengan kajian yang dilakukan oleh Tavakoli & Roshandel (2011) seperti yang ditunjukkan Jadual 4.2.

Jadual 4.2 Perbandingan nilai EOD dan resapan balik dengan Tavakoli 2011 padaRHA= RHK = 100%, 353 K

Parameter	**Simulasi**	**Tavakoli**
Fluk air EOD	6.152×10^{-6} mol cm^{-2} s^{-1}	6.8×10^{-6} mol cm^{-2} s^{-1}
Resapan balik	6.95×10^{-7} mol cm^{-2} s^{-1}.	2.8×10^{-6} mol cm^{-2} s^{-1}

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahawa nilai fluks air pada peristiwa EOD adalah lebih besar berbanding daripada nilai resapan balik wap air. Parameter yang digunakan pada kajian ini adalah sebagai berikut: tebal saluran gas ialah 1×10^{-3} m, purata ketumpatan arus ialah 0.5 A cm^{-2}, suhu operasi sistem PEMFC ialah 353 K, tekanan pada sisi anod ialah 3 atm dan tekanan di sisi katod ialah 5 atm. Nilai fluks air yang terdapat pada peristiwa EOD yang diperoleh oleh Tavakoli ialah 6.8×10^{-6} mol cm^{-2} s^{-1}, dan resapan air dari sisi anod ke katod PEMFC yang diperoleh ialah 2.8×10^{-6} mol cm^{-2} s^{-1}.

Sedang kajian yang dilakukan di bawah keadaan operasi yang sama, dengan menetapkan nilai RHA dan RHK ialah100% dan nisbah stoikiometri ialah 1.2 untuk hidrogen dan 2 untuk oksigen, maka nilai fluks air pada peristiwa EOD ialah 6.152×10^{-6} mol cm^{-2} s^{-1} dan resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod ialah 6.95×10^{-7} mol cm^{-2} s^{-1}. Berdasarkan perbandingan ini, boleh disimpulkan bahawa nilai fluks air pada EOD adalah lebih besar daripada nilai resapan balik air dari sisi katod ke sisi anod. Resapan balik wap air ini berguna untuk memenuhi keperluan air membran dan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

juga boleh menghambat laluan bahan tindak balas menuju permukaan lapisan pemangkin (Sridhar et al.2001; Hyun & Kim 2004). Samping itu, jika resapan balik wap air lebih dominan daripada EOD menyebabkan nilai ketumpatan arus yang dihasilkan rendah. Sebaliknya, wap air EOD lebih dominan daripada resapan balik maka menghasilkan ketumpatan arus yang tinggi (Stumper et al. 2005; dan Liu et al. 2006)

4.6.5 Pembentukan Cecair Air pada ketumpatan arus tetap.

Keberadaan cecair air di dalam sel boleh mengurangkan penukaran tindak balas yang terdapat di dalam sistem PEMFC. Hal ini berlaku kerana cecair air boleh menghalangi bekalan bahan tindak balas kepada permukaan lapisan pemangkin. Sedangkan keberadaan cecair air pada sisi katod sel fuel menyebabkan berlakunya penurunan jumlah oksigen untuk melakukan tindak balas pada lapisan pemangkin. Air dalam jumlah berlebih dialirkan pada sistem PEMFC melalui aliran udara pada sisi katod (Baschuk & Li 2005; Rajalakshmi & Dhathathreyan 2007; Lin et al. 2008).

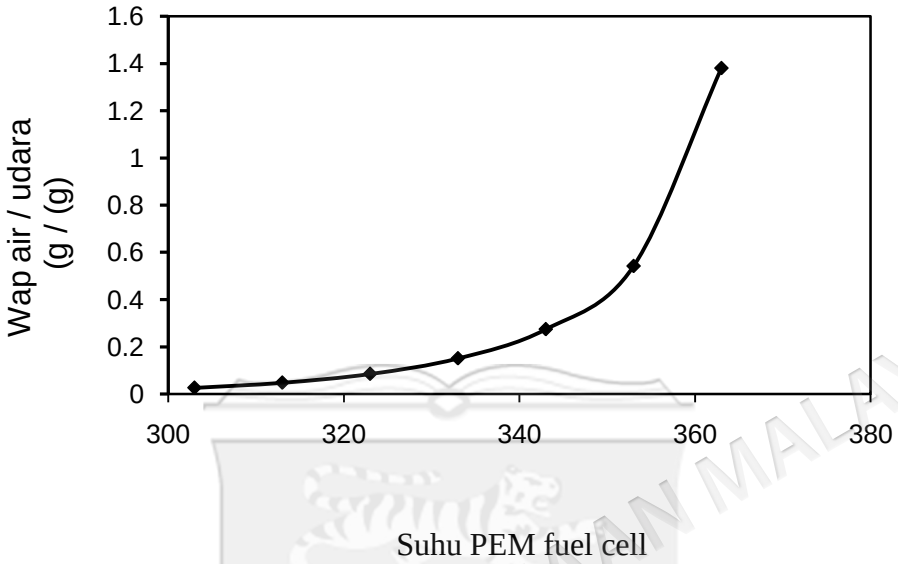
Kehadiran jumlah kandungan air yang besar pada aliran masuk bahan tindak balas boleh menghalangi laluan gas menuju ke lapisan resapan gas (GDL) dan lapisan pemangkin (CL), sehingga menyebabkan berlakunya pengurangan aktiviti pemangkin di dalam CL. Kajian ini tertumpu kepada kesan pelbagai keadaan operasi sistem PEMFC terhadap pembentukan cecair air. Air yang mengalir keluar dari sisi katod terdiri daripada dua fasa iaitu fasa cecair dan fasa wap. Kelembapan relatif di atas 100% air yang mengalir keluar daripada sisi katod berada dalam fasa cecair.

a. Air Dalam Fasa Wap di Aliran Keluar dari PEMFC

Air yang berada di dalam aliran gas yang mengalir keluar dari PEMFC terdiri daripada dua fasa iaitu fasa gas dan fasa cecair. Fasa gas terdiri daripada wap air, oksigen dan nitrogen yang tidak mengalami tindak balas. Jumlah kandungan air di dalam fasa wap adalah terhad oleh suhu sistem PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Rajah 4.15 menunjukkan had kandungan air maksimum dalam fasa wap pada aliran keluar dari sisi PEMFC dengan keadaan operasi iaitu kelembapan relatif 100% dan suhu operasi daripada 303 K kepada 363 K.



Rajah 4.15. Hubungan antara suhu PEMFC terhadap jumlah wap air pada aliran gas keluar dari PEMFC pada kelembapan relatif 100%.

Peningkatan suhu PEMFC menyebabkan berlakunya peningkatan terhadap nilai kepekatan wap air di dalam udara yang mengalir keluar dari sisi katod. Pada suhu yang besar daripada 353 K terjadi peningkatan jumlah wap air di dalam udara yang mengalir keluar dari sisi katod. Peningkatan ini disebabkan kerana terdapatnya kandungan wap air yang tinggi di dalam hidrogen dan mengalir masuk ke dalam sisi anod. Samping daripada itu, kerana tingginya resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod PEMFC.

Kepekatan wap air maksimum di dalam udara ialah 1.4 g air / g udara pada suhu 363 K. Air di dalam aliran gas yang mengalir keluar dari sisi katod terdiri daripada fasa wap dan fasa cecair. Kedua jenis fasa air ini terbentuk jika kandungan air yang mengalir keluar dari sisi katod mempunyai nilai kelembapan relatif besar daripada 100%. Jumlah maksimum kandungan wap air pada pelbagai suhu yang ditunjukkan dalam Rajah 4.15. Di atas nilai kelembapan relatif 100% air berada dalam fasa cecair. Jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada pelbagai nilai kelembapan relatif dijelaskan dalam seksyen berikutnya.

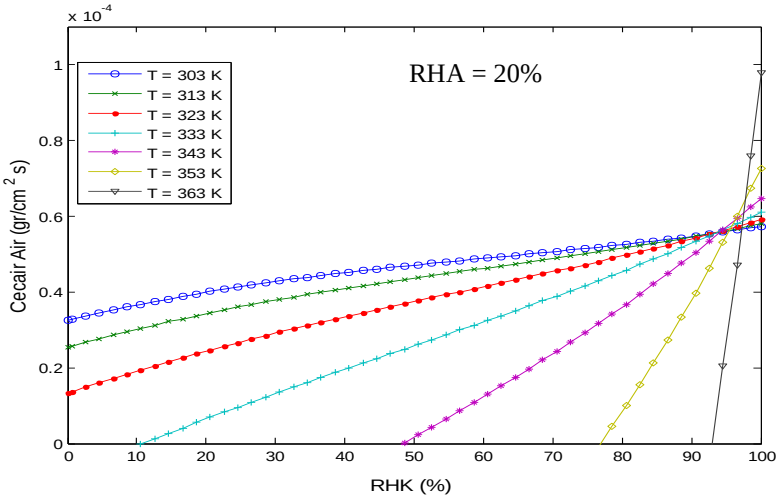
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

b. Kepekatan air pekat pada aliran keluar katod

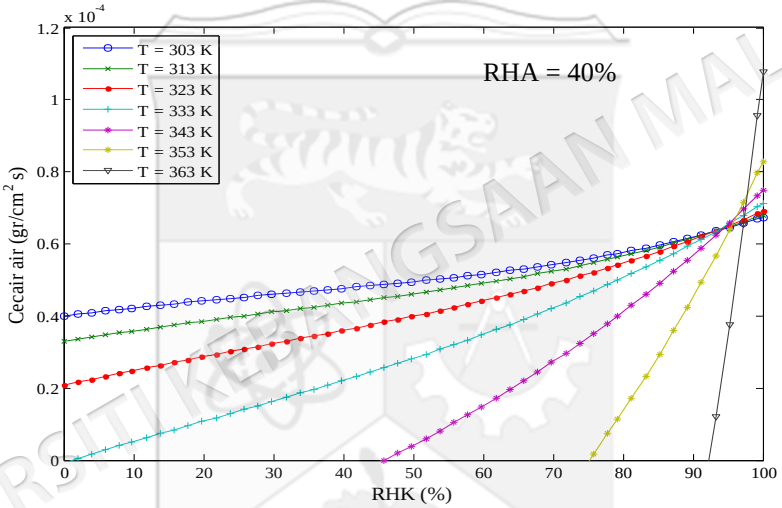
Dengan mengetahui keadaan berlakunya pembentukan cecair air pada sistem, maka boleh membantu menentukan keadaan optimum reka bentuk proses sistem PEMFC serta juga membantu mengurangkan jumlah cecair air pada sistem. Meminimumkan jumlah air pada aliran keluar PEMFC mesti dilakukan, kerana kandungan air yang tinggi boleh mengurangkan prestasi sistem PEMFC. Hasil kajian yang ditunjukkan dalam Rajah 4.6 boleh digunakan untuk meramal keadaan operasi terbentuknya cecair air pada sisi katod sistem PEMFC. Cecair air terbentuk jika nilai kelembapan relatif besar daripada100% sehingga menyebabkan fasa air berada dalam bentuk cecair dan wap.

Rajah 4.16 menunjukkan kepekatan cecair air di pelbagai nilai RHK, nilai RHA, dan suhu operasi. Peningkatan suhu sistem PEMFC menyebabkan berlakunya penurunan kepekatan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod. Penurunan ini berlaku kerana terjadi peningkatan suhu sistem PEMFC, sehingga menyebabkan jumlah kandungan air dalam fasa wap meningkat. Kesannya mengakibatkan sedikit jumlah cecair air di dalam aliran yang keluar dari sisi katod. Berbagai keadaan operasi yang disiasat sistem PEMFC, pada nilai RHK lebih besar daripada 97% dan suhu operasi 363 K mengakibatkan berlakunya peningkatan cecair air yang ketara. Faktor utama peningkatan cecair air yang ketara ini kerana pada suhu 363 K dan kelembapan relatif tinggi menunjukan jumlah wap air yang mengalir masuk bersama udara jumlahnya sangat besar berbanding suhu dibawanya. Hal ini ditunjukan oleh Rajah 4.12b. Akibatnya kandungan wap air yang keluar katod juga tinggi. Keputusan ini menunjukkan bahawa sukar untuk mengawal jumlah air yang terbentuk di bawah keadaan operasi ini.

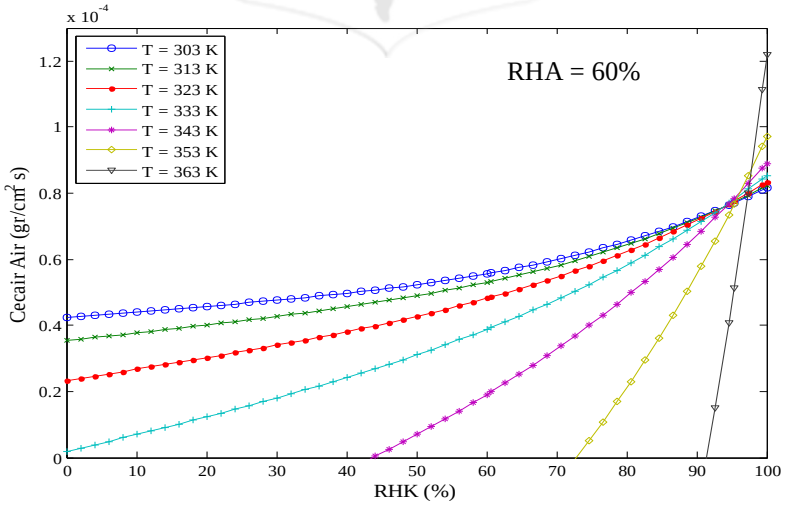
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)

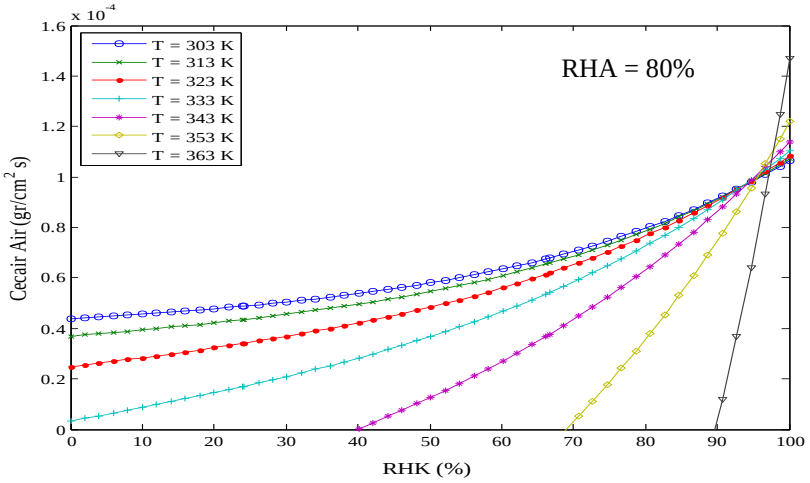


(b)

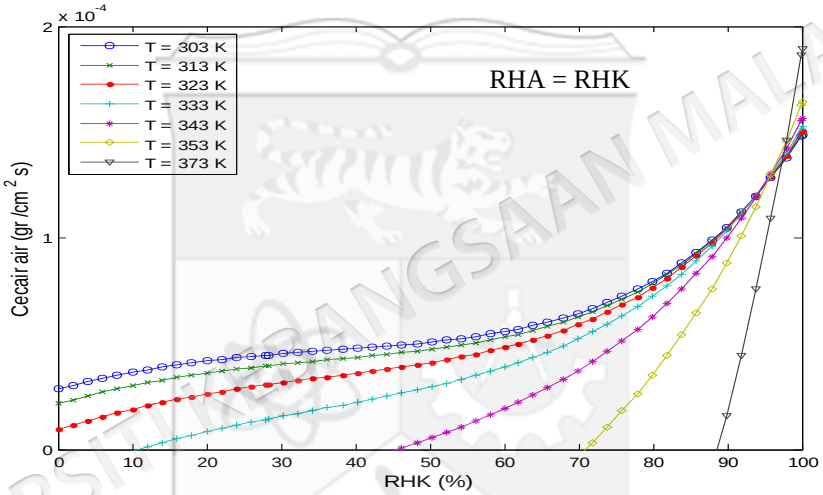


(c)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(d)



(e)

Rajah 4.16: Hubungan antara kelembapan relatif gas yang mengalir masuk ke dalam katod dan pembentukan cecair air pada aliran keluaran katod PEMFC: (a) RHA = 20%, (b) RHA = 40%, (c) RHA = 60%, (d) RHA = 80% dan (e) RHA = RHK.

Peningkatan nilai kelembapan relatif pada aliran gas yang masuk ke dalam sisi anod dan sisi katod menyebabkan berlakunya peningkatan jumlah pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod. Keputusan ini ditunjukkan oleh Rajah daripada 4.16a hingga 4.16d. Sistem PEMFC memerlukan wap air yang mengalir masuk bersama gas bahan tindak balas ke dalam sisi katod. Wap air ini berfungsi untuk mengikat air yang dihasilkan oleh tindak balas pada permukaan lapisan pemangkin di dalam katod PEMFC. Rajah 4.16a sampai 4.16e menunjukkan bahawa

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

peningkatan suhu sistem PEMFC mengakibatkan penurunan nilai kepekatan cecair air di dalam aliran gas yang keluar dari katod.

Sebaliknya, peningkatan nilai RHA dan RHK menyebabkan berlakunya peningkatan kepekatan cecair air. Sistem PEMFC memerlukan air di kedua sisinya iaitu sisi anod dan sisi katod. Bagaimanapun, kepekatan air sangat dipengaruhi oleh kepekatan pembentukan cecair air yang dihasilkan pada aliran gas keluar dari katod. Pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod mempunyai nilai minimum adalah pada nilai RHK daripada 40% hingga 92% dan suhu operasi daripada 343 hingga 363 K. Pada keadaan ini kepekatan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod nilainya berkurangan dengan berlakunya peningkatan nilai RHK. Rajah 4.16 menunjukkan bahawa pada suhu yang lebih besar daripada 353 K dan nilai RHA dalam julat 70% hingga 90% mengakibatkan pembentukan cecair air dan peningkatannya berlangsung secara ketara. Akibatnya, berlakunya kesukaran untuk mengawal pada keadaan ini dan juga berlakunya peningkatan kepekatan cecair air yang terbentuk pada aliran gas yang keluar dari katod PEMFC.

Berdasarkan suhu yang digunakan menunjukan bahawa pada suhu lebih rendah menghasilkan jumlah cecair air lebih tinggi. Hal ini berlaku pada suhu lebih rendah sedikit jumlah wap air yang diperlukan untuk mencapai kelembapan 100%, sebaiknya suhu yang tinggi lebih banyak wap air yang diperlukan. Kes ini berlaku untuk RHK dibawah 95%. Di atas RHK 95% cecair air yang banyak berlaku pada suhu yang tinggi iaitu 363K. Pada keadaan ini jumlah air yang keluar katod jumlahnya sangat besar, akibatnya baki air berupa fasa cecair yang paling tinggi berlaku pada suhu yang tinggi.

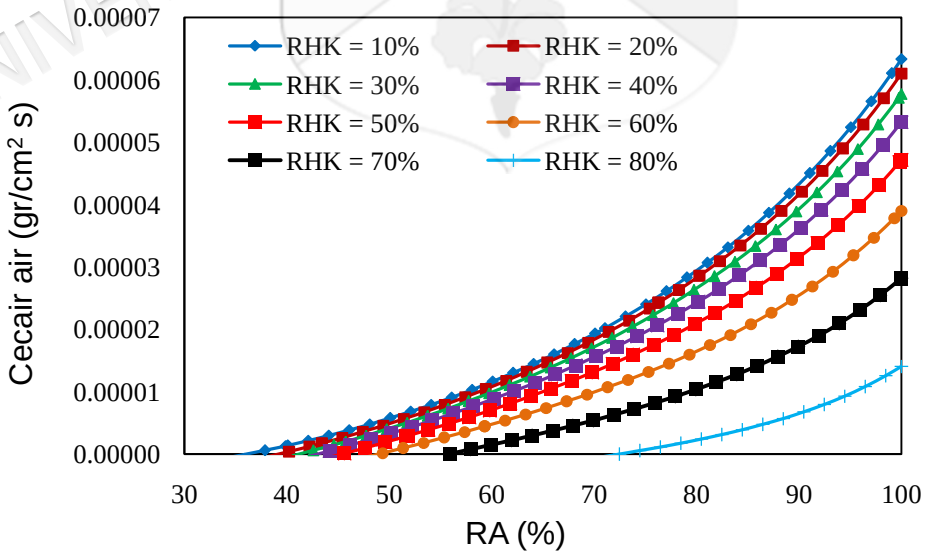
c. Kepekatan Cecair Air di Dalam Aliran Keluar Anod

Rajah 4.17 menunjukkan kepekatan cecair air yang dihasilkan pada aliran gas yang keluar dari sisi anod. Secara amnya, peningkatan nilai RHA menyebabkan berlakunya peningkatan kepekatan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod. Sebaliknya, peningkatan nilai RHK menyebabkan berlakunya penurunan kepekatan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod. Pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

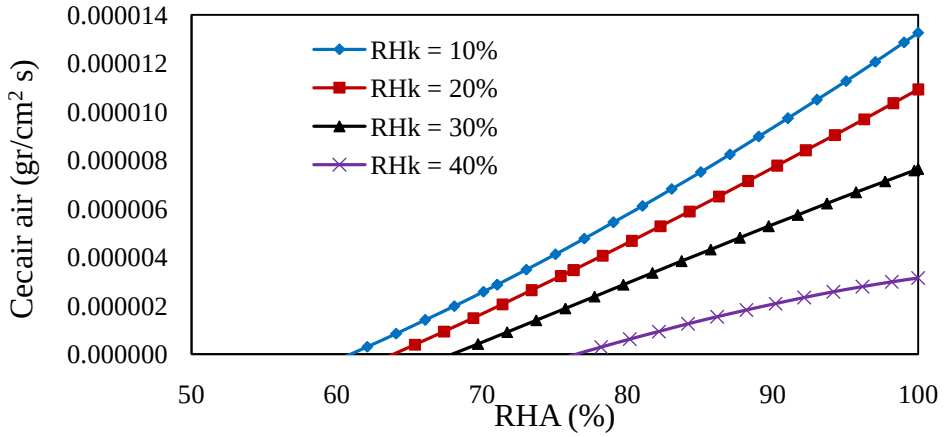
anod lebih dominan disebabkan oleh nilai EOD berbanding resapan balik. RHA meningkat dan RHK tetap menunjukan kenaikan peningkatan cecair air. Hal ini berlaku kerana kenaikan wap air pada EOD tidak lebih besar daripada kenaikan wap air yang masuk anod. Kenaikan RHK dan RHA tetap menunjukan menunjukan penurunan cecair air. Hal ini berlaku kerana naiknya RHA menyebabkan peningkatan wap air pada EOD sedangkan wap air masuk anod tidak meningkat. Kes ini juga berlaku untuk peningkatan RHA dan RHK yang memerlukan wap air pada EOD yang lebih banyak, sehingga cecair air menjadi turun.

Samping daripada itu, peningkatan suhu operasi PEMFC juga menyebabkan berlakunya peningkatan kepekatan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod. Rajah 4.17 menunjukkan bahawa pembentukan cecair air pada aliran gas yang keluar dari anod terbentuk pada suhu daripada 363 K hingga 353 K. Hal ini berlaku kerana pada kedua suhu tersebut aliran wap air didalam baki hidrogen mengalir keluar daripada anod berlebih untuk membentuk kelembapan relatif 100%. Air dalam hidrogen pada kelembapan relatif 100% adalah fasa wap dan bakinya adalah berupa cecair air. Suhu di bawah 363 dan 353 K, kelembapan relatif aliran yang mengalir keluar anod belum mencapai kelembapan maksimum 100% sehingga berada pada`fasa wap.



(a)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(b)

Rajah 4.17: Hubungan antara kelembapan relatif gas mengalir masuk ke dalam sisi anod dan konsentrasi cecair air pada aliran gas yang keluar dari sisi anod PEMFC: (a) suhu = 363 K dan (b) suhu = 353 K.

Pembentukan cecair air pada aliran gas yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 K berlaku pada nilai RHK antara 10% dan 80%. Pada keadaan ini, kepekatan minimum cecair air adalah antara 35% dan 70% RHA, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.17a. Pada suhu 353 K, pembentukan cecair air terjadi antara 10% dan 40% RHK. Pada keadaan ini, kepekatan cecair air minimum terbentuk pada nilai antara 60% dan 78% RHA, seperti yang ditunjukkan Rajah 4.17b.

4.6.6 Pembentukan Cecair Air pada ketumpatan arus berbeza

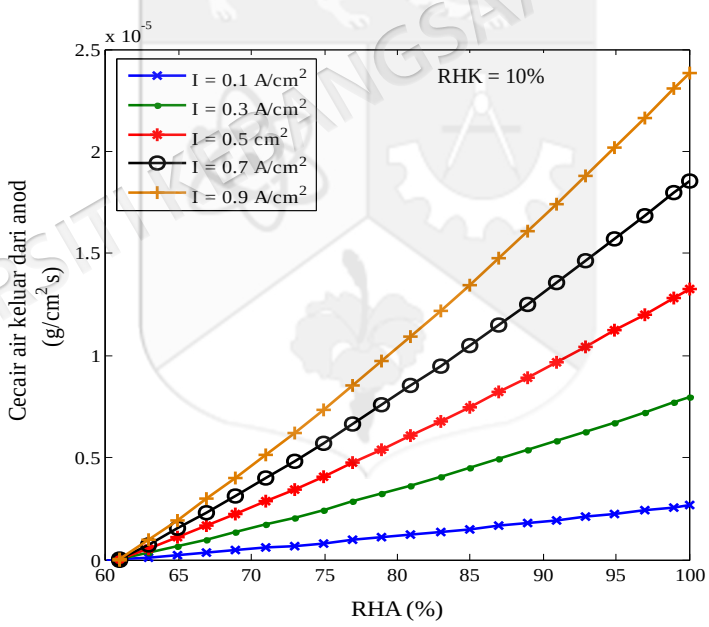
4.6.6.1 Pembentukan Cecair Air Mengalir Keluar Dari Sisi Anod

Rajah 4.18 dan 4.19 menunjukkan bahawa kenaikan nilai RHA menyebabkan peningkatan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod. Kenaikan nilai RHK mengakibatkan berlakunya penurunan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod. Kesan akibat berlakunya meningkatnya nilai RHK ialah berlakunya peningkatan purata kandungan air membran.

Kandungan air membran yang tinggi pada sisi anod menyebabkan banyaknya wap air yang berpindah bersama dengan proton pada fenomena EOD. Kesannya ini mengakibatkan jumlah cecair air mengalir keluar dari sisi anod menjadi berkurangan. Meningkatnya nilai ketumpatan arus daripada 0.1 Acm^{-2} kepada 0.9 Acm^{-2} menyebabkan peningkatan kepekatan hidrogen dan kandungan wap air yang disuap ke

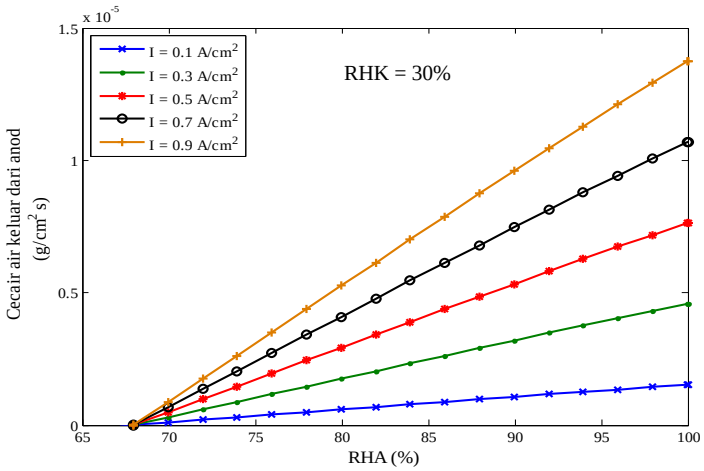
sisi anod. Peningkatan nilai ketumpatan arus juga diikuti oleh peningkatan nilai EOD dan penurunan resapan balik pada kondisi kajian ini. Namun peningkatan jumlah wap air yang mengalir masuk anod tidak mempengaruhi penurunan nilai pembentukan cecair air walau berlaku peningkatan nilai EOD, Akibatnya jumlah cecair air lebih besar berlaku pada sisi anod.

Rajah 4.18 menunjukkan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 353 K terbentuk pada nilai RHK daripada 10% hingga 30% dan RHA dalam julat 60% hingga 100%. Jika nilai RHK lebih daripada 30% dan RHA dibawah 60% total air yang mengalir keluar dari sisi anod masih belum melebihi kelembapan relatif 100% (diandaikan kelembapan relatif maksimum), akibatnya maka air yang mengalir keluar tersebut berada dalam fasa wap. Cecair air pada PEMFC mulai terbentuk ketika nilai RHA 60% pada nilai RHK 10% serta pada nilai RHA 68% dengan RHK sebesar 30%.



(a)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

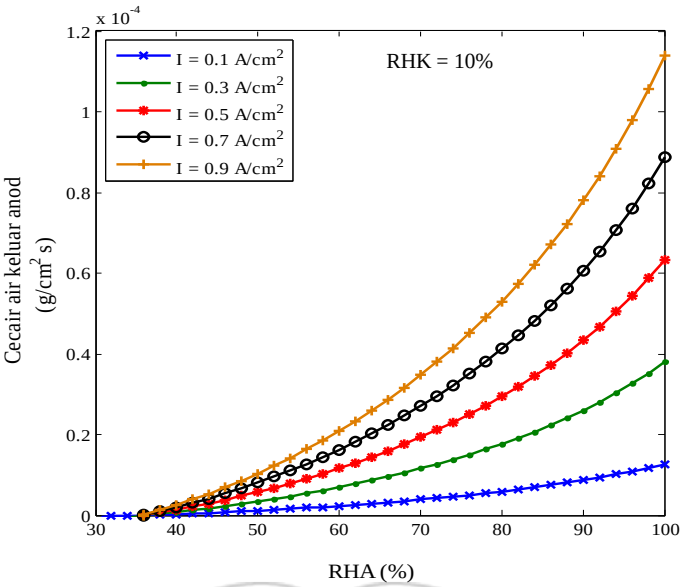


(b)

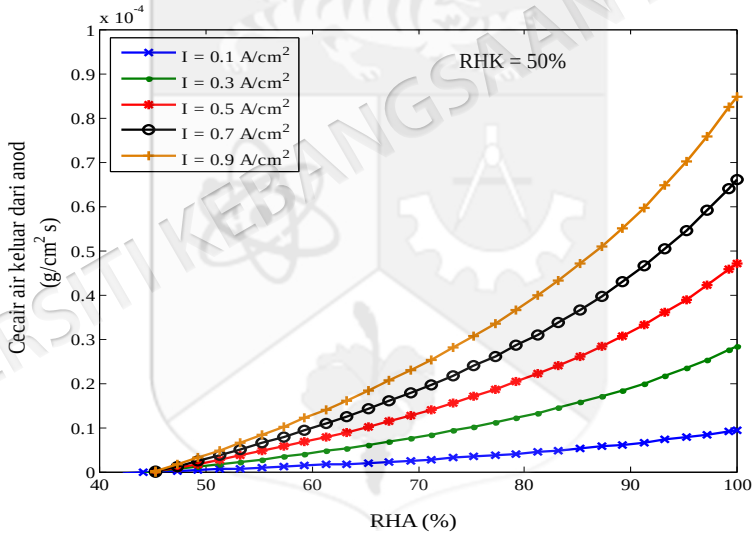
Rajah 4.18. Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 353 K. (a) RHK = 10% dan (b) RHK = 30%.

Rajah 4.19 menunjukkan pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 K dengan nilai RHK diubah daripada 10% kepada 70%. Air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap jika nilai RHK lebih besar daripada 70%. Kenaikan nilai RHK juga menjejaskan pembentukan cecair air pada nilai RHA yang lebih tinggi. Keadaan operasi adalah seperti berikut: RHK ialah 10% dan RHA ialah 35%, RHK ialah 50% dan RHA ialah 45%, dan RHK ialah 70% dan RHA ialah 55%. Jika nilai RHA di bawah keadaan operasi tersebut, maka air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap. Rajah 4.18 dan 4.19 menunjukkan bahawa aliran cecair air mengalir keluar dari sisi anod PEMFC terbentuk pada suhu 353 K hingga 363 K. Pada suhu di bawah 353 K, air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

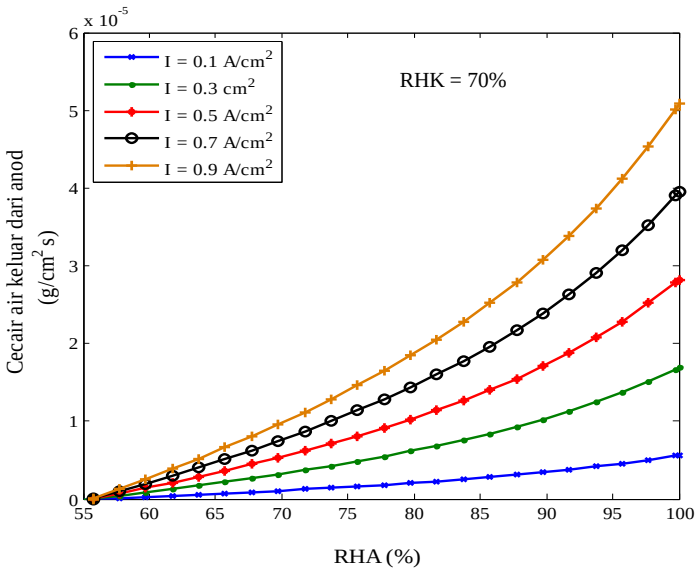


(a)



(b)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



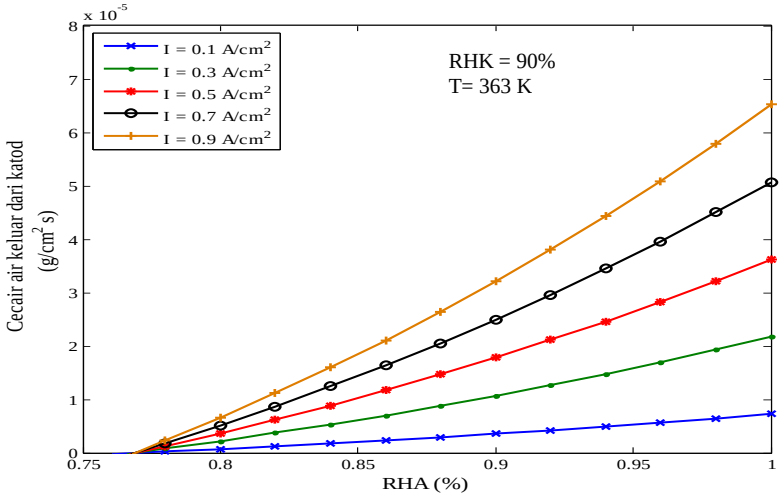
(c)

Rajah 4.19. Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 K dengan: (a) RHK = 10%, (b) RHK = 50% dan (c) RHK = 70%

4.6.6.2 Pembentukan Cecair Air Mengalir Keluar Dari Sisi Katod

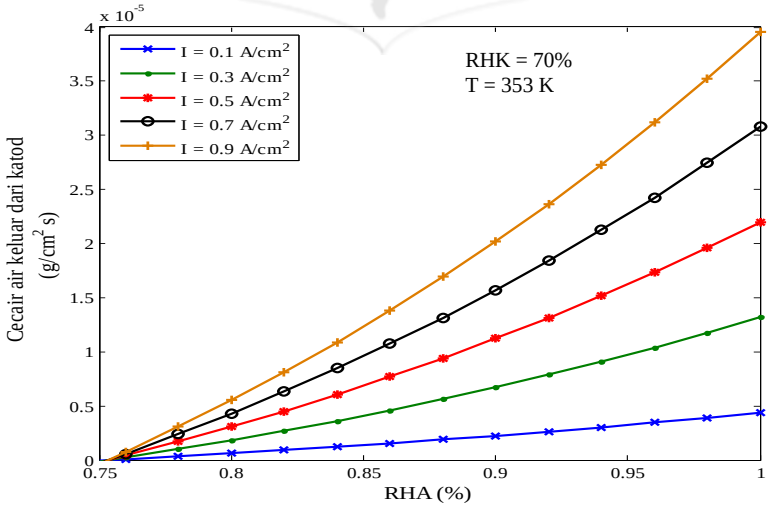
Rajah 4.20 menunjukkan bahawa kenaikan RHA mengakibatkan berlaku peningkatan pembentukan cecair air pada sisi katod. Peningkatan ini disebabkan berlakunya peningkatan nilai ketumpatan arus sehingga mengakibatkan meningkatnya jumlah air yang terbentuk oleh peristiwa tindak balas pada sisi katod. Pada suhu operasi 363 K, cecair air terbentuk pada sisi katod jika RHK ialah 90%. Di bawah nilai RHK ini, air yang mengalir keluar dari sisi katod pada setiap nilai ketumpatan arus berada dalam fasa wap. Air yang mengalir keluar dari sisi katod tersebut adalah dalam fasa wap jika ia mempunyai kelembapan relatif maksimum 100%. Pada suhu 363 K dengan RHK 90%, cecair air berlaku apabila RHA berada dalam julat 77% hingga 100%. Pembentukan cecair air bermula apabila nilai RHA ialah 77%. Nilai RHA dibawah77%, maka air yang mengalir keluar dari sisi katod berada dalam fasa wap.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



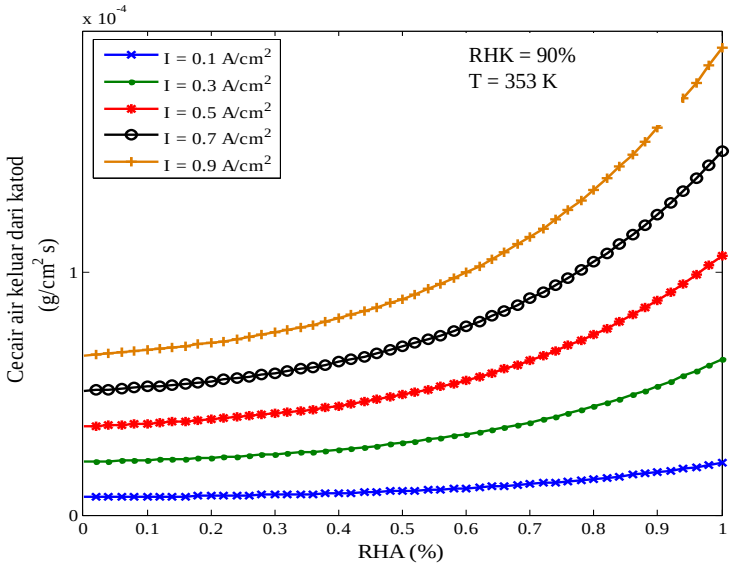
Rajah 4.20. Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air keluar daripada sisi katod pada suhu 363 K dan RHK adalah 90%

Rajah 4.21 menunjukkan pembentukan cecair air apabila mempunyai nilai RHK dalam julat 70% hingga 90%. Pada nilai RHK 70%, nilai RHA adalah dalam julat 75% hingga 100%. Cecair air bermula terbentuk pada sisi katod PEMFC adalah pada nilai RHK 75%, dan di bawah nilai ini air yang mengalir keluar dari sisi katod berada dalam fasa wap. Pada nilai RHK 90%, semua air yang mengalir keluar dari sisi katod adalah berada dalam fasa cecair. Hal ini berlaku kerana tingginya kandungan air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 90%. Kesannya yang ditimbulkan ialah langsung terbentuknya cecair air dan mengalir keluar dari sisi katod pada nilai RHA rendah.



(a)

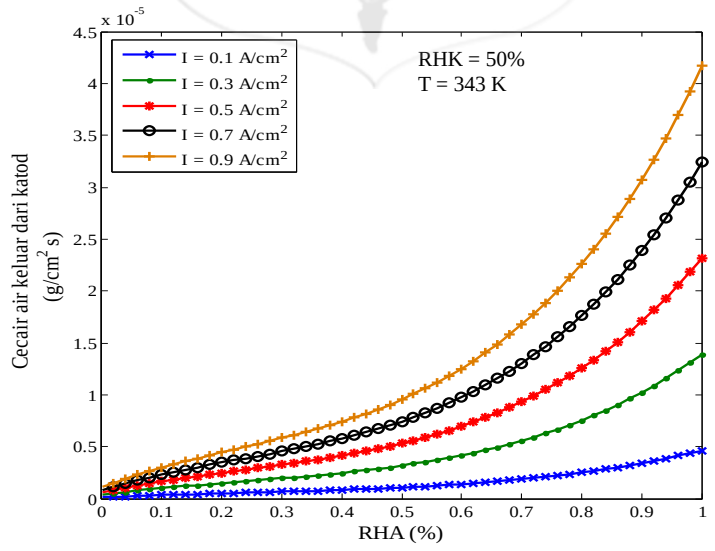
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(b)

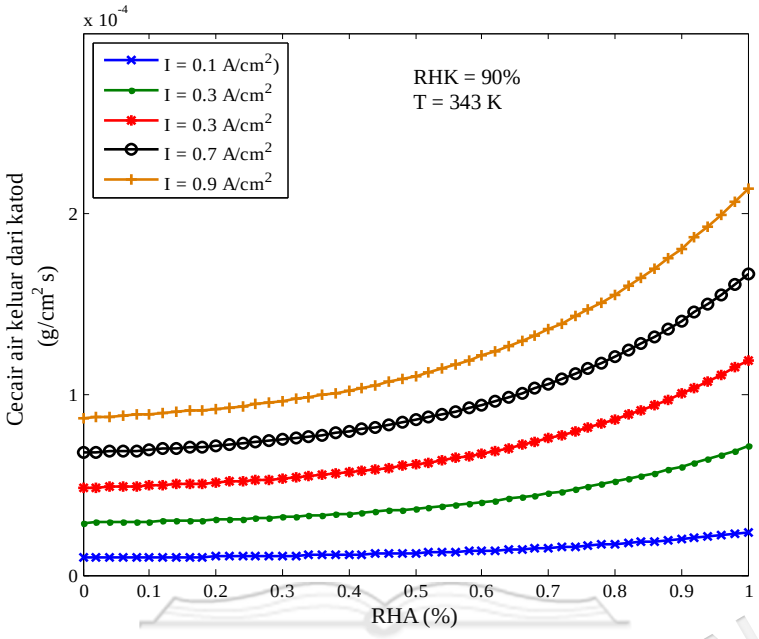
Rajah 4.21. Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 353 K pada nilai (a) RHK = 70% dan (b) RHK = 90%

Rajah 4.22 menunjukkan cecair air mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 343 K dan RHK daripada 50% hingga 90%. Pada keadaaan RHK ialah 50% dengan RHA 0%. keadaaan ini menggambarkan air yang mengalir keluar dari sisi katod memiliki nilai kelembapan relatif ialah 100% dan langsung berada dalam fasa cecair



(a)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

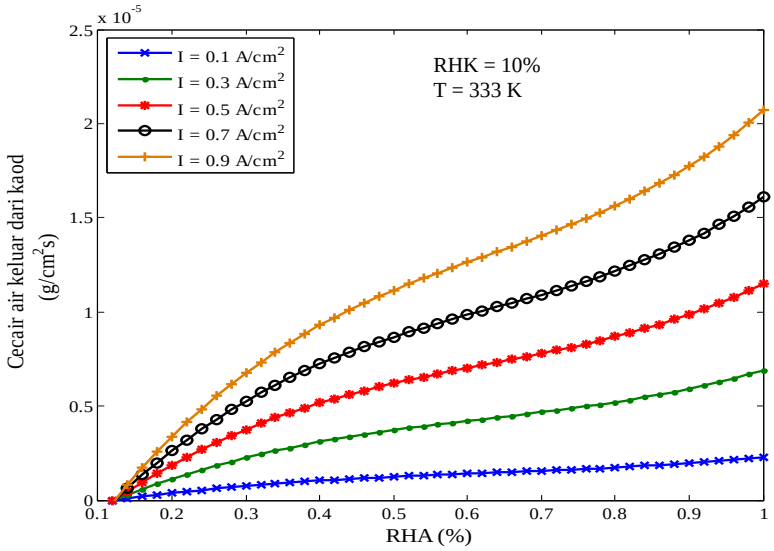


(b)

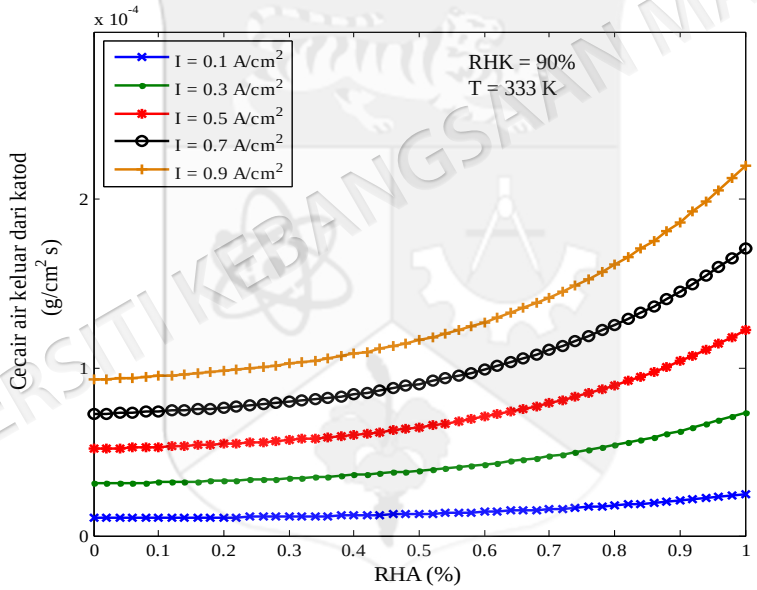
Rajah 4.22. Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 343 K dengan nilai (a) RHK = 50% dan (b) RHK = 90%

Rajah 4.23 menunjukkan pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 333K. Peningkatan nilai RHK menyebabkan jumlah pembentukan cecair air yang lebih besar. Cecair air yang terbentuk pada nilai RHK dalam julat 10% hingga 90% bagi semua nilai ketumpatan arus. Apabila nilai RHK ialah 10%, pembentukan cecair air berlaku dalam julat RHA 12% hingga 100%. Jika nilai RHA di bawah 12% maka air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap. Pada nilai RHK 90%, pembentukan cecair air berlaku dalam julat nilai RHA daripada 0 hingga100%. Cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod jika nilai RHK ialah 90%. Jumlah cecair air berbeza-beza dan bergantung pada nilai ketumpatan arus yang dihasilkan. Jumlah cecair air lebih tinggi berlaku apabila nilai ketumpatan arus yang dihasilkan ialah mempunyai nilai besar.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)



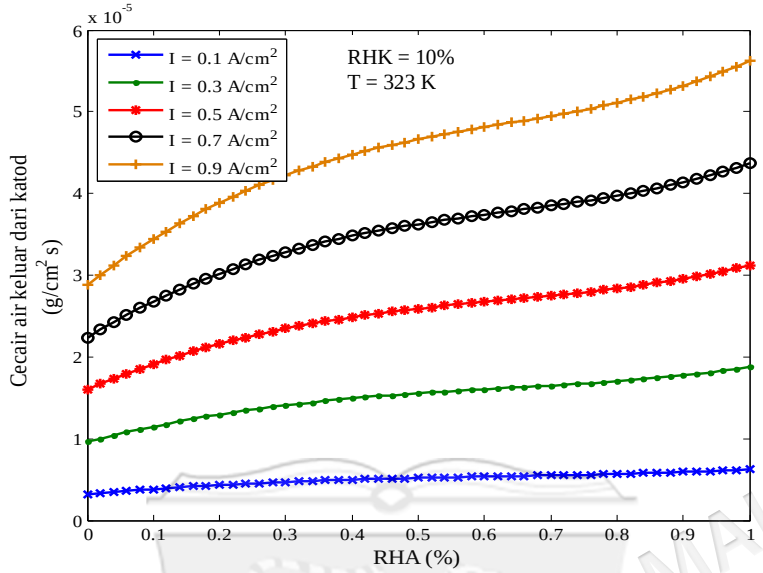
(b)

Rajah 4.23 Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air mengalir keluar dari sisi katod pada suhu 333 K pada nilai (a) RHK =10% dan (b) RHK = 90%

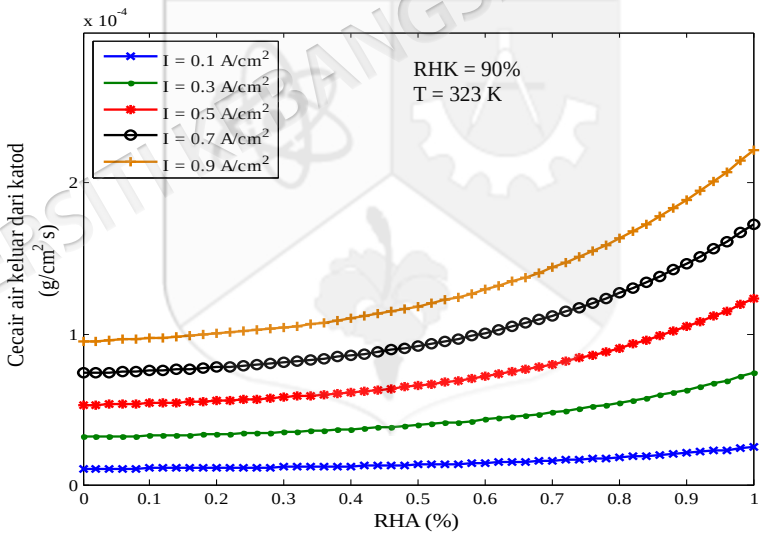
Rajah 4.24 menunjukkan pembentukan cecair air pada suhu 323 K. Pada keadaan ini, cecair air terbentuk pada nilai RHK dalam julat 10% hingga 90% dan nilai RHA dalam julat 0 hingga 100%. Cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod iaitu pada nilai RHA rendah. Jumlah cecair air yang terbentuk pada RHA yang lebih

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

rendah bergantung pada nilai ketumpatan arus. Semakin tinggi ketumpatan arus maka semakin besar jumlah cecair air mengalir keluar dari sisi katod PEMFC.



(a)



(b)

Rajah 4.24 Hubungan kelembapan relatif pada sisi anod terhadap cecair air keluar dari sisi katod pada suhu 323 K. dengan nilai (a) RHK = 10% dan (b) RHK = 90%

Rajah 4.20 hingga 4.23 menunjukkan bahawa apabila suhu operasi mengalami penurunan daripada 363K kepada 323 K, maka mengakibatkan cecair air terbentuk

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

pada nilai RHK semakin sedikit. Misalnya berlaku penurunan suhu daripada 363 K kepada 353 K, maka terbentuknya cecair air pada nilai RHK yang turun daripada 70 % kepada 50%. Semakin meningkat suhu operasi maka mengakibatkan penurunan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod PEMFC.

Sebaliknya, penurunan suhu operasi menyebabkan peningkatan jumlah cecair air yang terbentuk. Keadaan ini berlaku kerana pada suhu yang tinggi, jumlah wap air yang mengalir keluar bersama oksigen dari sisi katod untuk mencapai kelembapan 100% juga tinggi. Penurunan suhu operasi menyebabkan penurunan jumlah uap air dalam kelembapan relatif 100%, sehingga berpengaruh terhadap kenaikan cecair air.

4.7 PENGESAHAN HASIL SIMULASI

Hasil simulasi keseimbangan air yang diperoleh menggunakan simulink matlab dikesahkan dengan membandingkan terhadap penyelidikan lain yang telah dihasilkan.. Penyelidikan yang dibandingkan iaitu Cai et al.(2006), Yan et al (2005), Bonet et al (2008) dan Dai (2008). Parameter yang digunakan bahagi masing-masing penyelidikan ditunjukan oleh Jadual 4.3

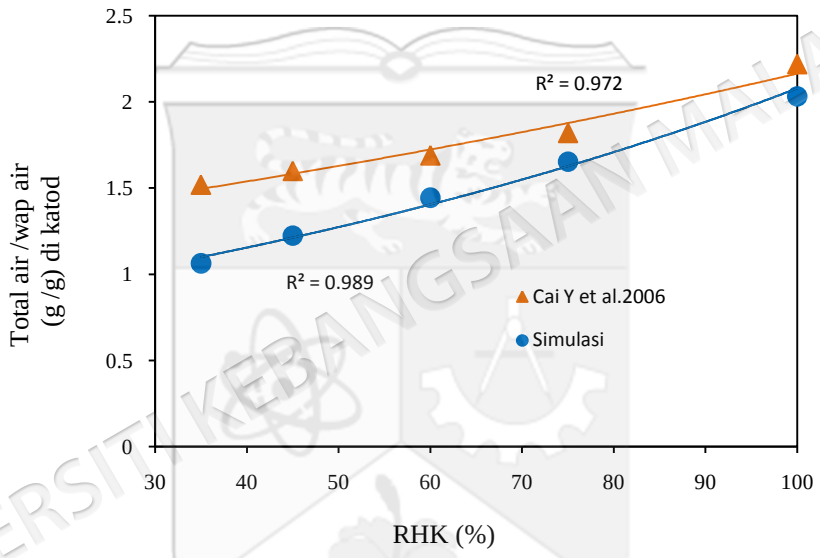
Jadual 4.3 Parameter yang digunakan untuk pengesahan hasil simulasi.

Parameter	**Cai et al (2006)**	**Yan et al (2005)**	**Bonet et al (2008)**	**Dai (2008)**
Tekanan anod (PA)	2 atm	1 atm	1.6 atm	1 atm
Tekanan Katod (PK)	2 atm	1 atm	1.6 atm	1 atm
Luas area (A)	128 cm^2	25 cm^2	25 cm^2	49 cm^2
Ketumpatan arus(I)	0.3 A cm^{-2}		0.54 A cm^{-2}	
Jenis membran	Nafion 115	Nafion 117		
Kelembapan relatif anod (RHA)	0	40%	70%	100%
Kelembapan relatif katod (RHK)	35–100 %	50%	70%	100%
Suhu (T)	333 K	353 K	343 K	343 K
Stoikiometri hidrogen	1.1	2	1.2	3
Stoikiometri oksigen	2.5	2	2.6	3
Beban pemangkin		1 mg cm^{-2}		

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

4.7.1 Kesahan terhadap penyelidikan Cai et al (2006)

Pada bahagian ini, uji kaji yang dilakukan iaitu mengetahui hubungan kelembapan relatif di katod terhadap total air berbanding wap air yang dihasilkan. Hasil simulasi berbanding penyelidikan Cai ditunjukan oleh Rajah 4.25. Kenaikan nilai kelembapan di katod mengakibatkan berlakunya kenaikan perbandingan jisim total air berbanding wap air di sisi katod . Hasil simulasi yang diperoleh menghasilkan trend yang sama dengan kajian Cai. Pada RHK yang tinggi selisih hasil simulasi berbanding kajian Cai semakin kecil.

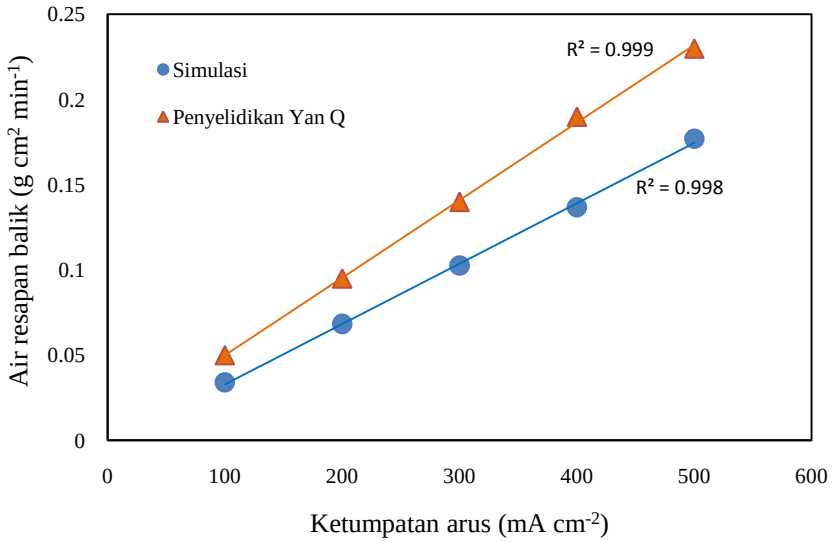


Rajah 4.25 Hasil simulasi berbanding penyelidikan Cai Y et al 2006.

4.7.2 Kesahan terhadap penyelidikan Yan et al (2005)

Hasil simulasi berbanding kajian yang dilakukan oleh Yan iaitu tentang perubahan nilai ketumpatan arus terhadap wap air yang meresap dari sisi katod ke anod. Perbandingan hasil kajian ditunjukan oleh Rajah 4.26. Kenaikan ketumpatan arus mengakibatkan berlakunya kenaikan resapan wap air dari sisi katod ke anod. Hasil simulasi kajian ini mempunyai nilai resapan balik lebih kecil berbanding penyelidikan yang dilakukan oleh Yan, tetapi trend yang ditunjukan kecenderungan adalah sama. Kenaikan ketumpatan arus mengakibatkan kenaikan selisih hasil simulasi berbanding penyelidikan Yan.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

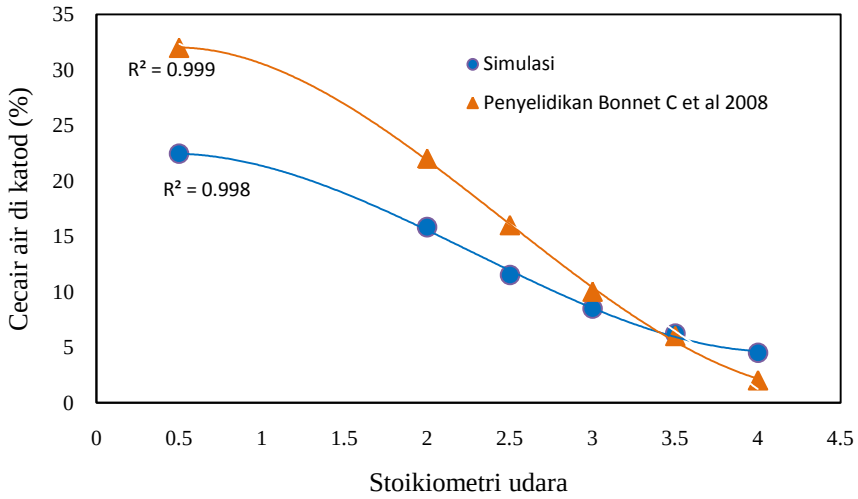


Rajah 4.26 Hasil simulasi berbanding penyelidikan Yan et al (2005)

4.7.3 Kesahan terhadap penyelidikan Bonnet et al (2008)

Perbandingan hasil simulasi terhadap penyelidikan Bonnet menunjukkan penggunaan nilai stoikiometri udara terhadap peratus cecair air di katod. Rajah 4.27 menunjukan bahawa kenaikan nilai stoikiometri mengakibatkan berlakunya penurunan peratus cecair air di katod. Peratus cecair air merupakan perbandingan jumlah cecair yang terbentuk terhadap jumlah air yang dihasilkan PEMFC di katod. Hal ini menunjukan bahawa kenaikan stoikiometri udara menyebabkan penurunan peratus cecair air atau berlakunya kenaikan jumlah cecair air. Hasil simulasi juga menunjukan trend yang sama terhadap kajian Bonnet. Stoikiometri 3.5 menunjukan peratus cecair air yang dihasilkan adalah sama. Di bawah 3.5 menunjukan hasil simulasi lebih rendah berbanding kajian Bonnet. Hal ini menunjukan bahawa jumlah cecair air yang dihasilkan berdasarkan simulasi lebih banyak berbanding Bonnet. Di atas stoikiometri 3.5 peratus cecair simulasi lebih tinggi yang menunjukan peubahan tindak balas pada simulasi sudah mencapai maksimum.

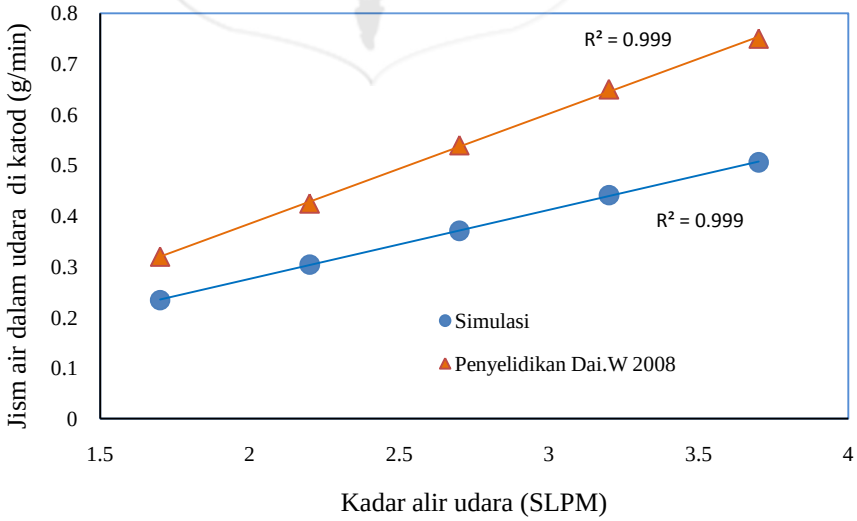
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 4.27 Hasil simulasi berbanding penyelidikan Bonnet et al (2008)

4.7.4 Kesahan terhadap penyelidikan Dai (2008).

Rajah 4.28 menunjukan perbandingan hasil simulasi terhadap penyelidikan yang dilakukan oleh Dai (2008). Kajian ini menggambarkan hubungan kadar alir udara yang mengalir masuk ke sisi katod terhadap jisim air dalam udara mengalir keluar daripada sisi katod. Hasil yang diperoleh menunjukan bahawa kenaikan kadar alir udara mengalir masuk katod menyebabkan kenaikan jisim air dalam udara mengalir keluar katod. Hasil simulasi mempunyai jisim air dalam udara mengalir keluar katod lebih kecil berbanding hasil penyelidikan Dai, tetapi memiliki trend yang sama.



Rajah 4.28 Hasil simulasi berbanding penyelidikan Dai et al (2008)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

4.8 KESIMPULAN

1. Kepekatan wap air yang mengalir masuk pada kedua sisi PEMFC iaitu sisi anod dan sisi katod meningkat apabila suhu operasi dan kelembapan relatif juga meningkat.
2. Peningkatan nilai kelembapan relatif pada aliran gas yang mengalir masuk ke dalam sisi anod dan sisi katod PEMFC menyebabkan berlakunya peningkatan nilai kepekatan air pada peristiwa EOD dan juga berlakunya peningkatan kepekatan wap air di dalam gas hidrogen pada sisi anod.
3. Kepekatan air pada sisi anod dan katod adalah sama ketika nilai RHK adalah 20% dan nilai RHA adalah 58%. Pada keadaan ini, tidak ada resapan air yang berlaku dalam sistem PEMFC.
4. Kepekatan minimum cecair air pada aliran gas yang mengalir keluar dari sisi katod berlaku pada nilai RHK daripada 45% hingga 89% dan suhu operasi sistem PEMFC daripada 343 K hingga 363 K.
5. Peningkatan kepekatan cecair air yang tinggi berlaku pada nilai RHK ialah 90% dan suhu operasi ialah 363 K. Oleh kerana itu, pengurusan air pada keadaan ini ialah sukar untuk dikawal.
6. Pada aliran keluar pada gas sisi anod, pembentukan cecair air terjadi pada suhu operasi 353 K dan 363 K. Sehingga peningkatan nilai RHK menyebabkan berlakunya pembentukan cecair air yang minimum.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB V

PRESTASI SEL TUNGGAL PEMFC MENGGUNAKAN HIDROGEN LANGSUNG

5.1 PENGENALAN

Cabaran utama yang dihadapi untuk mengkomersialkan sistem PEMFC iaitu terdiri daripada kos pembuatan, kebolehpercayaan dan jangka hayat sistem PEMFC. Sifat PEMFC sangat dipengaruhi oleh reka bentuk sistem yang optimum. Sistem PEMFC mesti disokong dengan menyediakan bekalan oksida (oksigen atau udara), bahan api (hidrogen), haba dan pengurusan air, kawalan proses dan peralatan (Le & Zhou 2008 dan Wu et al. 2008).

Banyak kegagalan yang dialami oleh sistem PEMFC iaitu meliputi berlakunya phenomena kebanjiran dalam laluan aliran gas, resapan air dari sisi katod ke sisi anod dan tidak terdapatnya penyepaduan haba dan pengurusan jisim semasa operasi sistem (Yan et al. 2006; Shimpalee et al. 2007; Liu & Eikerling 2008). Parameter utama sistem PEMFC ialah laju aliran bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC, kelembapan relatif, tekanan pada sisi anod dan sisi katod serta suhu sistem PEMFC. Parameter PEMFC tersebut merupakan faktor yang sangat menentukan prestasi sistem yang diperoleh. Parameter PEMFC tersebut tidak boleh berdiri sendiri dan setiap perubahan satu parameter mempengaruhi parameter lainnya.

Pada bahagian ini dilakukan kajian tentang pemodelan pada keadaan mantap terhadap prestasi PEMFC yang bersumber daripada hidrogen tulen dan udara sebagai oksidan. Fokus kajian ini ialah penggunaan asas termodinamik dengan melakukan pembangunan mengenai sistem pemodelan untuk mengoptimumkan prestasi sistem

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

PEMFC. Prestasi tersebut dinyatakan oleh nilai voltan dan ketumpatan kuasa yang dihasilkan sistem PEMFC. Nilai voltan boleh mengetahui jumlah perubahan keupayaan pada keadaan operasi dan beban yang berbeza. Fokus selanjutnya ialah mengetahui kesan parameter sistem yang terdiri daripada suhu dan tekanan operasi, kelembapan relatif, nisbah stoikiometri bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC dan jisim pemangkin terhadap nilai voltan dan ketumpatan kuasa yang dihasilkan sistem PEMFC.

5.2 REKA BENTUK PENYELIDIKAN

Penentuan prestasi sel tunggal PEMFC menggunakan proses yang ditujukan oleh Rajah 4.2. Prestasi sel tunggal PEMFC yang dihasilkan menggunakan bahan tindak balas yang diandaikan telah melewati pelembap luaran. Penentuan prestasi sel tunggal PEMFC ini ditentukan dengan melakukan variasi terhadap beberapa keadaan operasi seperti: kelembapan relatif di sisi anod dan katod, suhu dan tekanan PEMFC, nisbah stoikiometri hidrogen dan oksigen, jisim pemangkin dan pengesahan hasil yang diperoleh berbanding kajian lainnya.

5.3 MODEL MATEMATIK PADA PRESTASI PEMFC.

Prinsip termodinamik berguna untuk mempelajari perubahan kuasa dari suatu bentuk ke bentuk lainnya. Pada proses reka bentuk sistem PEMFC, prestasi yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti suhu dan tekanan operasi, kelembapan relatif, kerencaman bahan tindak balas mengalir masuk ke dalam sel, nisbah stoikiometri bahan tindak balas dan faktor lainnya seperti ketulenan, umur sel fuel, jisim pemangkin yang digunakan dan lainnya.

Nilai voltan pada masing-masing sel pada sistem PEMFC ditentukan berdasarkan nilai maksimum voltan sel dan kehilangan voltan. Kehilangan voltan pada PEMFC meliputi kehilangan voltan yang diakibatkan oleh pengaktifan (a*ctivation*), ohm (ohmic) , kepekatan (*concentration*) dan kehilangan arus dalam. Kerugian arus dalam bentuknya menyepadukan dengan kehilangan voltan. Nilai voltan sel pada kendalian sistem PEMFC (Mert et al. 2012) iaitu:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$V_{operasi} = V_{rev} - V_{irrev} \quad (5\text{-}1)$$

$$V_{irrev} = V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (5\text{-}2)$$

5.3.1 Voltan Sel Boleh Balik (V_{rev})

Voltan sel boleh balik ialah keupayaan maksimum PEMFC secara teori yang diperoleh pada suhu dan tekanan tertentu. Pada keadaan tersebut sel fuel bebas daripada beban. Perubahan tenaga bebas gibss merupakan ukuran kerja elektrik maksimum suatu sistem yang boleh dicapai pada suhu dan tekanan tetap daripada suatu tindak balas. Hubungan antara kerja elektrik maksimum W_{el} dengan tenaga bebas gibbs untuk suatu proses ialah:

$$W_{el} = -\Delta G \quad (5\text{-}3)$$

Tenaga bebas gibbs ialah tenaga yang tersedia untuk melakukan kerja luaran, dengan mengabaikan setiap kerja yang dilakukan oleh perubahan tekanan dan isipadu. Berdasarkan hukum kedua termodinamik, kerja elektrik maksimum boleh ditulis menjadi:

$$W_{el} = -\Delta G = -(\Delta H - T\Delta S) \quad (5\text{-}4)$$

ΔG_f merupakan perubahan tenaga bebas gibbs untuk pembentukan yang nilainya sama dengan tenaga di produk $\Delta G_f^{product}$ dikurang tenaga di bahan tindak balas $\Delta G_f^{reactan}$ dan boleh dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\Delta G_f = \Delta G_f^{produc} - \Delta G_f^{reactan} \quad (5\text{-}5)$$

Persamaan (5-5) mengandaikan bahawa tindak balas kimia dalam sel fuel adalah boleh balik dan semua tenaga bebas gibbs diubah menjadi tenaga elektrik. Jika tindak balas kimia mempunyai nilai ΔG negatif maka tindak balas tersebut terjadi secara spontan. Tetapi jika positif maka tindak balas yang terjadi ialah sebaliknya. Jika ΔG

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

sama dengan sifar maka tindak balas berada dalam kesetimbangan. Pada sistem PEMFC tindak balas terjadi kerana adanya pemangkin yang nilai ΔG tindak balas selalu negatif. Sedangkan untuk nilai entropy pembentukan ialah:

$$\Delta S_f = \Delta S_f^{produc} - \Delta S_f^{reactan} \quad (5\text{-}6)$$

Nilai entalpi dan entropi pembentukan untuk PEMFC dan ditunjukkan oleh jadual 5.1 berikut (Barbier 2005):

Jadual 5.1 Nilai entalpi dan entropi pembentukan pada PEMFC

Komponen	H_f (Kj/mol)	S_f(Kj/mol K)
H_2	0	0.13066
O_2	0	0.20517
$H_2O_{(g)}$	-286.02	0.06996

Sumber: diolah daripada Barbier 2005

Secara amnya kerja elektrik juga merupakan nilai dari *charge* (cas) Q yang melewati potensi elektrik *E* yang dinyatakan oleh :

$$W_{el} = EQ \quad (5\text{-}7)$$

Total *charge* Q berpindah pada tindak balas PEMFC untuk tiap satu mol hidrogen yang digunakan ialah:

$$Q = n\, N_{avg}\, Q_{el} \quad (5\text{-}8)$$

Nilai n adalah 2 elektron per molekul.

Bilangan Avogadro N_{avg} dan *charge* Q untuk satu molekul diketahui merupakan pemalar Faraday, sehingga kerja elektrik boleh ditulis menjadi:

$$W_{el} = nFE \quad (5\text{-}9)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Dengan melakukan pergantian persamaan (5-3) dengan persamaan (5-9), maka nilai keupayaan secara teori untuk PEMFC ialah:

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \tag{5-10}$$

Atau

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) \tag{5-11}$$

Pada keadaan piawai maka nilai keupayaan elektrik PEMFC (Chen & Peng 2008) ialah:

$E = \frac{-\Delta G_f^o}{nF} = \frac{237.340}{2\ molx\ \ 96{,}485}\frac{Kj\,mol^{-1}}{C mol^{-1}} = 1.229V$ pada suhu 25^{0}C dan tekanan 1 atm

Nilai keupayaan elektrik berubah dengan berubahnya suhu operasi. Menurut C. Spiegel (2008) bahawa andaian perubahan entalpi tidak berubah dengan perubahan suhu, maka nilai potensi elektrik sebagai fungsi suhu ialah:

$$E = -\frac{\Delta G_{rxn}}{nF} = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right)$$

menjadi :

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dT}\right)(T - 298.15) = \frac{\Delta S}{nF}\ (T - T_0)$$

T = suhu PEMFC (K) dan T_0 = suhu rujukan (K)

Maka potensi elektrik sebagai fungsi suhu (E_T) adalah:

$$E_T = E^0 + \frac{\Delta S}{nF}\ (T - T_0) \tag{5-12}$$

Voltan boleh balik untuk PEMFC ialah (Chen & Peng 2008; Placca et al. 2009; Shaker 2011):

$$V_{rev} = E_T + \frac{RT}{nF} ln\left(\frac{P_{H_2} x \left(P_{O_2}{}^{0.5}\right)}{P_{H_2O}}\right) \tag{5-13}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Nilai keupayaan elektrik pada keadaan piawai ialah

$$E^0 = -\frac{\Delta G_f^0}{nF}$$

Maka nilai keupayaan elektrik PEMFC berdasarkan persamaan (5-12) ialah:

$$E_T = -\frac{\Delta G_f^0}{nF} + \frac{\Delta S}{nF}\,(T - T_0)$$

$$E_T = 1.229V + \frac{-\frac{165.25j}{mol\ K}}{2\ x\ 96487\frac{C}{mol}}\ E_T = 1.229V - 0.85\ x\ 10^{-3}(T - T_0)V/K \quad (5\text{-}14)$$

Maka nilai voltan boleh balik pada PEMFC dengan mengganti persamaan (5-14) ke persamaan (5-13) menjadi:

$$V_{rev} = 1.229V - 0.85\ x\ 10^{-3}(T - T_0) + \frac{RT}{nF} ln\left(\frac{P_{H_2} x \left(P_{O_2}{}^{0.5}\right)}{P_{H_2O}}\right)$$

Dengan mengandaikan bahawa tekanan separa adalah 1 atm kerana air berada dalam fasa cecair, maka:

$$V_{rev} = 1.229V - 0.85\ x\ 10^{-3}(T - T_0) + 4.31\ x\ 10^{-5}\ x\ Tx \ln\left(P_{H_2} x \left(P_{O_2}{}^{0.5}\right)\right) \quad (5\text{-}15)$$

5.3.2 Voltan Pengaktifan (V_{act})

Pada sistem PEMFC tindak balas elektrokimia berlangsung pada permukaan elektrolit dan elektron berpindah melewati elektrolit tersebut. Kehilangan voltan pengaktifan pada sistem PEMFC disebabkan oleh kelambatan tindak balas mengambil tempat pada permukaan elektrod. Hal ini berlaku kerana sel pada PEMFC memerlukan tenaga untuk menghasilkan perpindahan elektron sehingga adanya upaya untuk memecah dan membentuk ikatan kimia baharu pada sisi anod dan sisi katod (Kunusch et al. 2010). Tindak balas pada elektrod ialah tindak balas pengoksidaan hidrogen dan tindak balas pengurangan oksigen, dinyatakan sebagai berikut:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$Red \rightarrow Ox + ne^- \quad (5\text{-}16)$$

$$Ox + ne^- \rightarrow Red \quad (5\text{-}17)$$

Pada sistem PEMFC, pada sisi anod berlaku tindak balas pengoksidaan hidrogen sedangkan pada sisi katod berlaku tindak balas pengurangan oksigen dan menghasilkan air. Kedua phenomena tersebut terjadi secara serentak pada elektrod PEMFC, sehingga boleh ditulis menjadi:

$$O_2 + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow 2H_2O \quad (5\text{-}18)$$

Berdasarkan persamaan (5-18) boleh dibuat persamaan untuk kadar tindak balas:

$r_{O_2} = k_f C_{O_2}$ untuk tindak balas ke hadapan (5-19)

$r_{H_2} = k_b C_{H_2}$ untuk tindak balas mundur (5-20)

Kadar tindak balas ialah:

$$r = r_f - r_b \quad (5\text{-}21)$$

Dengan bentuk asas persamaan maka kadar tindak balas ialah:

$$r = \frac{i}{nF} \quad (5\text{-}22)$$

Dengan mengganti persamaan (5-21) kepada (5-22), maka nilai ketumpatan arus adalah:

$$i = nF(r_f - r_b)$$

$$i = nF(k_f C_{O_2} - k_b C_{H_2}) \quad (5\text{-}23)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Pada keadaan kesetimbangan, *net current* (selisih arus setelah dikurangi) besarnya adalah sifar, walaupun pada sistem PEMFC tindak balas terjadi secara serentak. akibatnya adalah:

$$r = k_f C_{O_2} - k_b C_{H_2} = \frac{i_c}{nF} - \frac{i_a}{nF} \tag{5-24}$$

Nilai tersebut boleh dikatakan sebagai perubahan ketumpatan arus (*exchange current density*). Keadaan ini boleh dinyatakan sebagai berikut:

$i_c = i_a \; dan \; r_f = r_b$

Sehingga:

$k_f C_R = k_b C_O$

$$\ln(k_b) - \ln(k_f) = ln\left(\frac{C_R}{C_O}\right) = \frac{F}{RT}(E - E^0)$$

Boleh disederhanakan menjadi bentuk pertama:

$$\frac{RT}{F}\left[\frac{d}{dE}\ln(k_b) - \frac{d}{dE}\ln\left(\frac{1}{k_f}\right)\right] = 1 \tag{5-25}$$

Pada kes tindak balas perpindahan elektron yang bentuknya ditujukan oleh persamaan (5-25) yang dua bentuknya dijumlahkan menjadi satu disebut dengan faktor simetri (Barbir et al. 2005).Untuk factor simetri reduktif (pengurangan oksigen) dinyatakan dengan α, maka:

$$\frac{RT}{F}\frac{d}{dE}\ln\left(\frac{1}{k_f}\right) = \alpha \tag{5-26}$$

Boleh disederhanakan menjadi:

$$\ln\left(\frac{1}{k_f}\right) = \frac{\alpha \mathrm{FE}}{\mathrm{RT}} + \mathrm{c} \tag{5-27}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Sedangkan simetri oksidatif ialah: $1 - \alpha$

$$\frac{RT}{F}\frac{d}{dE}\ln(k_b) = 1 - \alpha \quad (5\text{-}28)$$

Boleh disederhanakan menjadi:

$$\ln(k_b) = \frac{(1-\alpha)\mathrm{FE}}{\mathrm{RT}} + \mathrm{c} \quad (5\text{-}29)$$

Nilai k_f Untuk kondisi piawai ialah: $k_f = k_{f,0}$, $k_b = k_{b,0}$ dan $E = E_0$

Persamaan (5-27) dan (5-29) boleh diubah menjadi:

$$k_f = k_{f,0}\exp\left(\frac{-\alpha\mathrm{FE}}{\mathrm{RT}}\right) \quad (5\text{-}30)$$

Dan

$$k_b = k_{b,0}\exp\left(\frac{(1-\alpha)\mathrm{FE}}{\mathrm{RT}}\right) \quad (5\text{-}31)$$

Dengan mengganti persamaan (5-30) dan (5-31) ke dalam persamaan (5-23) yang disebut juga sebagai persamaan Butler Volmer, maka kadar tindak balas di sel ialah:

$$i = nF\left(k_{f,0}\exp\left(\frac{-\alpha\mathrm{FE}}{\mathrm{RT}}\right)C_{O_2} - k_{b,0}\exp\left(\frac{(1-\alpha)\mathrm{FE}}{\mathrm{RT}}\right)C_{H_2}\right) \quad (5\text{-}32)$$

Pada kondisi kesetimbangan dianggap bahawa $k_{f,0} = k_{b,0} = k_0$

$$nF\left(k_0\exp\left(\frac{-\alpha\mathrm{FE_r}}{\mathrm{RT}}\right)C_{O_2}\right) = nF\left(k_0\exp\left(\frac{(1-\alpha)\mathrm{FE_r}}{\mathrm{RT}}\right)C_{H_2}\right) = i_0 \quad (5\text{-}33)$$

$$\left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right) = \exp\left(\frac{\mathrm{FE_r}}{\mathrm{RT}}\right) \quad (5\text{-}34)$$

Dengan memasukan persamaan (5-34) ke dalam persamaan (5-33), maka nilai perubahan ketumpatan arus ialah:

$$i_0 = nFk_0\,C_{H_2}\exp\left(\frac{\mathrm{nFE_r}}{\mathrm{RT}}\;\frac{-\alpha\mathrm{nFE_r}}{\mathrm{RT}}\right)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$i_0 = nFk_0 C_{H_2} \left[\exp \ln \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right) \exp(-\alpha) \mathrm{n} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right)\right] \quad (5\text{-}35)$$

$$i_0 = nFk_0 C_{H_2} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right) \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right)^{-\alpha}$$

$$i_0 = nFk_0 C_{O_2} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{H_2}}\right)^{-\alpha}$$

$$i_0 = nFk_0 {C_{O_2}}^{(1-\alpha)} {C_{H_2}}^{\alpha} \quad (5\text{-}36)$$

Jika persamaan (5-36) berbanding dengan ketumpatan arus rujukan $(i_{0,ref})$ adalah:

$$\frac{i_0}{i_{0,ref}} = K_0 \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}}\right)^{(1-\alpha)} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}}\right)^{\alpha} \quad (5\text{-}37)$$

Jika $k = A\ exp \frac{E_c}{RT}$

Jika $\frac{k_0}{k_{0,ref}} = K_0$, nilainya pada suhu tertentu jika berbanding dengan suhu rujukan ialah:

$$K_0 = exp \frac{E_c}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_{ref}}\right)$$

Persamaan (5-37) boleh menjadi:

$$i_0 = i_{0,ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}}\right)^{(1-\alpha)} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}}\right)^{\alpha} exp \frac{E_c}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_{ref}}\right) \quad (5\text{-}38)$$

Nilai i_0 tersebut dipengaruhi oleh luas permukaan tindak balas per unit isipadu lapisan pemangkin (a) . Menurut Scott & Mamlouk 2009 nilainya ialah:

$$i_0 = a i_{0,ref} \left(\frac{C_R}{C_{R,ref}}\right)^{\propto} exp \frac{E_c}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_{ref}}\right) \quad (5\text{-}39)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jika $\frac{C_R}{C_{R,ref}} = \frac{P_R}{P_{R,ref}}$

R ialah bahan tindak balas (hidrogen dan oksigen)

Persamaan (5-38) boleh ditulis menjadi:

$$i_0 = i_{0,ref}\left(\frac{P_R}{P_{R,ref}}^{\gamma}\right) exp\frac{E_c}{RT}\left(1-\frac{T}{T_{ref}}\right) \quad (5\text{-}40)$$

Nilai i_0 tersebut dikesan oleh luas permukaan tindak balas ideal per unit isipadu lapisan pemangkin (a) (Thampan et al. 2001; Song et al. 2004; Shan & Choe 2005)

Bentuk persamaan (5-40) boleh diubah menjadi:

$$i_0 = ai_{0,ref}\left(\frac{P_R}{P_{R,ref}}^{\gamma}\right) exp\frac{E_c}{RT}\left(1-\frac{T}{T_{ref}}\right) \quad (5\text{-}41)$$

E_c = 76.5 Kj/mol (Wei Suna 2005)

Menurut Song et al. (2004) bahawa nilai a ialah

$$a = a_0\frac{m_{pt}}{L} \quad (5\text{-}42)$$

Sedangkan menurut Song et al. (2005) nilai a_0 ialah:

$$a_0 = 10^8(4.4198Y^9 - 27.691Y^8 + 74.206Y^7 - 111.06Y^6 + 101.43Y^5 - 57.841Y^4 + 20.231Y^3 - 4.089Y^2 + 0.39451Y) \quad (5\text{-}43)$$

Dengan Y= % pemangkin Pt yang mempunyai nilai dalam julat 0 hingga 100%.

Menurut Inoue et al. (2006) dan Song et al. (2004) nilai ketumpatan arus rujukan ialah:

$$i_{0,ref} = 10^{\left(3.057-\frac{4001}{T}\right)} \quad (5\text{-}44)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Nilai ketumpatan arus berdasarkan persamaan (5-32) ialah:

$$i = nFk_0\left(C_{O_2}\exp\left(\frac{-\alpha FE}{RT}\right) - C_{H_2}\exp\left(\frac{(1-\alpha)FE}{RT}\right)\right) \quad (5\text{-}45)$$

Jika nilai i berbanding i_0 pada persamaan (5-35) ialah:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{nFk_0\left(C_{O_2}\exp\left(\frac{-\alpha FE}{RT}\right) - C_{H_2}\exp\left(\frac{(1-\alpha)FE}{RT}\right)\right)}{nFk_0\left(C_{O_2}\exp\left(\frac{-\alpha FE_r}{RT}\right)\right)}$$

$$\frac{i}{i_0} = \frac{C_{O_2}}{C_{O_2}}\left(\exp\left(\frac{-\alpha FE}{RT}\right) + \left(\frac{\alpha FE_r}{RT}\right)\right) - \left(\exp\left(\frac{-\alpha FE}{RT}\right) + \left(\frac{\alpha FE_r}{RT}\right)\right) \quad (5\text{-}46)$$

Nilai $E - E_r = \eta_{act}$, maka nilai $\frac{i}{i_0}$ menjadi:

$$\frac{i}{i_0} = \exp\left(\frac{-\alpha F\eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha F\eta_{act}}{RT}\right)$$

$$\frac{i}{i_0} = \exp\left(\frac{\alpha F(-\eta_{act})}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\alpha F(-\eta_{act})}{RT}\right)$$

$$\frac{i}{i_0} = \exp\left(\frac{\alpha F(V_{act})}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\alpha F(V\eta_{act})}{RT}\right)$$

$$i = i_0\exp\left(\frac{\alpha F(V_{act})}{RT}\right) - i_0\exp\left(\frac{\alpha F(V\eta_{act})}{RT}\right)$$

$$i = 2i_0\sin h\left(\frac{\alpha F(V_{act})}{2RT}\right)$$

$$V_{act} = \frac{RT}{2\alpha F}\sin h^{-1}\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (5\text{-}47)$$

Nilai voltan pengaktifan ialah (Görgün et al. 2006; Kunusch et al. 2010):

$$V_{act} = \frac{RT}{n\alpha F}\ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad dimana\ i > i_0 \quad (5\text{-}48)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Menurut Görgün et al. (2006) besarnya nilai i_0 bergantung kepada suhu, tekanan, jenis pemangkin yang digunakan, luas permukaan tertentu dan muatannya (*loading*). Nilai i_0 ini nilainya ialah 10^{-2} A hingga 10^{-8} A. Berdasarkan persamaan (5-48) boleh didapat nilai pemalar Tafel iaitu:

$$b = \frac{RT}{n\alpha F} \tag{5-49}$$

Pada rancangan model sistem PEMFC, nilai pemalar Tafel berdasarkan data penyelidikan yang dilakukan oleh Mann et al. (2006) ialah:

$$b = 0.1937\ e^{-2.197(\alpha)} \tag{5-50}$$

α ialah pekali pertukaran, yang nilainya adalah (Zhang et al. 2008):

$$\alpha = \left(0.001552 RH_{c,masuk} + 0.000139\right)T \tag{5-51}$$

$RH_{c,masuk}$ ialah kelembapan relatif yang mengalir masuk ke dalam sisi katod PEMFC.

Pada sistem PEMFC kelebihan upaya yang ditimbulkan akibat kinetik tindak balas di sisi anod dan di sisi katod. Kes ini disebabkan kerana lambatnya pengurangan oksigen pada sisi katod. Kehilangan voltan akibat kelebihan upaya pengaktifan secara amnya lebih dominan berlaku pada sisi katod (Chen & Peng 2008).

5.3.3 Voltan Ohm (V_{ohm})

Kehilangan yang disebabkan oleh tahanan ohm berlaku di membran dan lapisan pemangkin dan merupakan fungsi suhu dan kelembapan (Scott & Mamlouk 2009). Jumlah kehilangan voltan di dalam PEMFC ialah merupakan fungsi linier (Abdellah 2012). Besarnya nilai voltan ohm menurut (Kunusch et al. 2010) ialah:

$$V_{ohm} = i\ R_{ohm} \tag{5-52}$$

Sedangkan nilai R_{ohm}

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \tag{5-53}$$

Nilai kekonduksian membran ialah (Shan & Choe 2005; Zhang et al. 2010):

$$\sigma_m = (0.005139\lambda_m - 0.003260)exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \tag{5-54}$$

Besarnya nilai kandungan air membran adalah:

$$\lambda_m = 0.048 + 17.81RH - 39.83RH^2 + 39.85RH^3 \tag{5-54a}$$

a adalah merupakan purata kelembapan nisbi di dalam stek PEMFC.

5.3.4 Voltan Kepekatan (V_{conc})

Kehilangan keupayaan kepekatan di dalam PEMFC berlaku akibat tindak balas pada elektrod dihalang oleh perpindahan jisim bahan tindak balas di dalam PEMFC (Abdellah 2012). Pada kes ini berlakunya kekurangan bahan tindak balas yang diperlukan untuk melakukan tindak balas. Nilai keupayaan kepekatan menurut (Shaker 2011) ialah:

$$V_{conc} = c\ ln\left(\frac{i_L}{i_L - 1}\right) \tag{5-55}$$

c ialah pemalar kehilangan oleh kepekatan. Besarnya nilai c ialah:

$$c = \frac{RT}{nF} \tag{5-56}$$

Maka nilai keupayaan kepekatan ialah:

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF}\ ln\left(\frac{i_L}{i_L - 1}\right) \tag{5-57}$$

i_L ialah nilai maksimum ketumpatan arus yang boleh di nyatakan oleh PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Besarnya nilai had ketumpatan arus yang dimiliki oleh stek PEMFC ialah (C. Spiegel 2008)

$$i_L = nFh_m \left(\frac{c_{O_{2,in}} - c_{O_{2,out}}}{ln \frac{c_{O_{2,in}}}{c_{O_{2,out}}}} \right) \quad (5\text{-}58)$$

$c_{O_{2,in\ dan\ out}}$ ialah kepekatan oksigen yang mengalir masuk dan keluar PEMFC (mol)

h_m ialah pekali perpindahan jisim olakan. Nilai pekali perpindahan jisim olakan ialah (B. Tavakoli 2011):

$$h_m = \frac{Sh_f D_{ij}}{H_c} \quad (5\text{-}59)$$

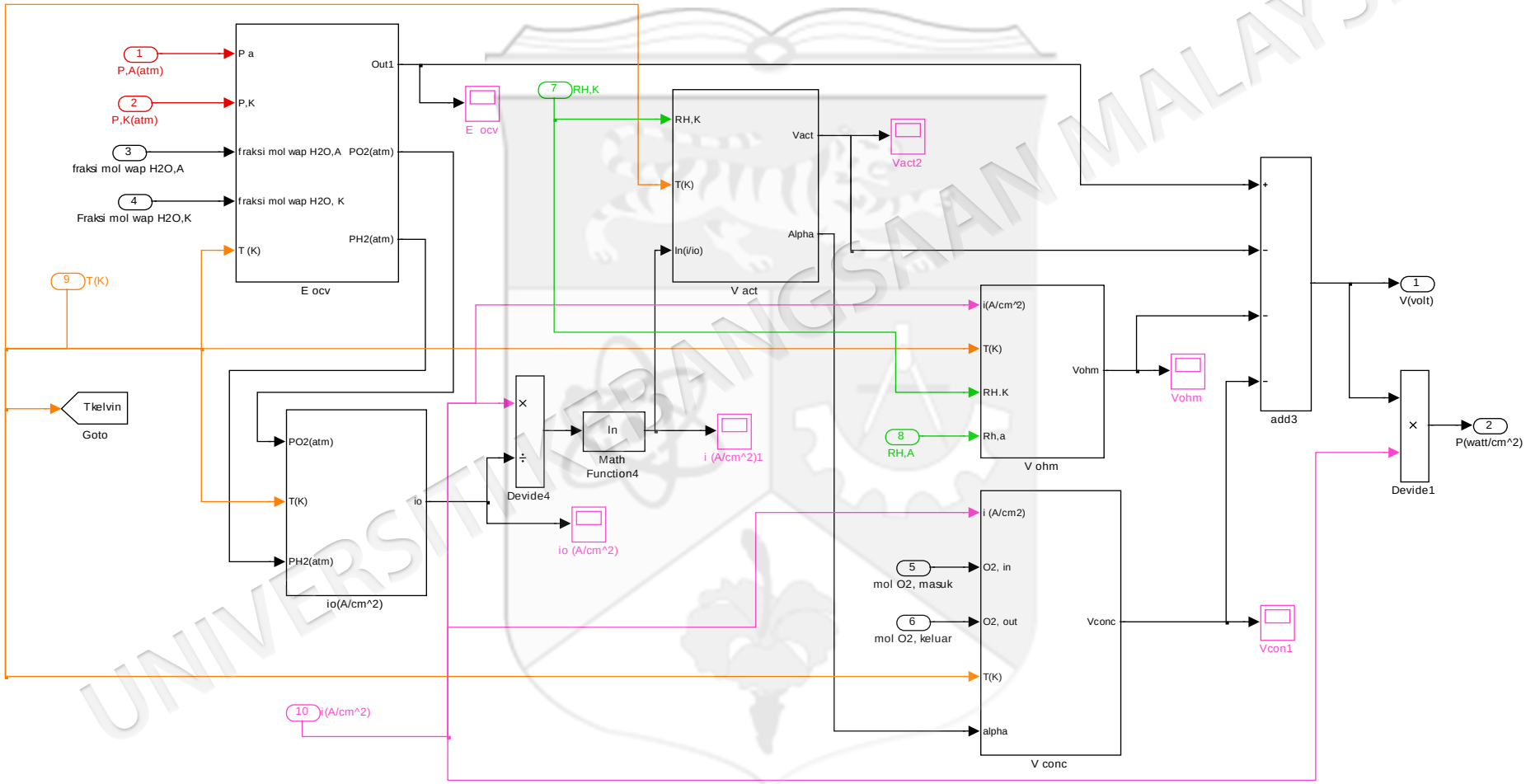
Gambaran tentang prestasi PEMFC secara amnya dinyatakan oleh lengkungan polarisasi yang menjelaskan hubungan antara nilai ketumpatan arus terhadap voltan sel yang dihasilkan. Semua hubungan tersebut boleh menggunakan persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya.

5.4 SIMULASI PRESTASI SEL TUNGGAL PEMFC

Simulasi penentuan prestasi sel tunggal ini menggunakan imbangan jisim untuk mengetahui voltan dan ketumpatan arus yang di hasilkan PEMFC. Rajah 5.1 hingga 5.6 berikut merupakan pembangunan simulasi yang terdiri daripada simulasi penentuan prestasi sel tunggal PEMFC.Langkah ini disokong dengan melakukan simulasi terhadap nilai OCV, nilai perubahan ketumpatan arus, keupayaan aktifasi, keupayaan ohm dan keupayaan kepekatan sel tunggal PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

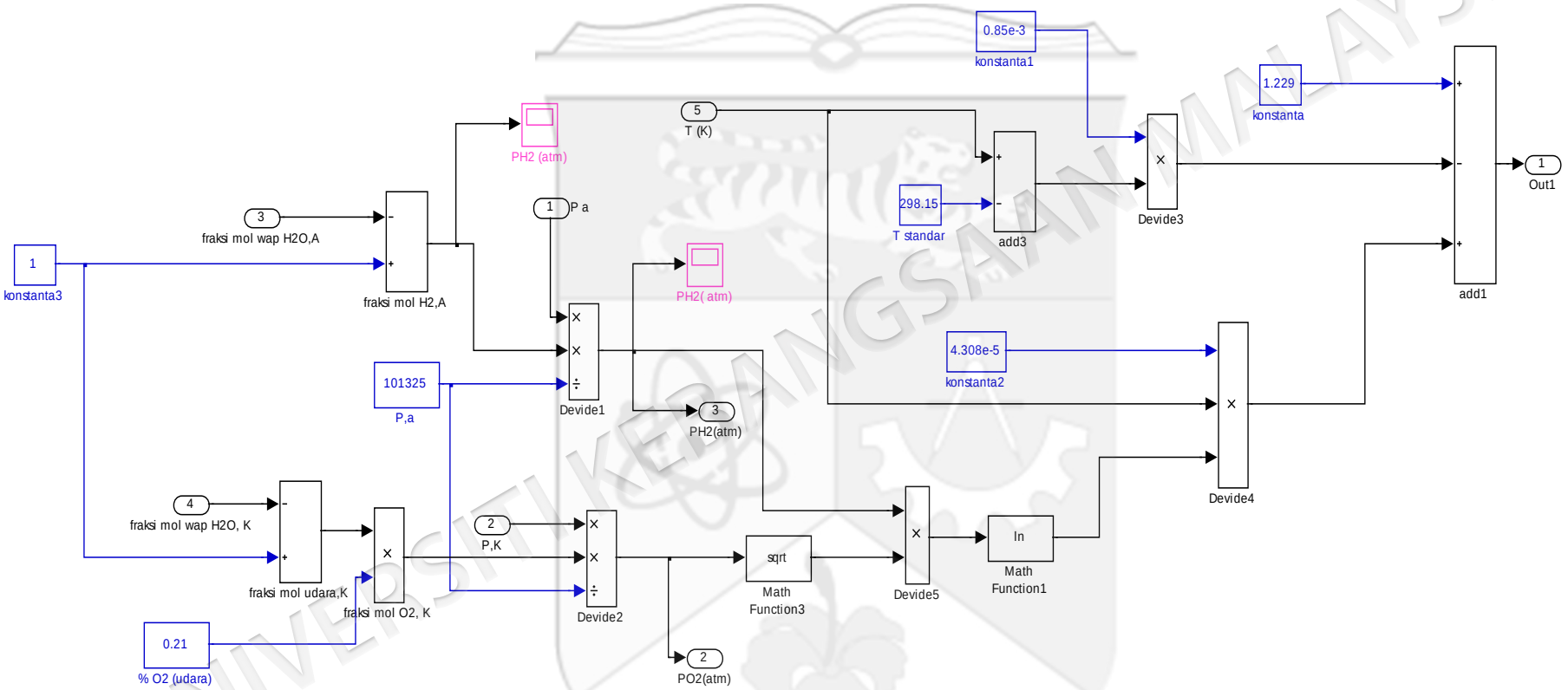
A Sel tunggal PEMFC



Rajah 5.1 Prestasi sel tunggal sistem PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

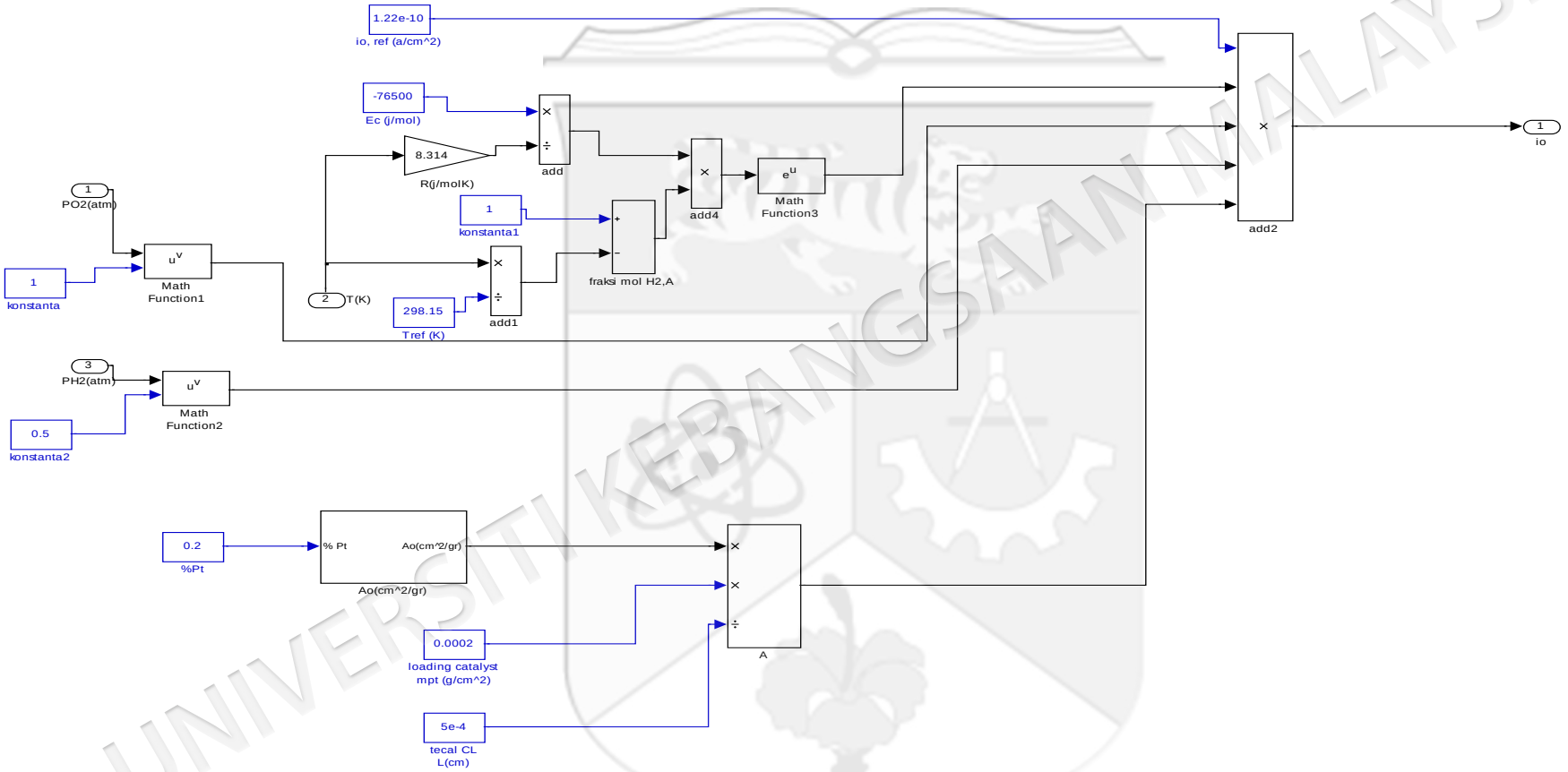
B. Nilai OCV



Rajah 5.2 Penentuan nilai OCV pada PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

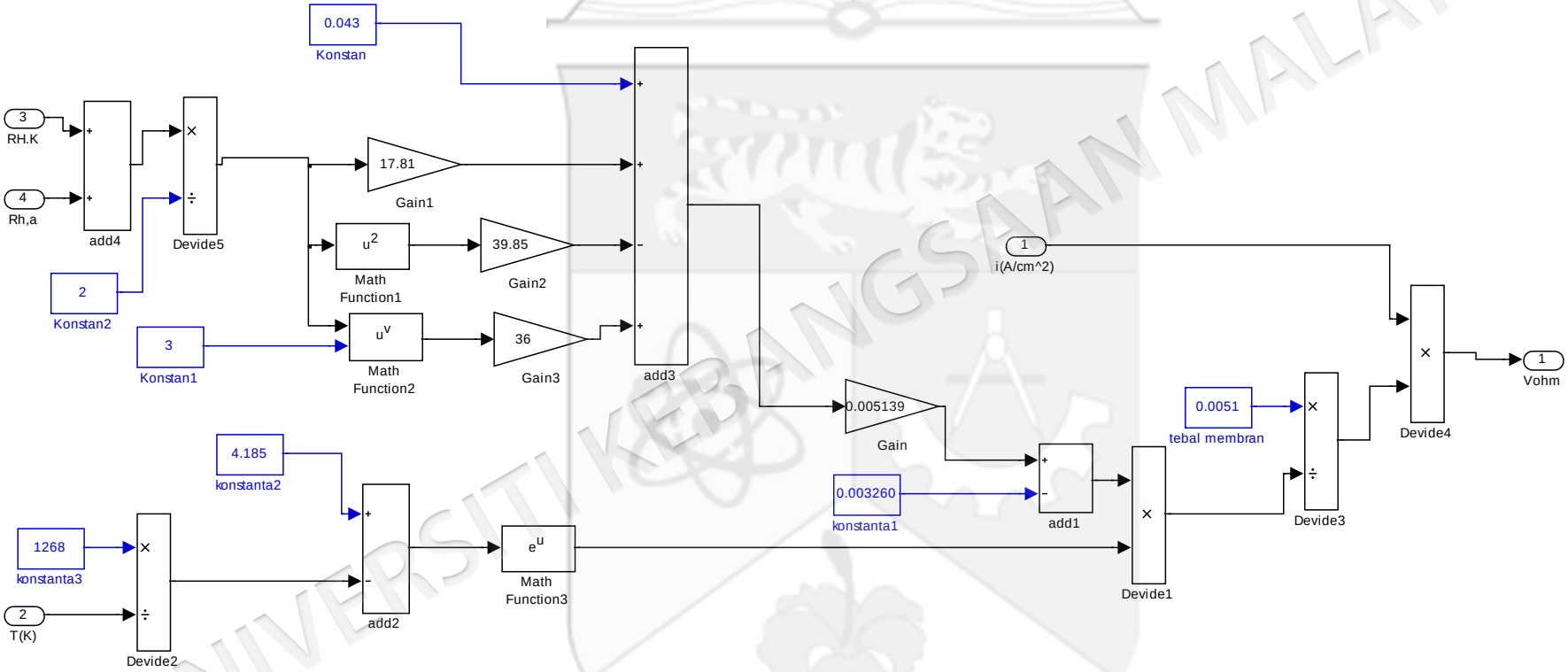
C. Nilai Perubahan Ketumpatan Arus



Rajah 5.3 Perubahan ketumpatan arus pada sel tunggal PEMFC

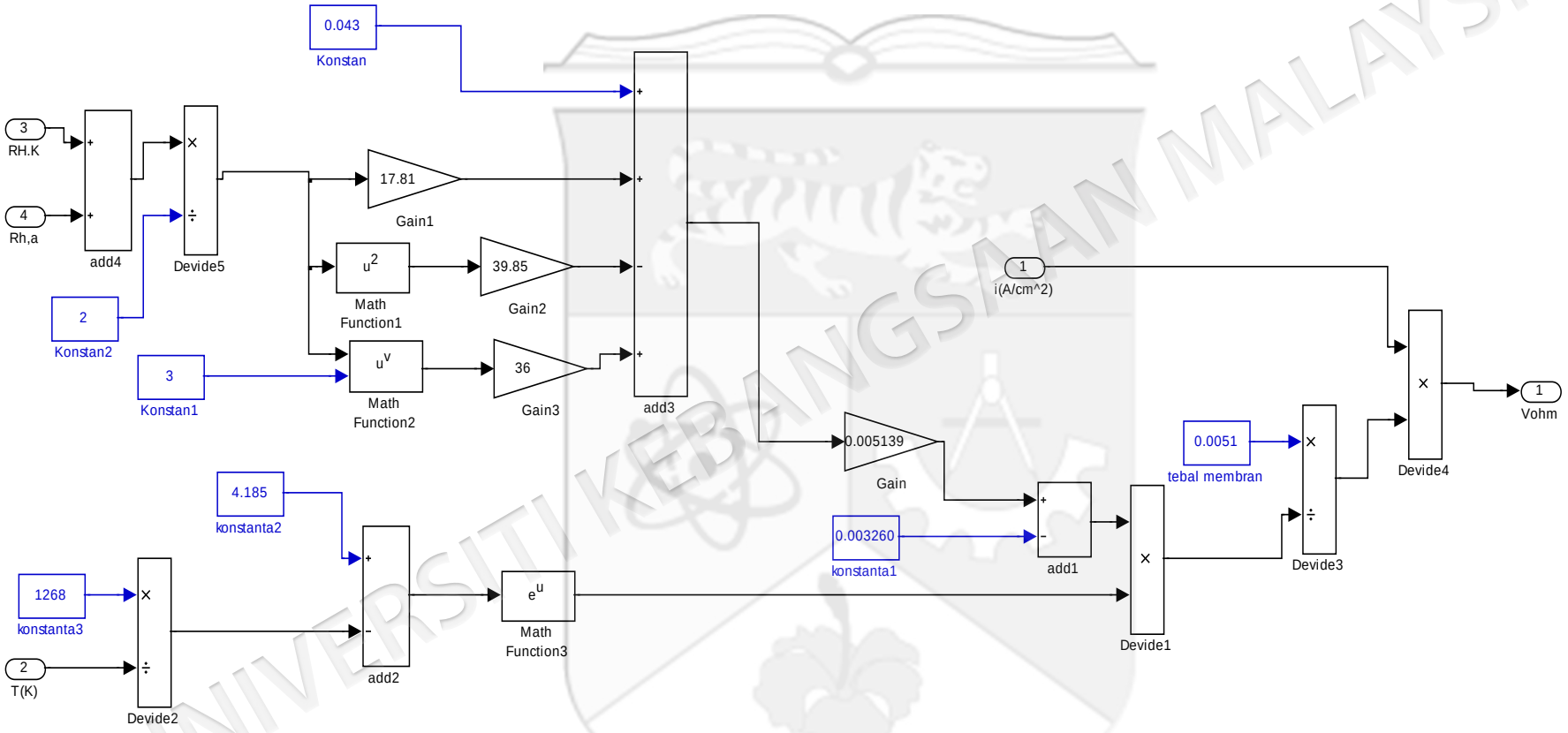
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

D. Keupayaan pada sel tunggal PEMFC



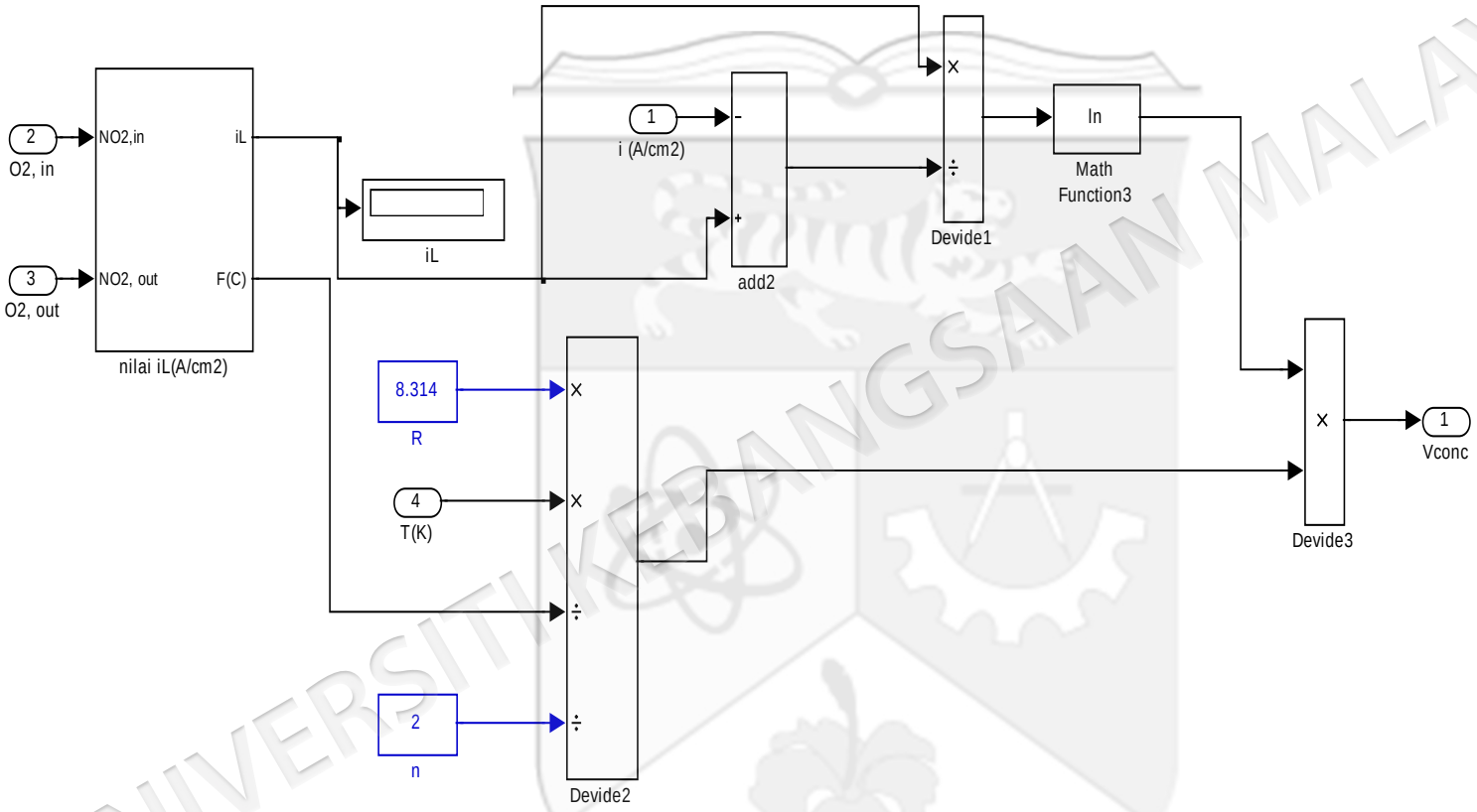
Rajah 5.4 Nilai keupayaan aktifasi pada PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 5.5 Nilai keupayaan ohm pada PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 5.6 Nilai keupayaan kepekatan pada PEMF**C**

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

5.5 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Beberapa parameter yang mempengaruhi prestasi sel tunggal PEMFC pada kajian ini iaitu terdiri daripada suhu PEMFC, kelembapan relatif, tekanan operasi, nisbah stoikiometri tindak balas hidrogen dan oksigen, dan pengaruh jisim pemangkin yang digunakan PEMFC. Parameter operasi yang digunakan sebagai asas pada kes pemodelan disenaraikan dalam Jadual 5.2

Jadual 5.2 Parameter untuk asas kes pemodelan

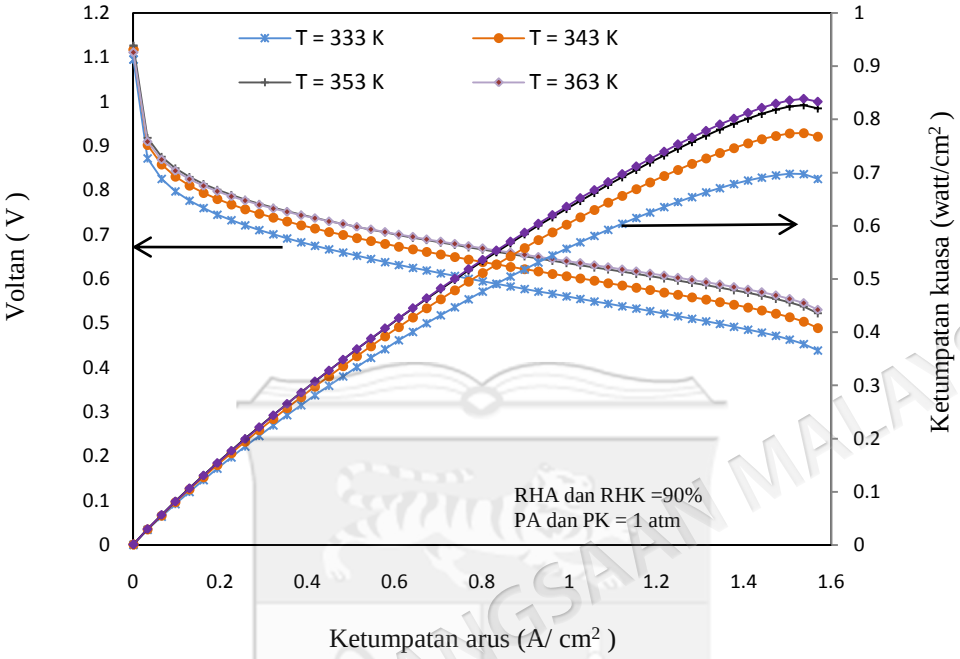
Parameter	**Nilai**
Suhu sel	333K hingga 363K
Suhu rujukan	298.15 K
Tebal membran kering	0.0051 cm untuk Nafion 112
Beban pemangkin	0.0002 g cm^{-2}
Tebal pemangkin	0.0005 cm
Tekanan di sisi anod	1 atm
Tekanan di sisi katod	1 atm
Kelembapan relatif di sisi anod	50% hingga 90%
Kelembapan relatif di sisi katod	50% hingga 90%
Pemalar Faraday	96,485 C/mol elektron
Nisbah stoikhiometri untuk hidrogen	1.2
Nisbah stoikhiometri untuk oksigen	2
Pemalar gas universal	8.314 J/mol K

5.5.1 Kesan Suhu Kendali Terhadap Prestasi PEMFC

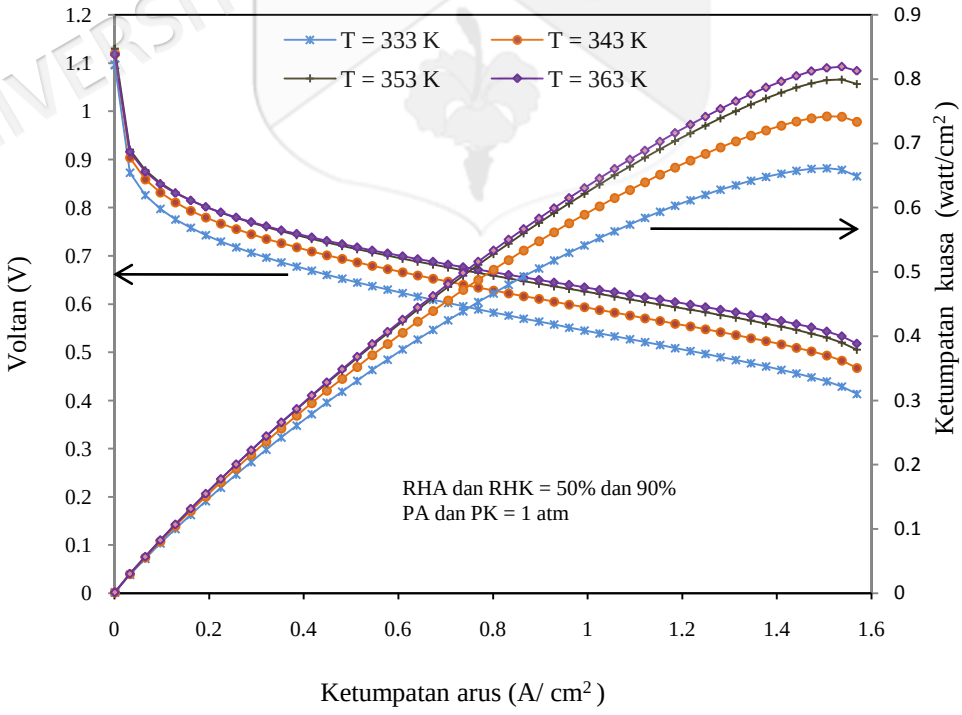
Kesan suhu sel terhadap prestasi sel tunggal PEMFC yang dihasilkan dilakukan berbagai variasi parameter, seperti terlihat pada Rajah 5.7. Rajah 5.7 menunjukkan kesan suhu PEMFC terhadap voltan dan ketumpatan tenaga yang dihasilkan oleh sel tunggal PEMFC. Suhu operasi PEMFC yang diamati adalah dari 333 K hingga 363 K.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Suhu dikesan oleh perbezaan kelembapan relatif dan tekanan operasi PEMFC pada nisbah stoikimetri bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC iaitu 1.2 untuk hidrogen dan 2 untuk oksigen.

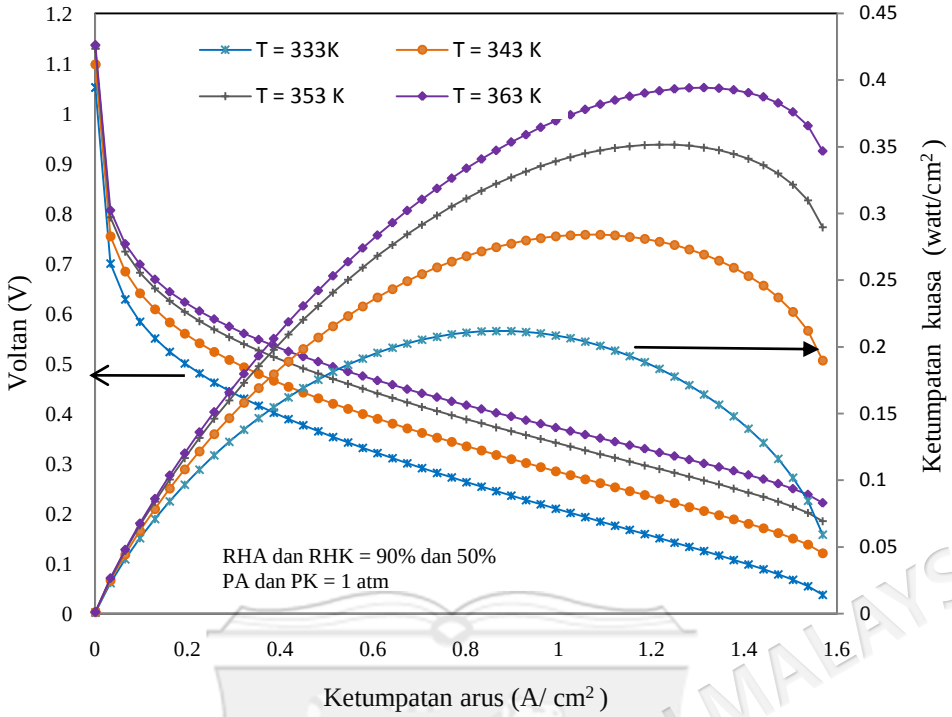


(a)

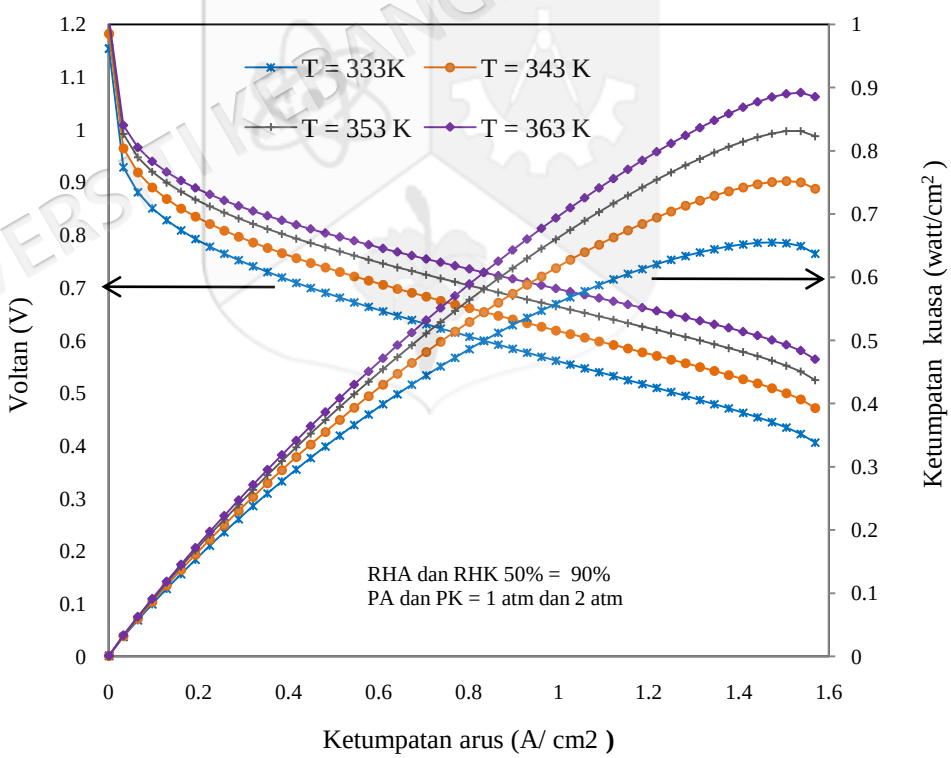


(b)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

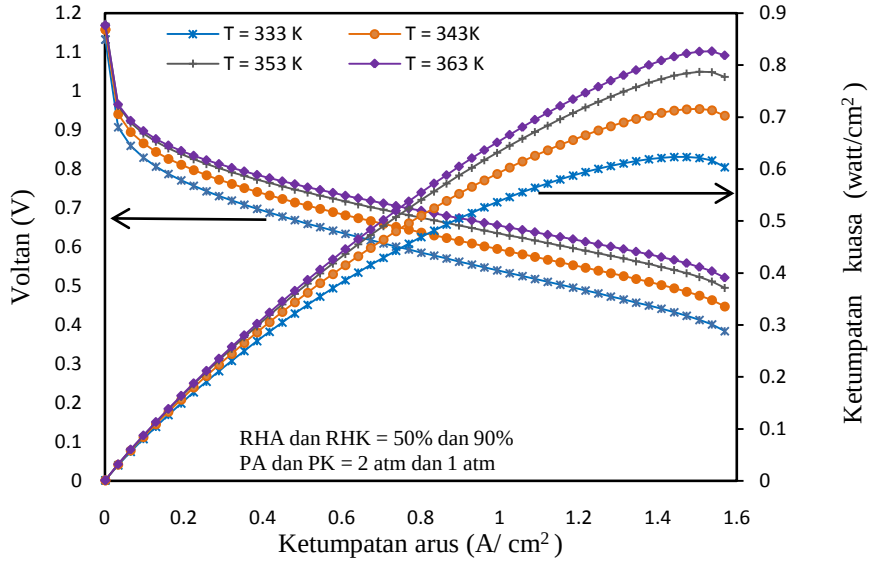


(c)



(d)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(e)

Rajah 5.7. Kesan suhu operasi terhadap prestasi sel tunggal PEMFC pada nisbah stoikiometri H_2 = 1.2 dan O_2 = 2. Kondisi operasi lain ialah (a) RHA dan RHK =90%, PA dan PK = 1 atm (b) RHA dan RHK = 50% dan 90%, PA dan PK = 1 atm (c) RHA dan RHK = 90% dan 50%, PA dan PK = 1 atm (d) RHA dan RHK 50% = 90%, PA dan PK = 1 atm dan 2 atm (e) RHA dan RHK = 50% dan 90%, PA dan PK = 2 atm dan 1 atm

Rajah 5.7a menunjukkan pengaruh perbezaan suhu terhadap prestasi sel tunggal pada kelembapan relatif 90% di anod dan katod, dengan tekanan operasi 1atm. Pada kondisi operasi ini, terdapat peningkatan nilai prestasi sel tunggal apabila suhu operasi meningkat daripada 333 K hingga 353 K. Sedangkan kenaikan suhu daripada 353 K hingga 363 K mengakibatkan hanya mempunyai sedikit kesan terhadap prestasi sel tunggal. Dari Rajah 5.7a didapati bahawa ketumpatan arus kurang daripada 0.3 A cm^{-2} menunjukkan perbezaan suhu tidak menjejaskan ketumpatan kuasa yang telah dihasilkan. Selanjutnya jika ketumpatan arus besar daripada 0.3 A cm^{-2} menunjukan peninngkatan suhu menjejas ketumpatan kuasa yang dihasilkan tetapi peningkatan suhu daripada 353K kepada 363 K tidak menjejaskan ketumpatan kuasa yang dihasilkan.

Rajah 5.7b menunjukkan kesan perbezaan suhu pada prestasi sel tunggal apabila kelembapan relatif ialah 50% pada anod dan 90% pada katod dan apabila tekanan yang beroperasi di anod dan katod ialah 1atm. Pada kondisi operasi ini, peningkatan suhu juga meningkatkan prestasi sel tunggal PEMFC. Walau

bagaimanapun, peningkatan suhu daripada 353 K hingga 363 K memberi kesan tidak ketara terhadap prestasi sel tunggal. Pada nilai ketumpatan arus yang lebih besar daripada 1 A cm^{-2}, peningkatan suhu daripada 353 K hingga 363 K tidak menjejaskan ketumpatan arus ketara. Ketumpatan arus di bawah 1 A cm^{-2} tidak memberi kesan terhadap prestasi sel tunggal PEMFC yang dihasilkan .

Rajah 5.7c menunjukkan kesan perbezaan suhu terhadap prestasi sel tunggal PEMFC apabila kelembapan relatif 90% di anod dan 50% di katod. Tekanan operasi pada anod dan katod ialah 1 atm. Rajah 5.7d menunjukkan keadaan operasi sel tunggal PEMFC dengan kelembapan relatif 50% pada anod dan 90% pada katod; tekanan operasi di anod dan katod ialah 1atm dan 2 atm. Rajah 5.7e menunjukkan keadaan operasi apabila kelembapan relatif 50% pada sisi anod dan 90% pada sisi katod. Tekanan operasi pada anod ialah 1 atm, dan tekanan beroperasi pada katod ialah 2 atm.

Rajah 5.7c, 5.7d dan 5.7e menunjukkan bahawa peningkatan suhu daripada 333 K hingga 363 K pada keadaan operasi yang berbeza menyebabkan peningkatan prestasi sel tunggal PEMFC. Peningkatan prestasi ini berlaku kerana terdapat peningkatan nilai voltan dan nilai ketumpatan kuasa yang telah dijana PEMFC. Hasil kajian ini menunjukkan bahawa peningkatan nilai ketumpatan kuasa apabila ketumpatan arus lebih besar daripada 0.25 A cm^{-2}, sedangkan keadaan operasi yang ditunjukkan pada Rajah 5.7c. Apabila ketumpatan arus adalah lebih besar daripada 0.4 cm^{-2} sedangkan keadaan operasi yang ditunjukkan oleh Rajah 5.7d. Selanjutnya apabila ketumpatan arus adalah lebih besar daripada 0.6 cm^{-2} sedangkan keadaan operasi ditunjukkan oleh Rajah 5.7e. Keputusan kajian ini kecenderungannya mengikuti trend yang hasilkan oleh (O. Shamardina 2010), yang menunjukkan bahawa peningkatan nilai suhu operasi menyebabkan peningkatan terhadap prestasi sistem PEMFC

Jadual 5.3 menunjukkan bahawa peningkatan suhu secara amnya menyebabkan peningkatan terhadap nilai prestasi PEMFC. Peningkatan ini dibuktikan oleh peningkatan voltan dan ketumpatan kuasa pada setiap keadaan operasi. Prestasi sel tunggal boleh berbeza pada suhu yang sama berdasarkan keadaan operasi yang

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

berbeza. Berdasarkan pelbagai keadaan operasi yang diuji, boleh ditunjukkan bahawa sel tunggal yang memiliki ketumpatan arus maksimum pada keadaan 4, di mana kelembapan relatif 50% pada anod dan 90% pada katod, dengan tekanan operasi 1 atm pada anod dan 2 atm pada katod.

Jadual 5.3 Prestasi PEMFC pada perbezaan suhu daripada 333K kepada 363 K

Keadaan	**Ketumpatan arus (A cm^{-2}) pada 0.6 V dengan perbedaan suhu**			
	333 K	**343 K**	**353 K**	**363 K**
Keadaan 1	0.769	1.025	1.217	1.249
Keadaan 2	0.705	0.929	1.121	1.185
Keadaan 3	0.065	0.129	0.193	0.225
Keadaan 4	0.801	1.057	1.281	1.473
Keadaan 5	0.737	0.961	1.153	1.281

Catatan:

Keadaan 1 : RHA dan RHK = 90% , PA dan PK = 1 atm

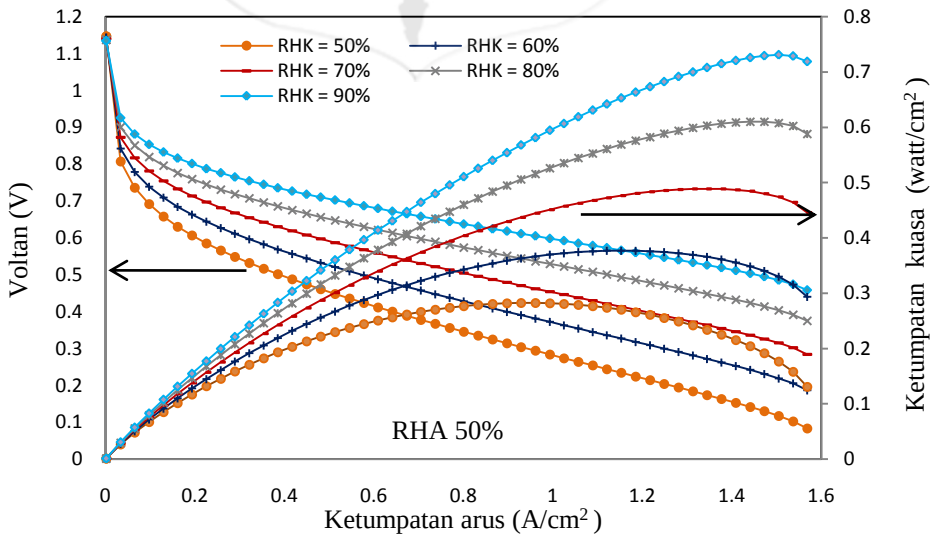
Keadaan 2 : RHA dan RHK = 50% dan 90% , PA dan PK = 1 atm

Keadaan 3 : RHA dan RHK = 90% dan 50% , PA dan PK = 1 atm

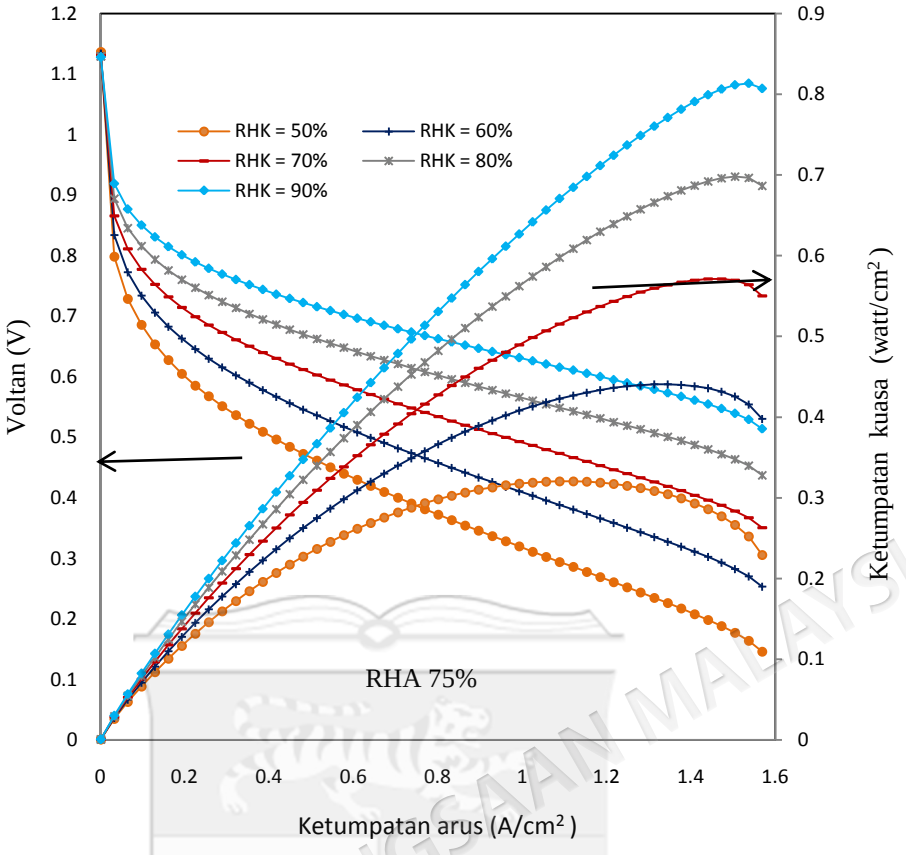
Keadaan 4 : RHA dan RHK = 50% dan 90% , PA dan PK = 1 atm dan 2 atm

Keadaan 5 : RHA dan RHK = 50% dan 90% , PA dan PK = 2 atm dan 1 atm.

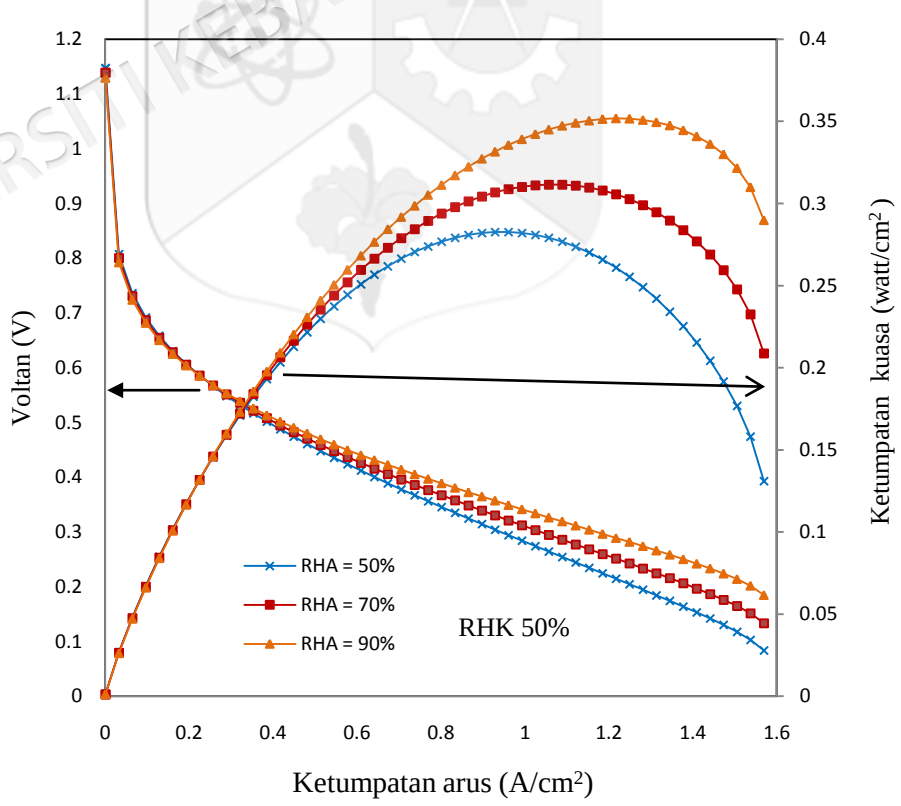
5.5.2 Kesan Kelembapan Relatif Bahan Tindak Balas Terhadap Prestasi PEMFC



(a)

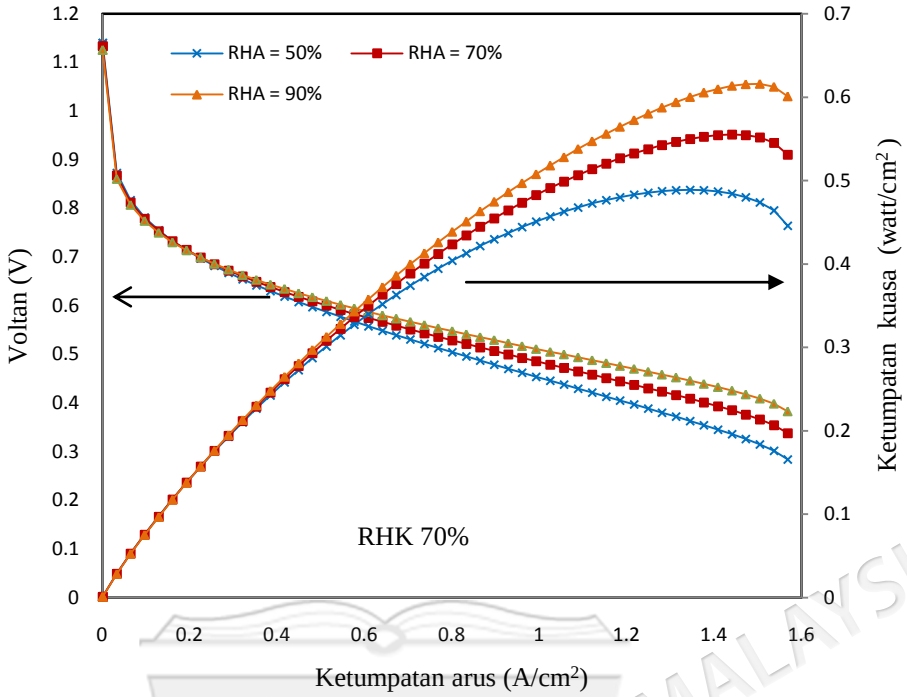


(b)

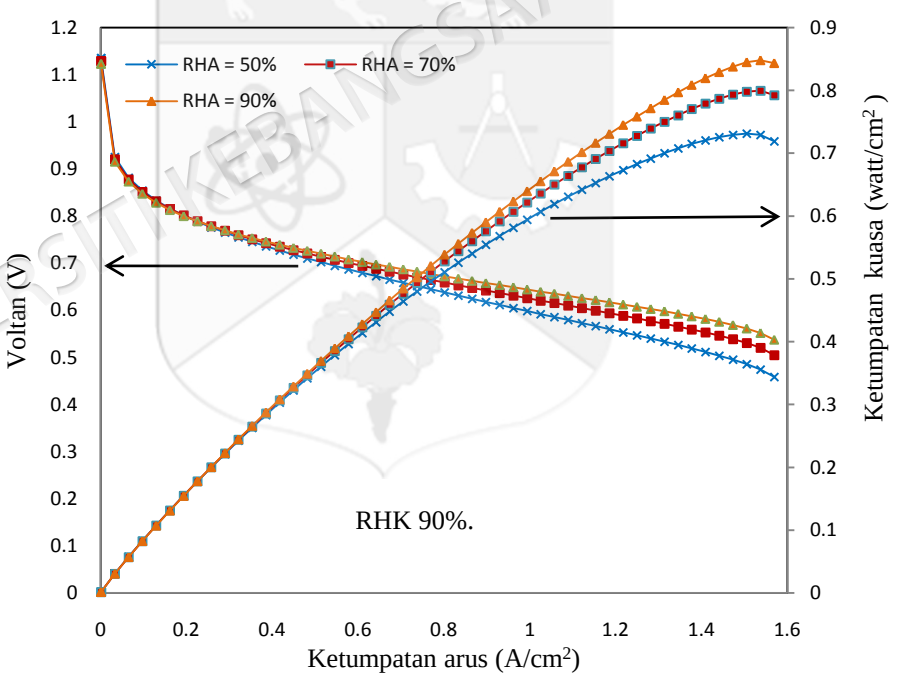


(c)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(d)



(e)

Rajah 5.8. Kesan kelembapan relatif terhadap prestasi sel tunggal PEMFC pada suhu 353K, tekanan operasi 1 atm, nisbah stoikiometri H_2 = 1.2 dan O_2 = 2 . (a) RHA 50% dan RHK 50%, 60%, 70%, 80% dan 90%. (b) RHA 75% dan RHK 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% .(c) RHA 50%, 70% dan 90% dan RHK 50%. (d) RHA 50%, 70% dan 90% dan RHK 70%.(e) RHA 50%, 70% dan 90% dan RHK 90%.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Rajah 5.8 menunjukkan kesan berbagai keadaan kelembapan relatif terhadap prestasi sel tunggal PEMFC. Keadaan suhu diamati pada 353K, tekanan pada sisi anod dan sisi katod ialah 1 atm. Nisbah stoikiometri ialah 1.2 untuk hidrogen dan 2 untuk oksigen. Secara amnya, kenaikan nilai kelembapan relatif pada sisi anod dan sisi katod menyebabkan berlakunya kenaikan prestasi PEMFC. Kenaikan prestasi PEMFC ditunjukkan oleh meningkatnya nilai voltan dan ketumpatan tenaga yang dihasilkan. Kenaikan nilai prestasi PEMFC yang lebih tinggi dicapai dengan menaikkan kelembapan relatif pada sisi katod.

Rajah 5.8a dan 5.8c menunjukkan kesan kelembapan relatif yang berbeza manakala keadaan lain yang lain dikekalkan malar. Nilai RHA pada Rajah 5.8a dikekalkan pada 50% manakala RHK telah diubah daripada 50% kepada 90%. Pada Rajah 5.8c, RHK dikekalkan pada 50% manakala RHA diubah daripada 50% kepada 90%. Rajah 5.8a menunjukkan peningkatan prestasi sel tunggal PEMFC dengan meningkatnya nilai RHA. Rajah 5.8c menunjukkan bahawa kenaikan nilai RHA menyebabkan berlakunya peningkatan terhadap prestasi sel tunggal PEMFC yang tidak ketara. Kenaikan nilai RHK adalah lebih berkesan daripada kenaikan nilai RHA terhadap peningkatan prestasi sel tunggal PEMFC. Kenaikan RHA dan RHK menyebabkan peningkatan nilai voltan dan ketumpatan kuasa. Kenaikan nilai RHK menyebabkan berlakunya peningkatan prestasi sel tunggal PEMFC yang ketara. Sebaliknya, kenaikan nilai RHA tidak menyebabkan berlakunya peningkatan prestasi yang ketara.

Rajah 5.8c, 5.8d dan 5.8e menunjukkan kesan RHA terhadap prestasi sel tunggal, dimana prestasi yang tinggi berlaku pada ketumpatan arus yang voltan di atas 0.6 V. Rajah 5. 8a dan 5.8b menunjukkan kesan nilai RHA pada 50% dan 70% manakala nilai RHK diubah daripada 50% hingga 90%. Ketumpatan arus sel tunggal PEMFC pada nilai voltan 0.6 V ditunjukkan oleh jadual 5.4. Keadaan 4 dan 5 pada jadual 5.4 menunjukkan bahawa PEMFC mempunyai nilai ketumpatan arus yang sama pada RHK 50% walaupun terjadi kenaikan nilai RHA daripada 50% hingga 70%. Nilai ketumpatan arus meningkat dengan naiknya nilai RHK daripada 60% hingga 90%. Hal ini juga berlaku dengan meningkatnya nilai RHA daripada 50% hingga 70% menyebabkan peningkatan nilai ketumpatan arus di posisi 0.6 V.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 5.4. Ketumpatan arus pada 0.6 V dengan perbezaan kelembapan relatif di katod

Keadaan	**Ketumpatan arus (A cm^{-2}) pada 0.6 V dengan perbezaan kelembapan relative di katod**				
	RHK 50%	**RHK 60%**	**RHK 70%**	**RHK 80%**	**RHK 90%**
Keadaan 4	0.193	0.289	0.449	0.673	0.961
Keadaan 5	0.193	0.321	0.513	0.801	1.185

Catatan:

Keadaan 4: RHA = 50%, PA dan PK = 1 atm dan T = 353 K

Keadaan 5: RHA = 75%, PA dan PK = 1 atm dan T = 353 K

Jadual 5.5 Prestasi PEMFC pada perbezaan kelembapan relatif di anod

Keadaan	**Ketumpatan arus (A cm^{-2}) pada 0.6 V dengan perbezaan kelembapan relative di katod**		
	RHA 50%	**RHA 70%**	**RHA 90%**
Keadaan 6	0.193	0.193	0.193
Keadaan 7	0.449	0.513	0.545
Keadaan 8	0.961	1.121	1.281

Catatan:

Keadaan 6 : RHK = 50% , PA dan PK = 1 atm dan T = 353 K

Keadaan 7 : RHK = 75% , PA dan PK = 1 atm dan T = 353 K

Keadaan 8 : RHK = 90% , PA dan PK = 1 atm dan T = 353 K

Jadual 5.5 menunjukkan ketumpatan arus pada nilai voltan 0.6 V apabila dilakukan perubahan nilai RHA. Operasi sel tunggal PEMFC pada keadaan 6 menunjukkan berlakunya kenaikan nilai RHA daripada 50% hingga 90% tidak menjejaskan nilai ketumpatan arus pada 0.193 A cm^{-2}. Pada keadaan 7 dan 8 meningkatnya nilai RHK dan nilai RHA menyebabkan berlakunya kenaikan nilai ketumpatan arus PEMFC. Hal ini di tunjukan oleh keadaan 8, dimana RHA dan RHK adalah 90% . Peningkatan prestasi PEMFC ini berlaku kerana dengan naiknya nilai kelembapan relatif di sisi anod dan katod menyebabkan jumlah wap air pada EOD seperti yang ditunjukan oleh Rajah 4.13.. Tingginya wap air maka akan meningkatkan

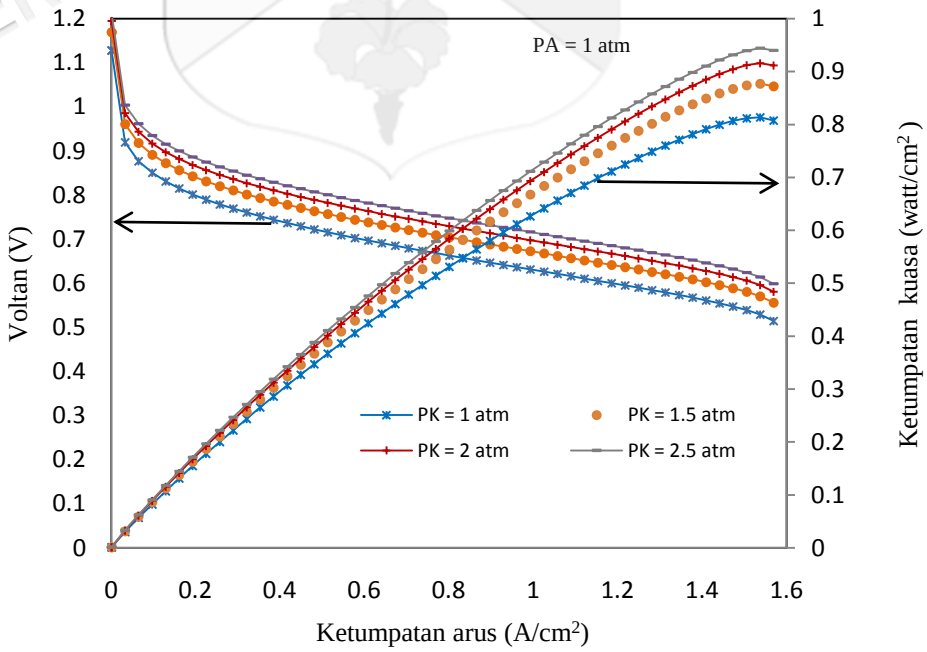
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

peningkatan jumlah proton yang berpindah dari sisi anod melewati membran menuju permukaan pemangkin di sisi katod. Akibatnya prestasi PEMFC akan meningkat.

Jadual 5.4 dan 5.5 menunjukkan bahawa apabila RHK ialah 50% dan RHA ialah 50% pada keadaan 4, 5 dan 6 tidak terdapat perubahan nilai ketumpatan arus dan PEMFC mempunyai ketumpatan arus yang sama pada 0.193 A cm^{-2}. Kenaikan nilai RHA tidak mengakibatkan berlakunya peningkatan ketumpatan arus yang ketara. Walau bagaimanapun, kenaikan nilai RHK menyebabkan peningkatan nilai ketumpatan arus secara ketara. Prestasi sel tunggal yang mempunyai nilai tinggi berlaku pada nilai RHK ialah daripada 70% hingga 90%.

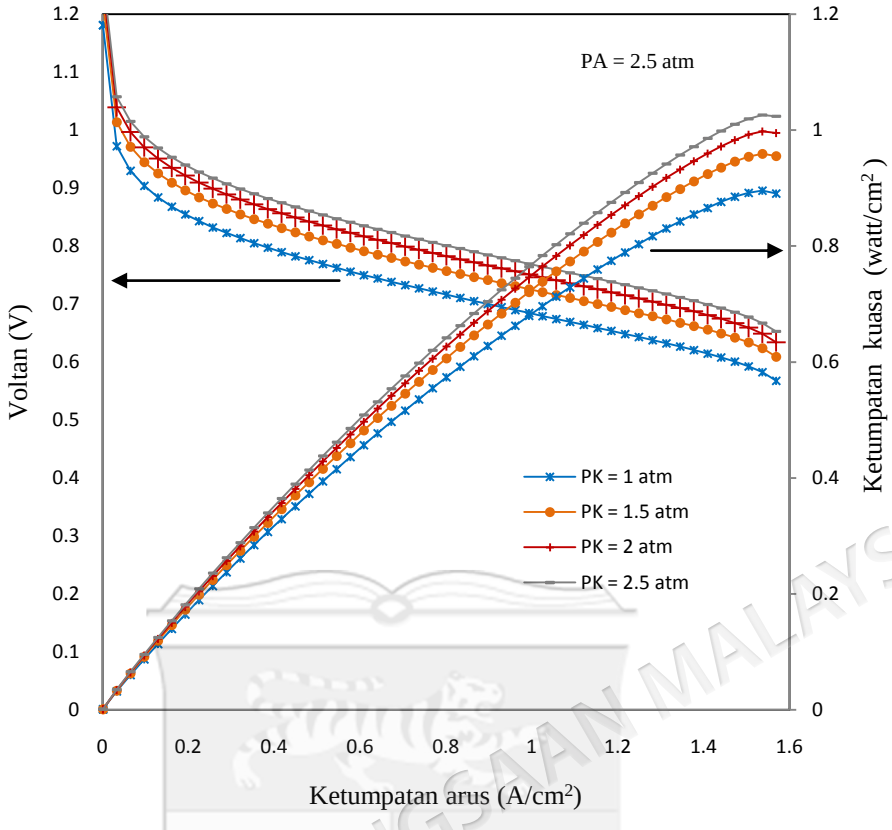
5.5.3 Kesan Tekanan Bahan Tindak Balas Terhadap Prestasi PEMFC.

Rajah 5.9 menunjukkan prestasi sel tunggal dengan perbagai tekanan pada anod dan katod. Tekanan pada anod ditetapkan 1 dan 2.5 atm sedangkan tekanan pada katod diubah daripada 1 hingga 2.5 atm, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5.9a dan 5.9b. Pada keadaan lainnya, keadaan tekanan dikekalkan 1atm pada katod, manakala tekanan anod diubah dari 1 atm hingga 2.5 atm. Sistem PEMFC beroperasi pada suhu 353 K, nilai RHA ialah 75% dan nilai RHK ialah 90%, manakala nisbah stoikiometri hidrogen dan oksigen masing-masing ialah 1.2 dan 2.

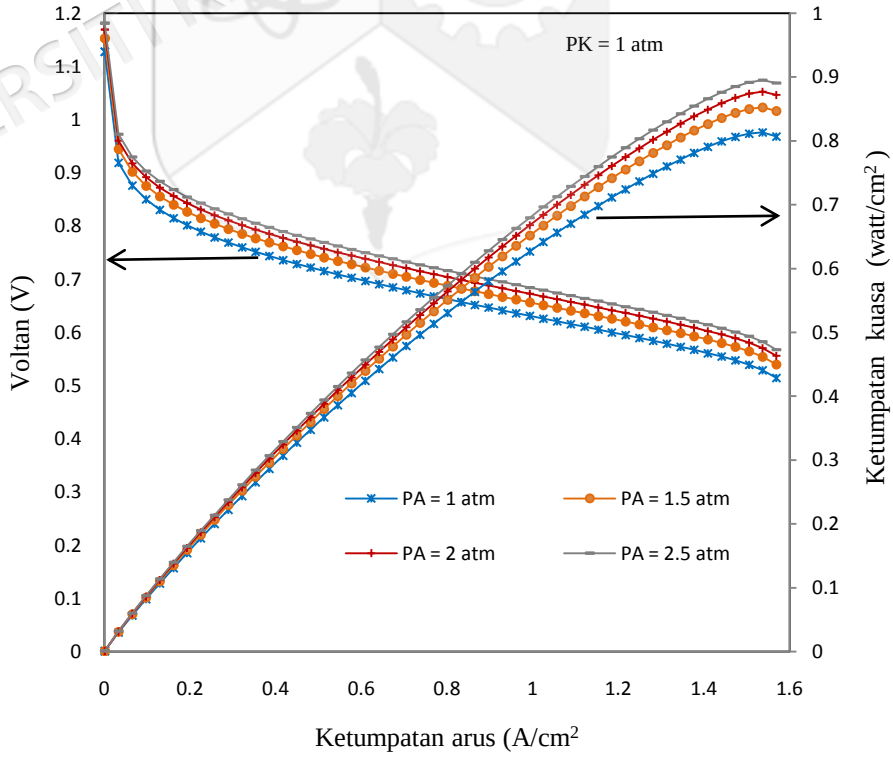


(a)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

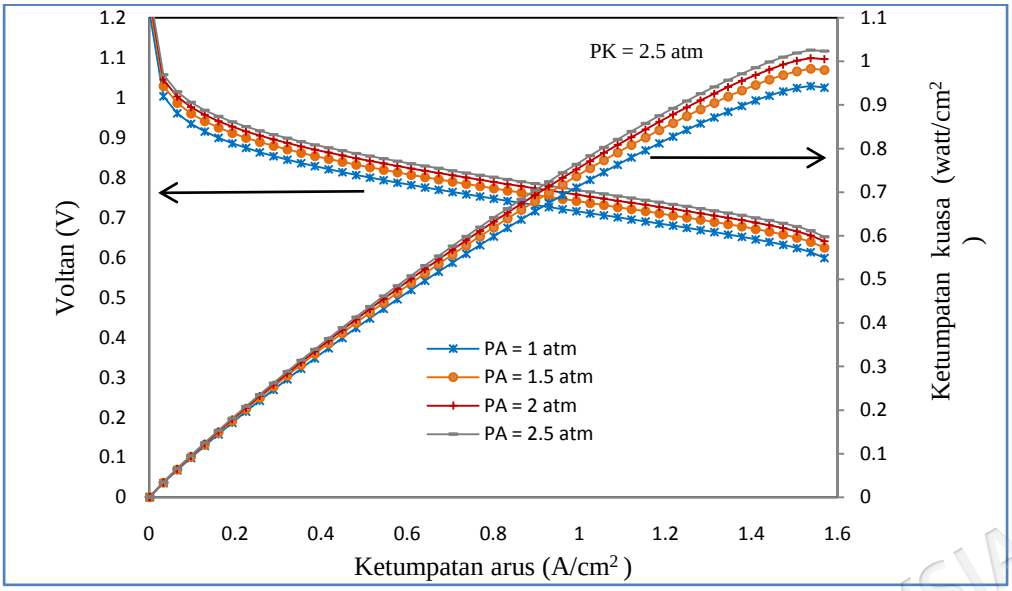


(b)



(c)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(d)

Rajah 5.9. Kesan tekanan terhadap prestasi sel tunggal pada suhu 353K, RHA = 75% dan RHK = 90%, nisbah stoikiometri = 1.2 untuk H_2 dan 2 untuk O_2 .(a) PA = 1 atm dan PK = 1, 1.5, 2, 2.5 atm. (b) PA = 2.5 atm dan PK = 1, 1.5, 2, 2.5 atm (c) PA =1, 1.5, 2, 2.5 atm dan PK = 1 atm. (d) PA = 1, 1.5, 2, 2.5 atm dan PK = 2.5 atm.

Rajah 5.9a dan 5.9b menunjukkan prestasi sel apabila tekanan katod diubah daripada 1 atm hingga 2.5 atm dan di anod dikekalkan 1 atm dan 2.5 atm. Kenaikan tekanan pada sisi anod menghasilkan prestasi yang lebih baik. Kenaikan tekanan di katod daripada 2 atm hingga 2.5 atm tidak mempengaruhi prestasi secara ketara. Kenaikan tekanan di anod daripada 1 atm hingga 2.5 atm menyebabkan peningkatan prestasi secara ketara. Peningkatan ketumpatan arus pada voltan 0.6 V kerana disebabkan oleh peningkatan tekanan pada sisi katod dan ditunjukkan oleh Jadual 5.6.

Jadual 5.6 Prestasi PEMFC dengan perbezaan tekanan pada sisi katod

Keadaan	**Ketumpatan arus (A cm^{-2}) pada 0.6 V dengan perbezaan tekanan di katod PEMFC**			
	PK = 1 atm	**PK = 1.5 atm**	**PK = 2 atm**	**PK = 2.5 atm**
Keadaan 9	1.185	1.409	1.505	1.569
Keadaan 10	1.473	1.569	~1.6	~1.6

Catatan:

Keadaan 9 : RHA = 75% dan RHK = 90%, PA 1 atm dan T = 353 K

Keadaan 10 : RHA = 75% dan RHK = 90% , PA 2.5 atm dan T = 353 K

Kenaikan tekanan pada sisi anod daripada 1atm hingga 2.5 atm juga menyebabkan peningkatan ketumpatan arus. Jika tekanan pada sisi anod beroperasi pada 2.5 atm sedangkan pada sisi katod lebih besar daripada 2 atm maka menghasilkan ketumpatan arus maksimum iaitu 1.6 A cm^{-2} pada voltan 0.6 V. Penyelidikan yang telah dilakukan oleh You dan Liu 2006 (You & Liu 2006) menunjukan bahawa tekanan boleh mempengaruhi prestasi sistem PEMFC. Penyelidikan dilakukan pada suhu operasi 343 K , kadar alir pada sisi katod ialah 0.6 ms^{-1}, tekanan anod dikekalkan 1 atm sedangkan di katod dilakukan pada tekanan 1. 2 dan 3 atm. Hasil penyelidikan menunjukkan bahawa kenaikan tekanan mengakibatkan berlakunya peningkatan ketumpatan arus yang dihasilkan. Hal ini berlaku kerana naiknya tekanan mengakibatkan meningkatkan tindak balas hidrogen dengan oksigen untuk menghasilkan arus elektrik dan dinyatakan dengan kenaikan prestasi PEMFC.

Rajah 5.9c dan 5.9d menunjukkan prestasi sel dengan pelbagai tekanan pada sisi anod daripada 1 atm hingga 2.5 atm, manakala tekanan pada katod adalah sama ada 1 atm atau 2.5 atm. Hasil kajian menunjukkan bahawa kenaikan tekanan anod mengakibatkan peningkatan prestasi sel. Ketumpatan arus pada voltan 0.6 V ditunjukkan pada jadual 5.7. Kenaikan tekanan pada sisi anod daripada 1 atm kepada 2.5 atm manakala nilai tekanan katod dikekalkan pada 1 atm menyebabkan sedikit peningkatan nilai ketumpatan arus. Pada tekanan katod 2.5 atm, nilai ketumpatan arus mencapai nilai maksimum. Jadual 5.6 dan 5.7 menunjukkan bahawa nilai ketumpatan arus yang lebih tinggi dicapai dengan menaikkan nilai tekanan di katod dibandingkan menaikkan tekanan di anod, seperti yang ditunjukkan oleh keadaan 9 dan 11.

Jadual 5.7 Prestasi PEMFC dengan perbezaan tekanan pada anod

Keadaan	**Ketumpatan arus (A cm^{-2}) pada 0.6 V dengan perbezaan tekanan di anod PEMFC**			
	PA = 1 atm	**PA= 1.5 atm**	**PA = 2 atm**	**PA = 2.5 atm**
Keadaan 11	1.185	1.313	1.409	1.473
Keadaan 12	1.568	>1.6	>1.6	>1.6

Catatan:

Keadaan 11 : RHA = 75% dan RHK = 90%, PK 1 atm dan T = 353 K

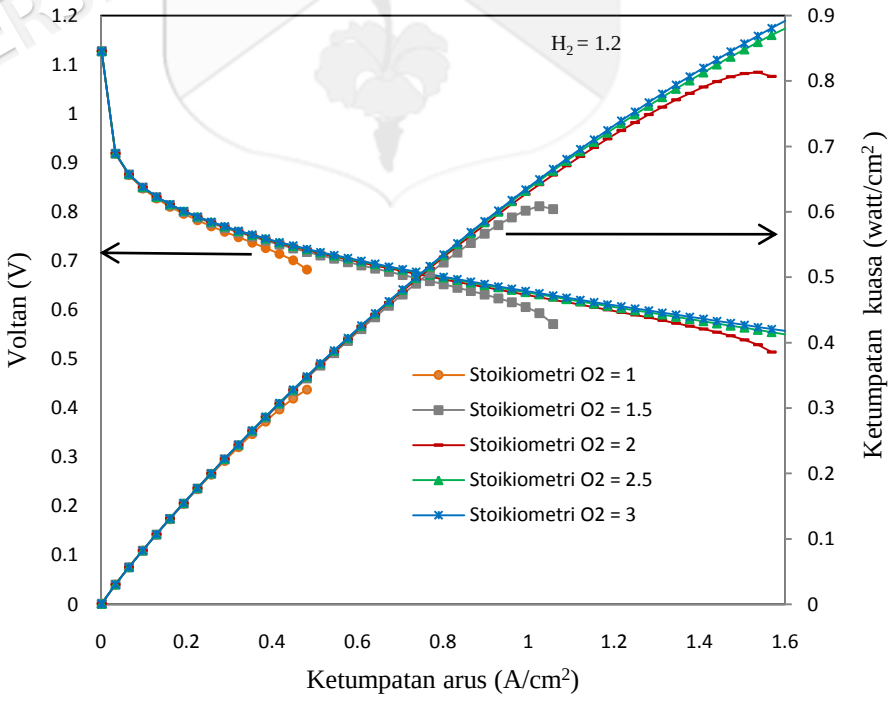
Keadaan 12 : RHA = 75% dan RHK = 90% , PK 2.5 atm dan T = 353 K

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

5.5.4 Kesan Nisbah Stoikiometri Bahan Tindak Balas Terhadap Prestasi Sel Tunggal PEMFC

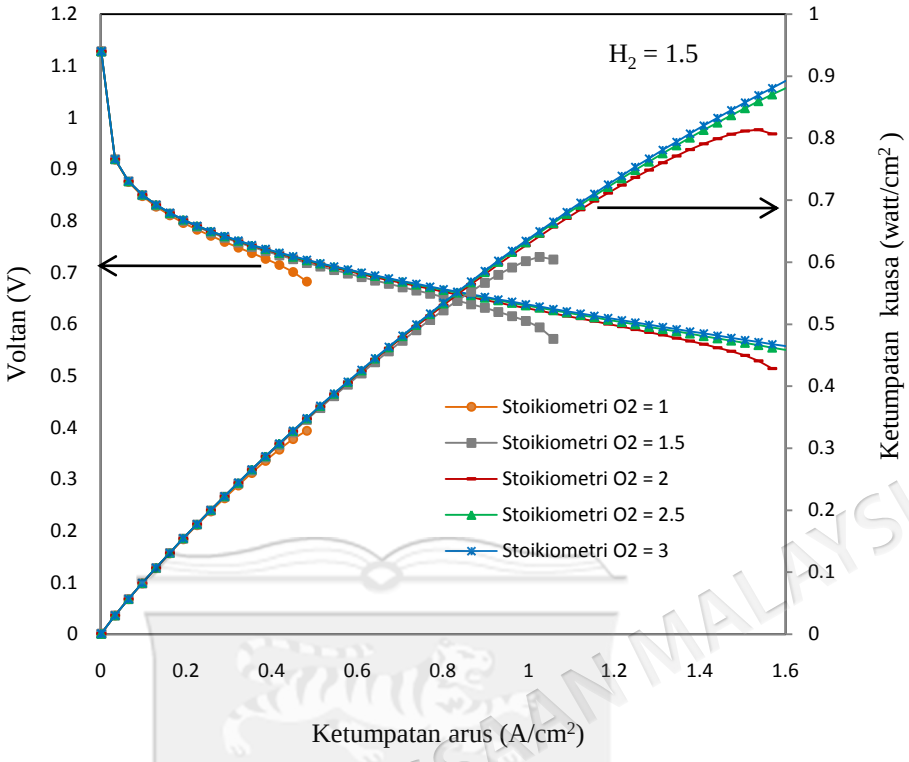
Rajah 5.10 menunjukkan prestasi sel tunggal PEMFC dengan nisbah stoikiometri bahan tindak balas yang berbeza. Nisbah stoikiometri oksigen dibezakan nilainya daripada 1 hingga 3 manakala nisbah stoikiometri hidrogen ialah 1.2, 1.4, 1.6 dan 1.8. Sedangkan nilai kelembapan relatif di anod ialah 75% ,di katod ialah 90%, tekanan pada sisi anod dan sisi katod ialah 1 atm dan suhu operasi 353 K.

Rajah 5.10a, 5.10b dan 5.10c menunjukkan prestasi sel tunggal akibat perubahan nisbah stoikiometri oksigen. Hasil kajian menunjukkan bahawa kenaikan nisbah stoikiometri oksigen mengakibatkan peningkatan nilai ketumpatan arus serta voltan maksimum. Pada nisbah stoikiometri oksigen rendah, sistem sel fuel tidak boleh mencapai voltan dan ketumpatan arus maksimum kerana tidak terdapat bahan tindak balas yang mencukupi untuk melakukan tindak balas. Voltan sel tunggal ialah 0.683 V dan ketumpatan arus ialah 0.481 A cm^{-2} apabila nisbah stoikiometri oksigen ialah 1. Selanjutnya tindak balas berakhir pada sistem kerana bahan tindak balas tidak mencukupi untuk melakukan tindak balas di dalam PEMFC. Kenaikan nisbah stoikiometri oksigen menyebabkan berlakunya peningkatan ketumpatan arus.

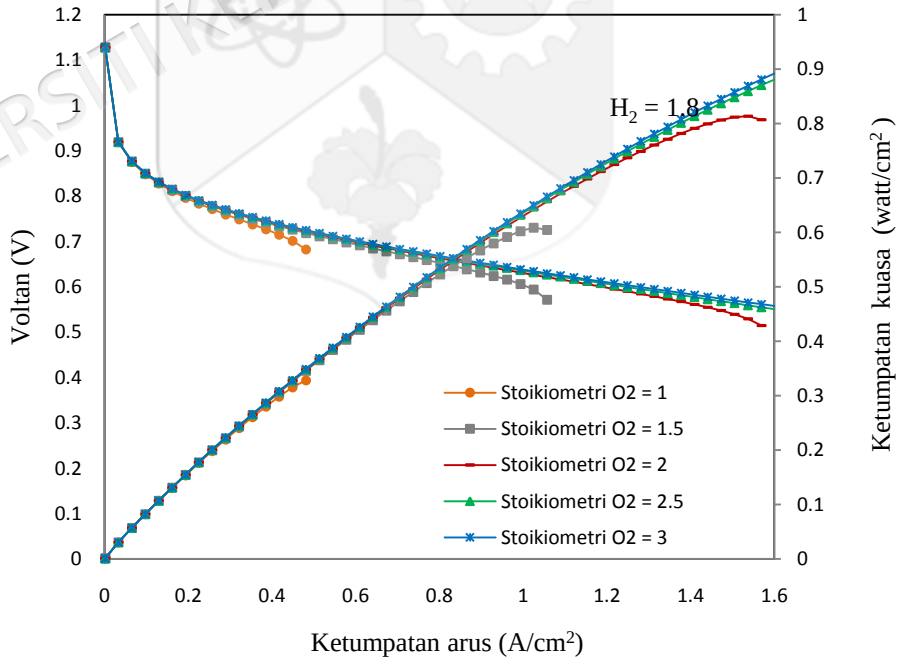


(a)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

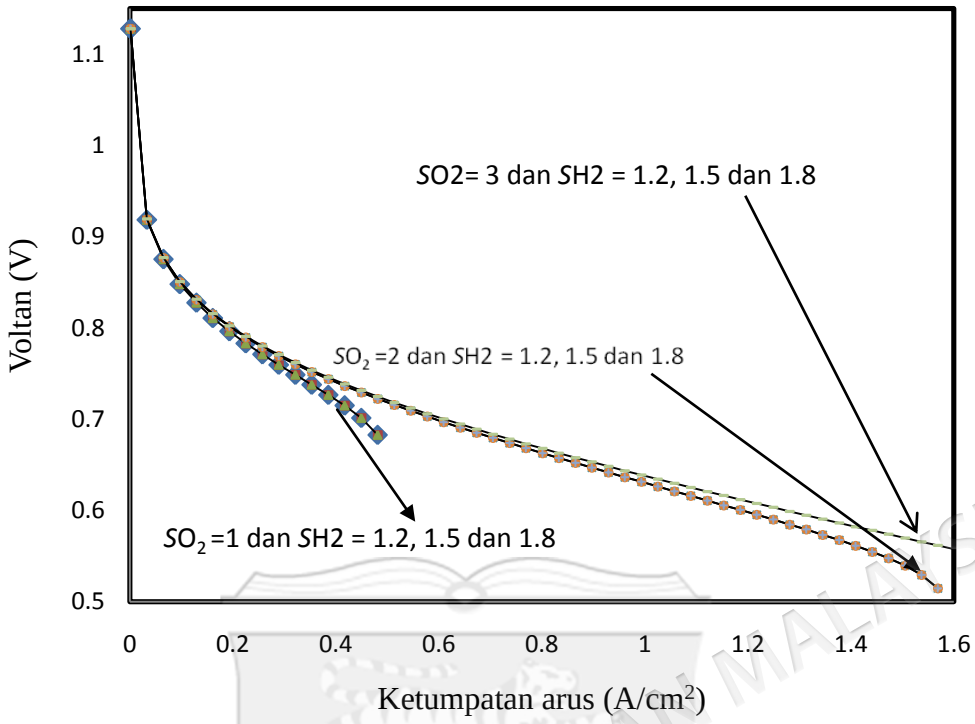


(b)



(c)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(d)

Rajah 5.10 Kesan nisbah stoikiometri bahan tindak balas terhadap prestasi sel tunggal pada suhu 353K, RHA = 75% dan RHK = 90%, PA dan PK = 1 atm. (a) nisbah stoikiometri H_2 = 1.2 dan O_2 = 1,1.5, 2, 2.5 dan 3. (b) nisbah stoikiometri H_2 = 1.5 dan O_2 = 1,1.5, 2, 2.5 dan 3. (c) nisbah stoikiometri H_2 = 1.8 dan O_2 = 1,1.5, 2, 2.5 dan 3. (d) nisbah stoikiometri H_2 = 1.2 1.5 dan 1.8, O_2 = 1,1.5, 2, 2.5 dan 3

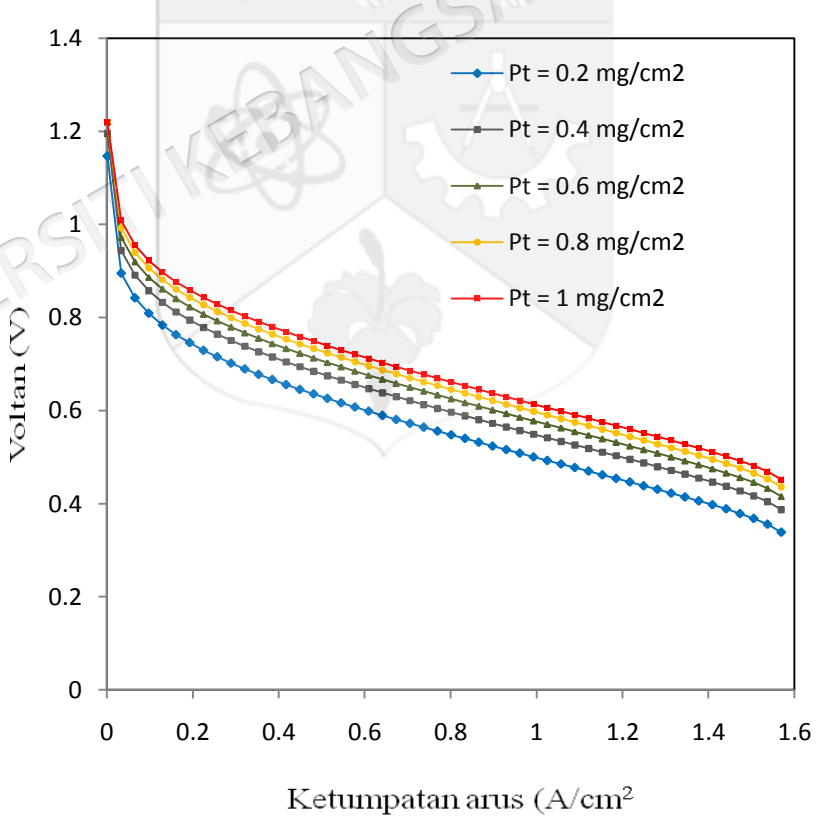
Pada Rajah 5.10a, 5.10b dan 5.10c, nisbah stoikiometri oksigen yang menghasilkan ketumpatan arus maksimum adalah besar daripada 2. Rajah 5.10d menunjukkan prestasi sel tunggal pada nisbah stoikiometri oksigen 1, 2 dan 3, manakala nisbah stoikiometri hidrogen telah diubah daripada 1.2 kepada 1.8. Keputusan kajian ini menunjukkan bahawa kenaikan nisbah stoikiometri hidrogen tidak mempengaruhi prestasi sel tunggal yang ketara. Rajah 5.10a, 10b, 10c dan 10d menunjukkan bahawa nisbah stoikiometri oksigen yang lebih daripada 2 boleh mencapai ketumpatan arus maksimum manakala nisbah stoikiometri hidrogen dikekalkan di antara 1.2 dan 1.8.

5.5.5 Kesan Jisim Pemangkin Terhadap Prestasi PEMFC

Rajah 5.11 menunjukkan prestasi sel tunggal sistem PEMFC pada beban Pt berbeza (mg cm^{-2}). Kajian ini dilakukan variasi beban Pt daripada 0.2 mg cm^{-2} hingga 1 mg

cm^{-2}. Keadaan operasi berlaku pada RHA ialah 75%, RHK ialah 90%, tekanan pada sisi anod dan katod ialah 1atm, manakala nisbah stoikiometri H_2 ialah 1.2 dan nisbah stoikiometri O_2 ialah 2.

Hasil kajian menunjukkan bahawa kenaikan jisim pemangkin Pt menyebabkan kenaikan prestasi PEMFC. Kajian yang dilakukan oleh Wei Sun (2005) menunjukkan pengaruh beban pemangkin Pt pada 0.05, 0.1 dan 0.4 mg cm^{-2}. Kenaikan beban pemangkin menyebabkan peningkatan nilai ketumpatan arus. Ketumpatan arus yang diperoleh pada voltan 0.6 V untuk beban Pt berbeza ditunjukkan dalam Jadual 5.8. Kenaikan beban Pt menyebabkan peningkatan ketumpatan arus PEMFC yang dperoleh. . Pada beban Pt yang tinggi maka peningkatan ketumpatan arus pada 0.6 V terlihat tidak ketara. Jika beban pemangkin ditingkatkan diatas 1 mg cm^{-2} kemungkinan tidak akan meningkatkan prestasi sel fuel, kerana diatas nilai tersebut prestasi yang dihasilkan cenderung memiliki nilai sama.



Rajah 5.11. Kesan variasi jisim pemangkin per cm^2 luas area terhadap prestasi sel tunggal PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 5.8 Prestasi sel tunggal dengan perbezaan jisim Pt pada stek PEMFC

Keadaan	**Ketumpatan arus (A cm^{-2}) pada 0.6 V dengan perbezaan tekanan di anod PEMFC**				
	Pt=0.2 mg cm^{-2}	**Pt=0.4 mg cm^{-2}**	**Pt=0.6 mg cm^{-2}**	**Pt=0.8 mg cm^{-2}**	**Pt=1 mg cm^{-2}**
Keadaan 13	0.577	0.769	0.897	0.961	1.025

Catatan:

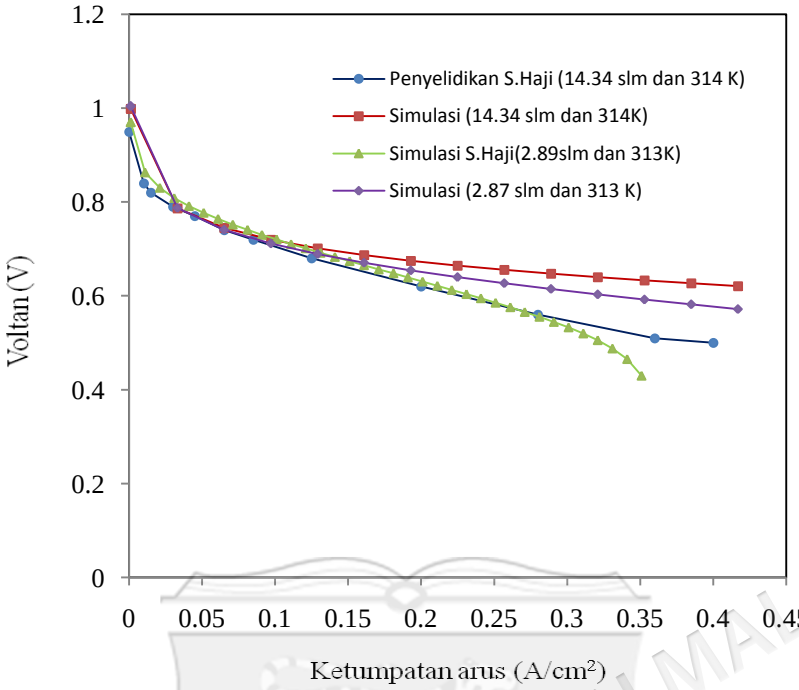
Keadaan 11 : RHA = 75% dan RHK = 90%, PK 1 atm dan suhu = 353 K

5.5.6 Pengesahan Prestasi Sel tunggal PEMFC

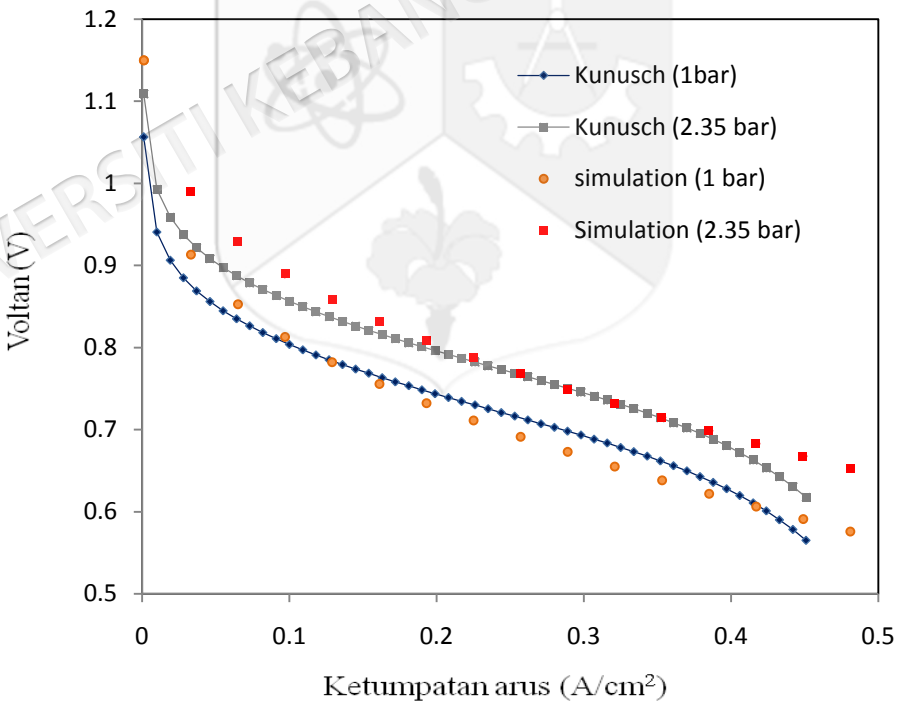
Keputusan kajian ini berbanding dengan uji kaji dan kajian simulasi yang dijalankan oleh (S.haji 2001). Uji kaji yang dilakukan oleh S. Haji dilakukan ada 14.34 slpm dan suhu 314 K manakala kajian simulasi dilakukan pada 2.89 slpm dan suhu 313 K. Rajah 5.12a menunjukkan bahawa kajian simulasi yang dijalankan oleh S. Haji menunjukkan trend yang serupa dengan data uji kaji mereka, manakala simulasi dalam kajian ini menunjukkan prestasi yang lebih baik daripada simulasi yang dihasilkan oleh S. Haji.

Pada kadar aliran 2.87slm dan suhu 313K, prestasi simulasi dalam kajian ini juga lebih baik daripada prestasi simulasi dilaporkan oleh S.Haji. Rajah 5.12b menunjukkan perbandingan hasil kajian simulasi ini dengan kajian simulasi oleh (Kunusch et al. 2010). Tekanan operasi untuk simulasi ialah 1bar dan 2,35 bar. Hasil kedua kajian simulasi menunjukkan trend yang serupa terhadap prestasi sel tunggal PEMFC. Walau bagaimanapun, hasil simulasi dalam kajian ini tidak menunjukkan penurunan voltan yang ketara di atas ketumpatan arus 0.45 A cm^{-2}, manakala keputusan simulasi dilakukan oleh Khunush menunjukkan penurunan nilai voltan . Penurunan nilai voltan ini kemungkinan disebabkan tidak cukupnya bahan tindak balas iaitu hidrogen dan oksigen untuk melakukan tindak balas.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)



(b)

Rajah 5.12. Perbandingan prestasi sel tunggal PEMFC (a) penyelidikan yang dilakukan oleh S.Haji 2011. (b) penyelidikan yang dilakukan oleh Kunusch 2010

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

5.6 KESIMPULAN

Kesimpulan yang boleh diambil daripada kajian ini, boleh guna untuk menentukan kesan beberapa parameter prestasi sel tunggal PEMFC adalah seperti berikut:

1. Peningkatan suhu sel tunggal PEMFC daripada 333 K kepada 353 K menyebabkan peningkatan prestasi yang ketara, purata untuk 0.6 V berlaku kenaikan ketumpatan arus dari 0.6154 Acm^{-2} hingga 1.0684 Acm^{-2}. Sedangkan peningkatan suhu sel daripada 353 K kepada 363K menyebabkan sedikit peningkatan prestasi, purata untuk 0.6 V berlaku kenaikan ketumpatan arus dari 1.0684 Acm^{-2} hingga 1.082 Acm^{-2}
2. Pada keadaan nilai kelembapan relatif yang sama pada salah satu sisi PEMFC, Peningkatan prestasi sel tunggal lebih besar dipengaruhi oleh kenaikan nilai RHK berbanding kenaikan nilai RHA. Prestasi sel tunggal yang tinggi pada 0.6 V ditunjukkan oleh nilai RHA dan daripada 70% hingga 90 % dan RHK 90%.
3. Kenaikan nilai tekanan pada sisi katod menyebabkan peningkatan prestasi sel fuel lebih ketara daripada peningkatan nilai tekanan pada sisi anod. Voltan 0.6 V boleh dicapai pada tekanan sisi anod ialah 1atm dan tekanan di katod ialah 2.5atm
4. Kenaikan jisim beban Pt daripada 0.2 mg kepada 0.6 mg mengakibatkan berlakunya peningkatan prestasi sel tunggal, tetapi kenaikan daripada 0.6 mg kepada 1 mg tidak menjejaskan prestasi ketara.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB VI

KESAN PRESTASI PEMFC TERHADAP PEMBENTUKAN CECAIR AIR YANG KELUAR DARI ANOD DAN KATOD

6.1 PENGENALAN

Prestasi optimum PEMFC bergantung pada operasi sistem PMFC. Pengurusan air di dalam sistem PEMFC merupakan salah satu masalah yang penting dalam operasi dan pencapaian prestasi optimum sistem. Oleh kerana itu, perlu imbangan air di dalam sistem PEMFC untuk memastikan bahawa membran kekal dalam keadaan terhidrat sertamengelakkan berlakunya kebanjiran pada katod dan dehidrasi pada anod (Baschuk & Li 2000; Chang et al. 2002; BiyIkoglu 2005). Beberapa kajian tentang kesan keseimbangan air pada sistem PEMFC menunjukkan bahawa jumlah kandungan air yang kecil dalam PEMFC menyebabkan membran menjadi kering dan retak. Sebaliknya, kandungan air yang besar menyebabkan berlakunya pembentukan cecair air sehingga bahagian katod menjadi banjir (Guvelioglu & Stenger 2007; Falcão et al. 2009).

Keberadaan air di dalam PEMFC mempunyai kesan baik dan juga buruk. Pada satu sisi air diperlukan untuk meningkatkan sifat konduktiviti ion pada membran, akan tetapi keberadaan air juga boleh menghalangi proton untuk mencapai permukaan pemangkin untuk melakukan tindak balas (Stumper et al. 2005; Liu et al. 2006; Liu et al. 2006). Kandungan air pada membran ditentukan oleh keseimbangan antara air yang terbentuk oleh tindak balas dan air pada proses pengangkutan seperti peristiwa EOD yang berkaitan dengan pemindahan proton bersama sama wap air melalui membran dari sisi anod ke sisi katod, resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod, dan resapan air ke oksida dan bahan api (Kraytsberg & Ein-Eli 2006; Yan et al.2006).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Fokus kajian ini ialah pembentukan cecair air yang mengalir keluar daripada sisi anod dan sisi katod. Keadaaan ini berdasarkan pada imbangan air di dalam sistem, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kelembapan relatif pada sisi anod (RHA) dan sisi katod (RHK), suhu dan tekanan operasi, dan nisbah stoikiometri hidrogen dan oksigen. Tujuan kajian ini adalah untuk menentukan kesan keadaan operasi terhadap prestasi sistem PEMFC dan kepekatan air cecair yang mengalir keluar dari sisi anod dan sisi katod. Penentuan keseimbangan air yang terdapat pada sistem PEMFC boleh diramalkan dengan menggunakan model matematik.

6.2 PENGURUSAN AIR PADA SISTEM PEMFC

Peristiwa EOD berlaku perpindahan proton bersama-sama dengan molekul air melewati membran dari sisi anod ke sisi katod. Air yang berpindah bersama dengan proton bergabung dengan air yang dihasilkan oleh tindak balas elektrokimia di sisi katod. Perbezaan nilai kepekatan air pada sisi anod dan sisi katod menyebabkan berlakunya resapan di dalam PEMFC. Kecerunan kepekatan air antara anod dan katod ditentukan oleh ketebalan membran, kandungan air dan kelembapan gas bahan tindak balas. Kelembapan gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC bergantung pada suhu dan tekanan (Janssen & Overvelde 2001; Liu et al. 2007; Park & Caton 2008; Lee et al. 2009).

Pada ketumpatan arus yang rendah, resapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod lebih dominan berbanding perpindahan wap air pada peristiwa EOD di dalam sistem PEMFC. Sebaliknya, jika terdapat ketumpatan arus yang tinggi maka nilai EOD adalah lebih dominan sehingga pada sisi anod mengalami penghidratan. Proton tidak boleh berpindah jika membran berada dalam keadaan kering dan pada keadaaan ini mengakibatkan nilai kekonduksian ionik menjadi rendah (Stumper et al. 2005; Liu et al. 2006).

Sebaliknya, jika kandungan air yang tinggi dalam saluran aliran dan liang elektrod akan menyebabkan penurunan pengaktifan pemangkin. Jika terdapat nilai kandungan air yang besar di dalam PEMFC maka boleh berlaku fenomena banjir pada sel fuel. Fenomena banjir ini boleh mengurangkan prestasi sistem. Secara amnya,

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

banjir di dalam PEMFC boleh memberi kesan terhadap ketumpatan arus yang diperoleh (Saleh et al. 2007; Sun et al. 2007; Yousfi-Steiner et al. 2008). Banjir boleh berlaku pada ketumpatan arus yang rendah akibat keadaan operasi tertentu, seperti suhu yang rendah, tahap kelembapan dan kadar aliran gas, yang mana pembentukan fasa gas tepu lebih cepat daripada wap air (Okada 1999; Spernjak et al. 2007). Walaupun fenomena banjir boleh berlaku pada kedua sisi elektrod (anod dan katod) sistem PEMFC, tetapi banjir yang berlaku pada sisi katod adalah penting kerana berlaku tindak balas pengurangan oksigen dan juga menghasilkan air (Barbir et al. 2005; Rao et al. 2007).

Apabila sistem PEMFC beroperasi untuk masa yang lama maka sifat-sifat mekanikal MEA boleh turun, akibatnya tindak balas pada permukaan elektrolit tidak maksimum (Ma et al. 2006). Pencapaian keseimbangan air yang sesuai pada sistem PEMFC adalah sangat penting mendapatkan prestasi sistem optimum (Li et al. 2008; Yousfi-Steiner et al. 2008).

Amirinejad et al. (2006) telah melakukan penyelidikan bahawa keadaan operasi optimum berlaku pada tekanan tertinggi, dan tekanan pada bahagian sisi katod lebih berkesan terhadap prestasi PEMFC. Park et al. (2008) melakukan penyelidikan tentang kesan kelembapan pada sisi katod. Hasil kajian menunjukkan bahawa kelembapan dan nilai pekali EOD mempengaruhi nilai ketumpatan arus dan kandungan air dalam membran, terutama pada sisi katod. Kenaikan ketumpatan arus dan penurunan pekali EOD akan meningkatkan bekalan air yang mengalir masuk ke dalam sisi anod.

Yan et al. (2006) mengkaji kesan pelbagai keadaan operasi, iaitu meliputi kadar aliran gas bahan tindak balas pada sisi katod, suhu sel, dan kelembapan bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod. Hasil kajian menunjukkan bahawa prestasi sel boleh diperbaiki dengan meningkatkan kepekatan aliran gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod, suhu dan kelembapan katod. Li & Sabir 2005 melakukan kajian tentang reka bentuk yang mampu menghilangkan air oleh aliran gas melalui saluran, dan tidak ada kawasan yang bertakung terbentuk pada permukaan sisi katod akibat pengumpulan air.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

6.3 RANCANGAN REKA BENTUK

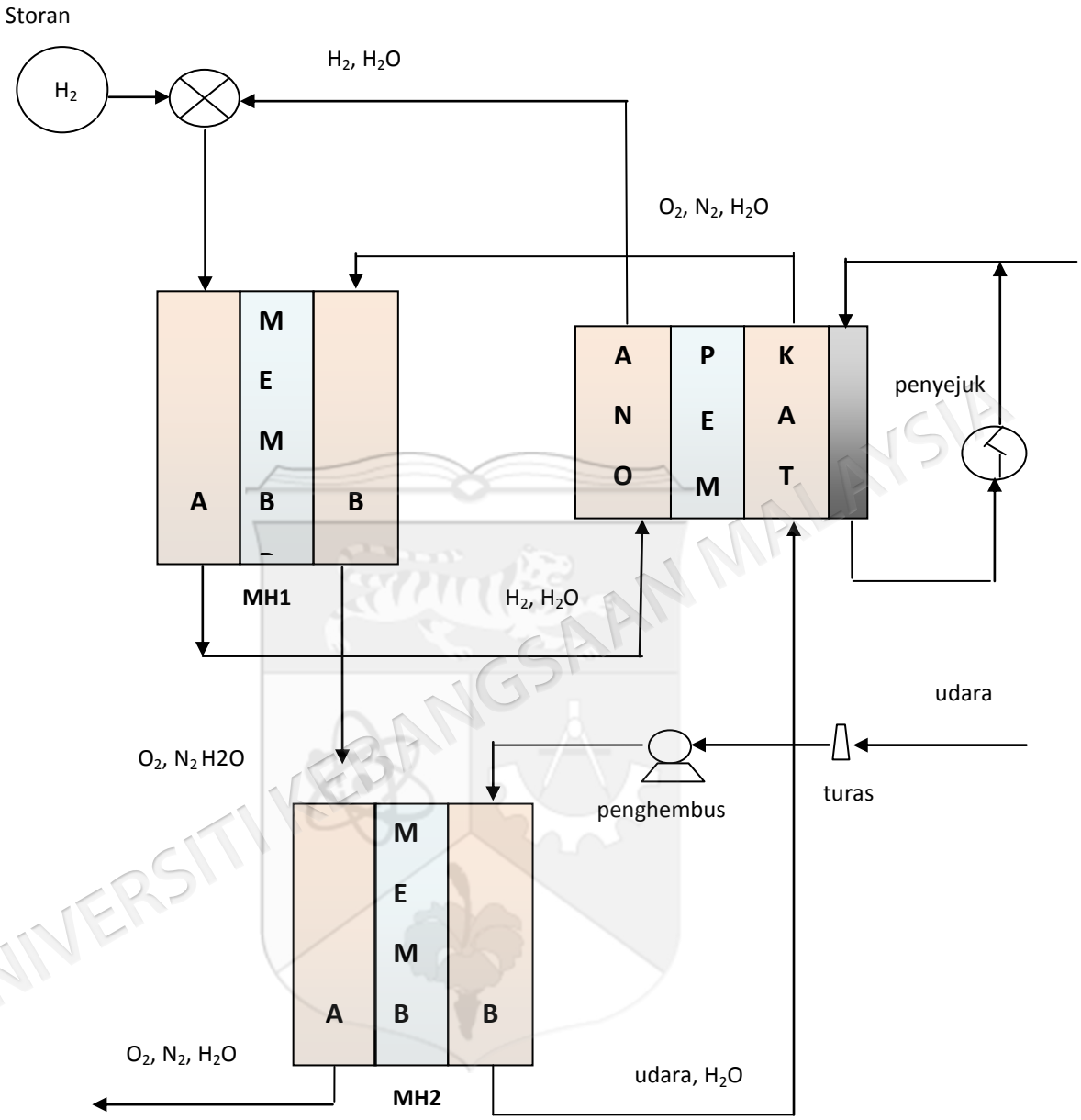
Prestasi sistem PEMFC digambarkan oleh nilai ketumpatan arus dan voltan yang dicapai, dan dipengaruhi oleh banyak faktor. Salah satu faktor tersebut ialah kandungan air di dalam membran PEMFC. Untuk memperoleh kandungan air yang cukup, air biasanya dialirkan ke dalam sel dengan menggunakan pelbagai kaedah seperti suntikan cecair, pengenalan wap dan melewatkan gas bahan tindak balas melalui pelembap sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC.

Pada penelitian ini, kaedah yang digunakan ialah menambahkan pelembap luaran untuk melembapkan gas bahan tindak balas sebelum mengalir masuk ke dalam sel seperti terlihat pada Rajah 6.1. Pelembap luaran yang digunakan di dalam sistem ini ialah jenis pelembap membran. Jenis pelembap ini memerlukan haba untuk menjana wap air untuk mencapai kelembapan yang sesuai. Pelembap membran dalam kajian ini melakukan dua fungsi. Fungsi pertama adalah untuk melembapkan gas hidrogen sebelum mengalir masuk ke dalam sisi anod pada pelembap membran I (MH1). Fungsi kedua adalah untuk melembapkan oksigen sebelum mengalir masuk ke dalam sisi katod pada pelembap membran II (MH2). Komponen yang mengalir keluar dari sisi anod ialah hidrogen dan air (fasa wap dan cecair). Komponen mengalir keluar dari sisi anod ini boleh digunakan semula sebagai bahan tindak balas dan disuapkan masuk ke dalam sisi anod.

Sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC, hidrogen dilembapkan di MH1. Wap air yang digunakan untuk mengawal kelembapan hidrogen diperoleh daripada wap air yang mengalir keluar dari sisi katod. Wap air berguna untuk melembapkan hidrogen berasal dari keluaran katod. Komponen yang mengalir keluar dari katod terdiri daripada air (fasa wap dan cecair), oksigen dan nitrogen. Baki wap air yang mengalir keluar daripada MH1 digunakan untuk melembapkan oksigen sebelum oksigen mengalir masuk ke dalam sisi katod di MH2.

Kandungan air membran bergantung pada beberapa faktor, seperti kelembapan relatif bahan tindak balas pada sisi anod dan sisi katod, suhu dan tekanan operasi, dan nisbah stoikiometri hidrogen dan oksigen. Kajian ini juga untuk mengetahui hubungan

keadaaan operasi terhadap prestasi PEMFC dan kesannya terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan katod.



Rajah 6.1 Proses sistem PEMFC menggunakan hidrogen langsung

6.4 IMBANGAN JISIM MENYELURUH PADA SISTEM PEMFC

Asas untuk menentukan kepekatan bahan tindak balas yang terdapat pada sistem PEMFC telah dijelaskan pada Bab IV dan boleh digunakan selanjutnya untuk menentukan kepekatan yang berhubungan reka bentuk sistem PEMFC. Jumlah cecair

air yang keluar dari kedua sisi PEMFC meliputi semua air yang masuk dan dihasilkan oleh PEMFC. Kepekatan air yang keluar dari sisi anod ($\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ anod}$) dan sisi katod ($\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ katod}$) meliputi kepekatan air yang ikut bersama gas hidrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi anod, kepekatan wap air yang berpindah pada peristiwa EOD dan kepekatan air pada resapan balik dari sisi katod ke sisi anod.

Berdasarkan perhitungan imbangan jisim pada Bab IV, maka jumlah wap air di dalam gas hidrogen $\mathcal{N}_{H_2O\ dalam\ \ H_2}$ yang dibekalkan mengalir masuk ke dalam sisi anod ialah ditakrifkan sebagai berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ dalam\ \ H_2} = \mathcal{S}_{H_2}.\mathcal{N}_{H_2}.\eta_{cell}\cdot\frac{\varphi.P_{V_s}}{P_a-\varphi.P_{V_s}} \tag{6-1}$$

Jumlah wap air di dalam oksigen dibekalkan masuk ke dalam sisi katod ialah ditakrifkan seperti berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ dalam\ O_2} = \frac{\mathcal{S}_{O_2}}{4F}i.\eta_{cell}\frac{\varphi.P_{V_s}}{P_a-\varphi.P_{V_s}} \tag{6-2}$$

Jumlah wap air maksimum yang mengalir keluar daripada sisi anod dan katod diandaikan mempunyai kelembapan relatif 100% dengan kejatuhan tekanan yang tidak ketara. Kepekatan wap air pada kelembapan relatif 100% yang mengalir keluar daripada sisi anod dan katod adalah ditakrifkan seperti berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ dalam\ H_2,kel} = \mathcal{N}_{H_2tdk\ reak}\cdot\eta_{cell}\cdot\frac{P_{sat}}{P-.P_{sat}} \tag{6-3}$$

Kepekatan wap air di dalam oksigen pada kelembapan relative 100% adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2Odalam\ \ udara\ ,kel} = \mathcal{N}_{udara\ ,kel}\ \eta_{cell}\ \frac{.P_{sat}}{P-.P_{sat}} \tag{6-4}$$

dimana:

$\mathcal{N}_{H_2O\ dalam\ H_2,kel}$ ialah kepekatan wap air yang mengalir keluar dari sisi anod (mol)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$\mathcal{N}_{H_2Odalam\ \ udara\ ,kel}$ ialah kepekatan wap air mengalir keluar dari sisi katod (mol)

Jumlah proton yang berpindah dari sisi anod ke sisi katod pada peristiwa EOD $\mathcal{N}_{drag}$ boleh dikira dengan menggunakan persamaan berikut (Yu et al. 2005; Zhou et al. 2006; Zong et al. 2006):

$$\mathcal{N}_{drag} = \frac{n_d}{F} i \tag{6-5}$$

Nilai n_d boleh ditakrifkan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$n_d = \frac{2.5\ \lambda pem}{22} \tag{6-6}$$

λpem ialah kandungan air membran

Nilai kandungan air membran boleh dikira dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\lambda = 0.0043 + 17.81 a_{H2O} - 39.85\ a_{H2O}^2 + 36.\ a_{H2O}^3 \qquad 0 < a_{H2O} \leq 1 \tag{6-7}$$

Hassan et al. 2009 menyatakan bahawa air yang meresap dari sisi katod ke sisi anod adalah seperti berikut:

$$J_w = k_g(y_a - y_c) \tag{6-8}$$

Maka kepekatan wap air yang mengalir keluar dari sisi anod adalah seperti berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ anod} = \left(\mathcal{S}_{H_2}.\mathcal{N}_{H_2}.\eta_{cell}.\frac{\varphi.P_{V_s}}{P_a - \varphi.P_{V_s}} - \frac{n_d(x)I(x)}{F}\right) + k_g(y_a - y_c) \tag{6-9}$$

Maka kepekatan wap air yang mengalir keluar dari sisi katod adalah seperti berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ katod} = \left(\mathcal{S}_{O_2}.n_{cell}\ \frac{\mathcal{N}_{O_2}}{XO_2}\ \frac{\varphi.P_{V_s}}{P_c - \varphi.P_{V_s}} + \frac{\mathcal{N}_{H_2 supply}}{\mathcal{S}_{H_2}} + \frac{n_d(x)I(x)}{F}\right) - k_g(y_a - y_c) \tag{6-10}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

6.5 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan sisi katod berhubungan dengan prestasi PEMFC yang dihasilkan. Simulasi hubungan prestasi sel yang dihasilkan terhadap pembentukan cecair air pada PEMFC ditunjukan oleh Rajah 4.3 4.7 4.10, 4.11 dan 5.1 Prestasi PEMFC dikesan oleh beberapa keadaaan operasi seperti kelembapan relatif, tekanan, suhu, nisbah stoikiometri hidrogen dan oksigen. Keadaaan operasi yang digunakan di dalam PEMFC melibatkan nilai RHA dan RHK daripada 0 kepada 100%, perubahan ketumpatan arus daripada 0.1 Acm^{-2} kepada 0.9 Acm^{-2}, nisbah stoikiometri untuk hidrogen ialah 1.2 dan oksigen ialah 2, dan tekanan pada sisi anod dan sisi katod ialah 1atm. Berikut ini merupakan kesan beberapa keadaaan operasi tersebut terhadap jumlah pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari PEMFC.

6.5.1 Kesan Perubahan Voltan Terhadap Cecair Air pada Anod Dengan Perubahan Ketumpatan Arus

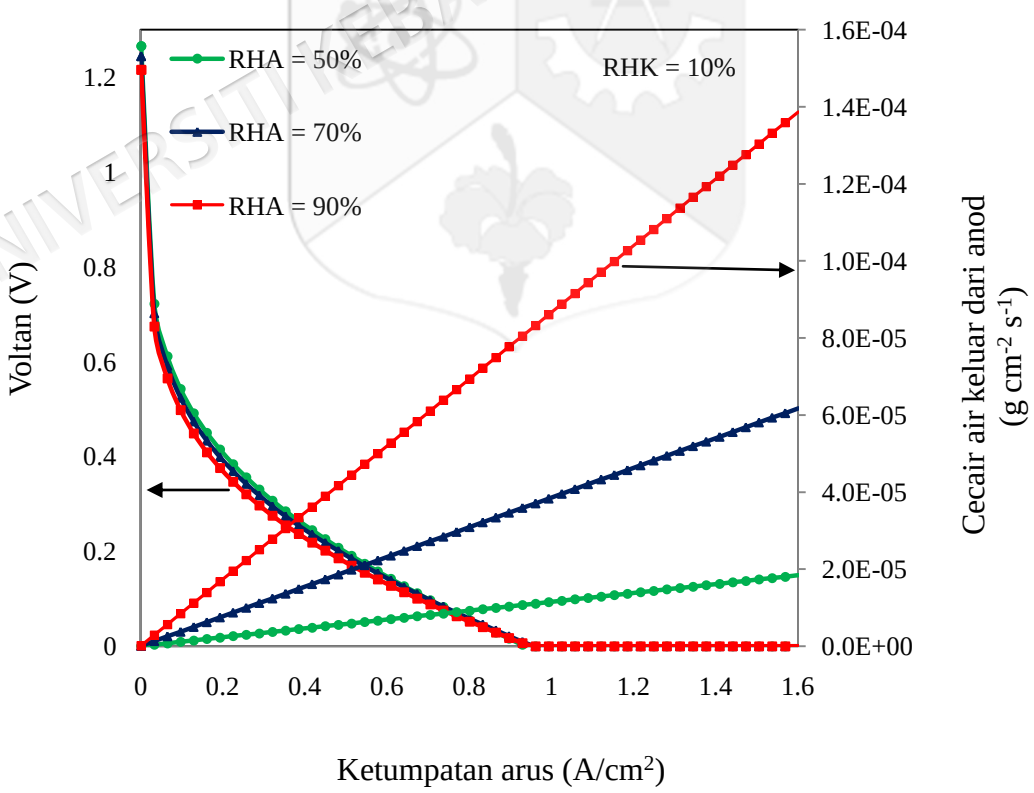
Pada bahagian ini, perubahan nilai voltan PEMFC diikuti oleh perubahan nilai ketumpatan arus. Nilai RHA dan RHK dibezakan daripada 10% hingga 90%, dan julat suhu operasi 303 K hingga 363 K. Rajah 6.2 (a), 6.2 (b), dan 6.2 (c) menunjukkan hubungan prestasi PEMFC terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 K. Kenaikan nilai RHA tidak menyebabkan peningkatan yang ketara terhadap prestasi PEMFC. Penurunan nilai voltan atau kenaikan nilai ketumpatan arus pada sistem PEMFC menyebabkan berlakunya peningkatan jumlah cecair air yang dihasilkan pada sisi anod PEMFC.

Walau bagaimanapun, kenaikan nilai RHA mengakibatkan berlakunya peningkatan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod. Keadaan ini berlaku kerana disebabkan oleh peningkatan nilai RHA dan wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi anod. Kesan yang ditimbulkan ialah berlakunya peningkatan jumlah cecair air. Walau bagaimanapun, kenaikan nilai RHK menyebabkan berlakunya peningkatan terhadap prestasi sistem PEMFC dan menurunkan pembentukan cecair air pada sisi anod. Keadaan ini berlaku kerana terdapatnya

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

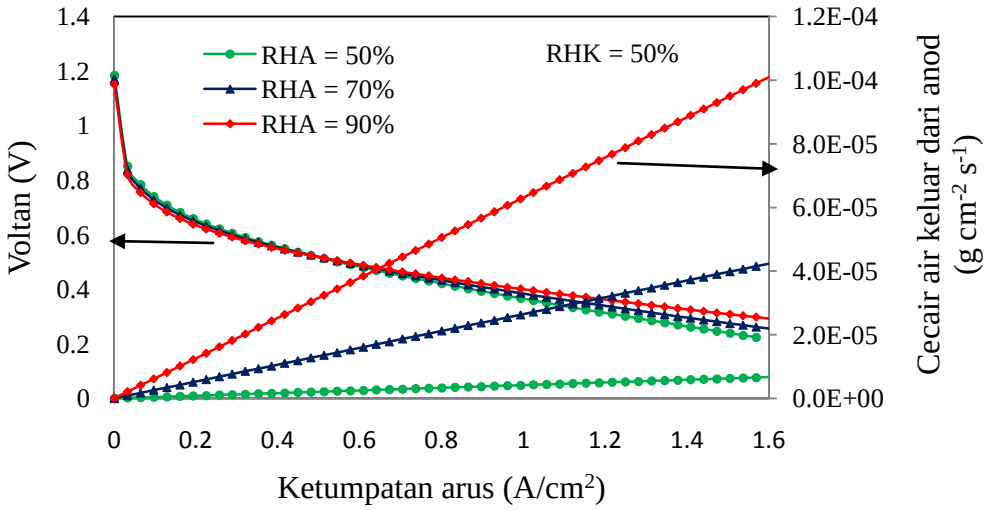
kenaikan nilai RHK sehingga menyebabkan peningkatan jumlah purata air di dalam membran PEMFC.

Kenaikan jumlah air membran PEMFC menyebabkan meningkatnya jumlah proton dan wap air yang berpindah dari sisi anod ke sisi katod. Kesan kenaikan nilai RHK terhadap prestasi sel adalah adanya perubahan nilai ketumpatan arus maksimum daripada 0.9 Acm^{-2} pada RHK 10% kepada 0.2 Acm^{-2} pada RHK 50% dan 0.4 Acm^{-2} pada RHK 90%. Cecair air berlaku pada nilai RHA dalam julat 50% hingga 90%. Air mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap jika nilai RHA di bawah 50%. Pada nilai RHK 90%, cecair air berlaku pada nilai RHA 90% dan 70%. Air yang mengalir keluar dari sisi anod juga berada dalam fasa wap jika nilai RHA 50%. Rajah 6.2(d) menunjukkan bahawa pada nilai RHA 90%, pembentukan cecair air berlaku pada nilai RHK dalam julat 10% hingga 70%. Air mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap jika nilai RHK di atas 70%. Kenaikan nilai RHK menyebabkan berlakunya peningkatan prestasi sistem PEMFC.

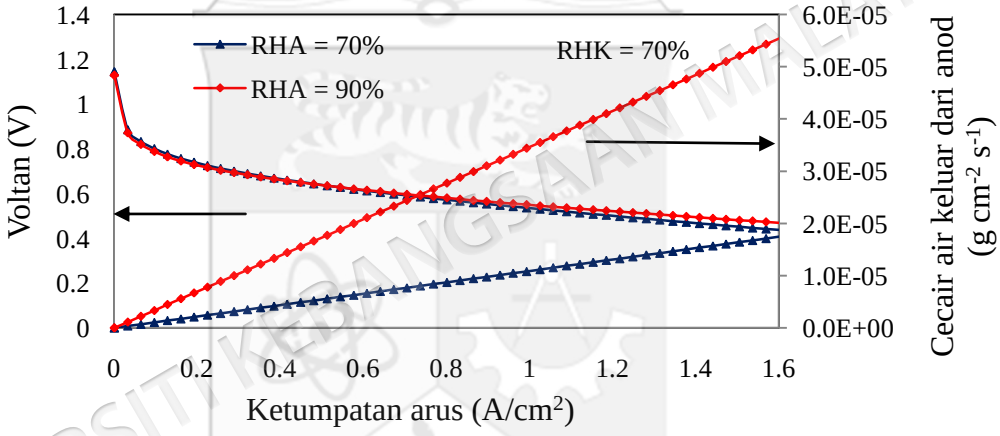


(a)

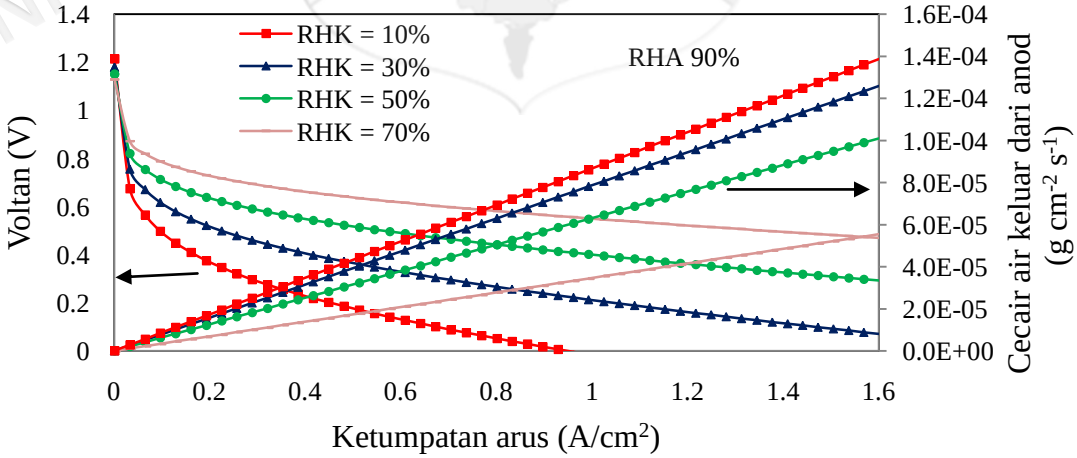
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(b)



(c)

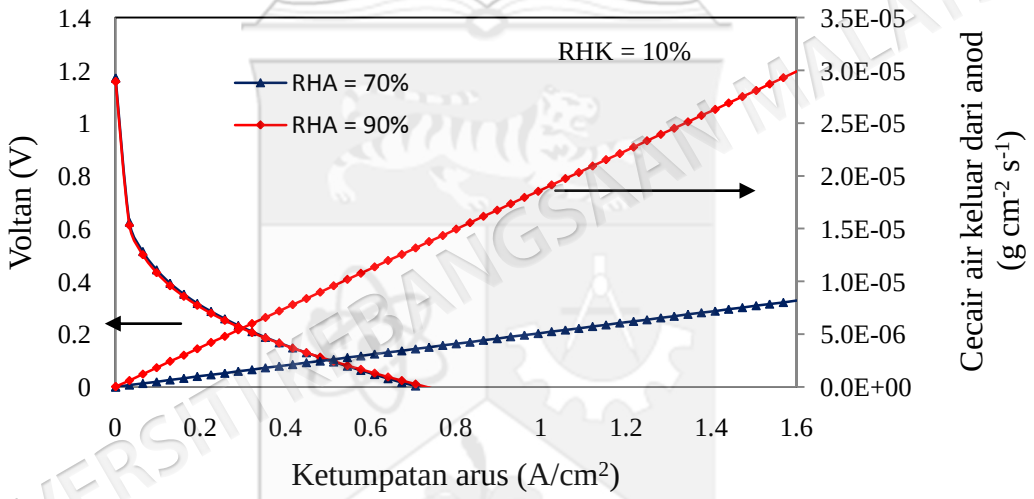


(d)

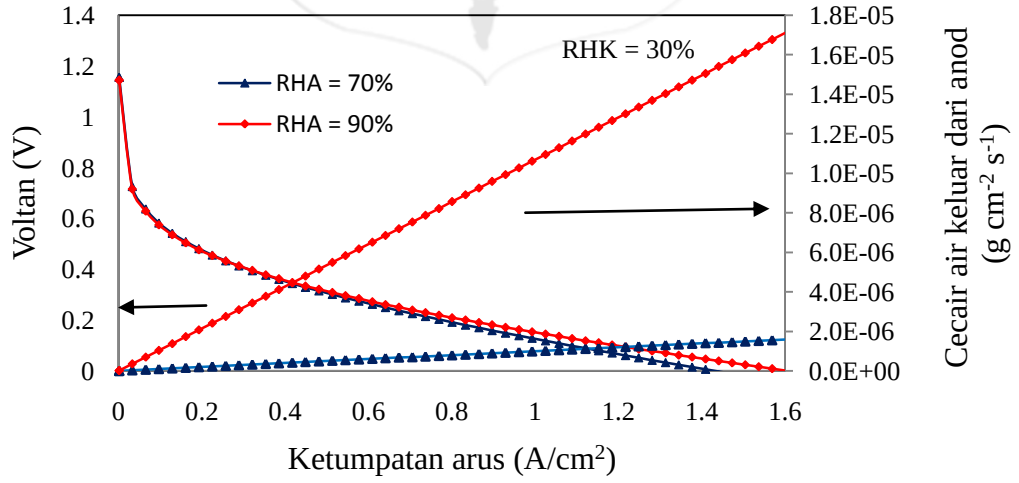
Rajah 6.2 Hubungan prestasi PEMFC terhadap cecair air mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 363 dengan (a) RHK 10% (b) RHK 50% dan (c) RHK 70% dan (d) RHA 90%

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Rajah 6.3 menunjukkan pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod pada suhu 353 K , nilai RHK daripada 10% kepada 30% dan nilai RHA daripada 70% hingga 90%. Pada nilai RHK di atas 30%, air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap kerana masih dibawah kelelembapan relatif maksimum iaitu 100%. Keadaan ini menunjukkan bahawa nilai RHK di atas 30% dan nilai RHA di bawah 70%, air mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap. Apabila kenaikan nilai RHK meningkat menjadi 30%, ketumpatan arus pada 0 V ialah purata 1.4 Acm^{-2}, dan jika nilai RHK 70% purata ialah 1.6Acm^{-2}. Berdasarkan Rajah 6.1 dan 6.2, boleh disimpulkan bahawa cecair air mengalir keluar dari sisi anod terbentuk pada suhu 353 K dan 363 K. Jika nilai RHA di bawah 70% untuk kedua suhu ini , maka air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap.



(a)



(b)

Rajah 6.3 Hubungan prestasi PEMFC terhadap cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod PEMFC pada suhu 353 dengan (a) RHK = 10% (b) RHK = 30%

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

6.5.2 Pengaruh Prestasi PEMFC Terhadap Pembentukan Cecair Air pada Katod

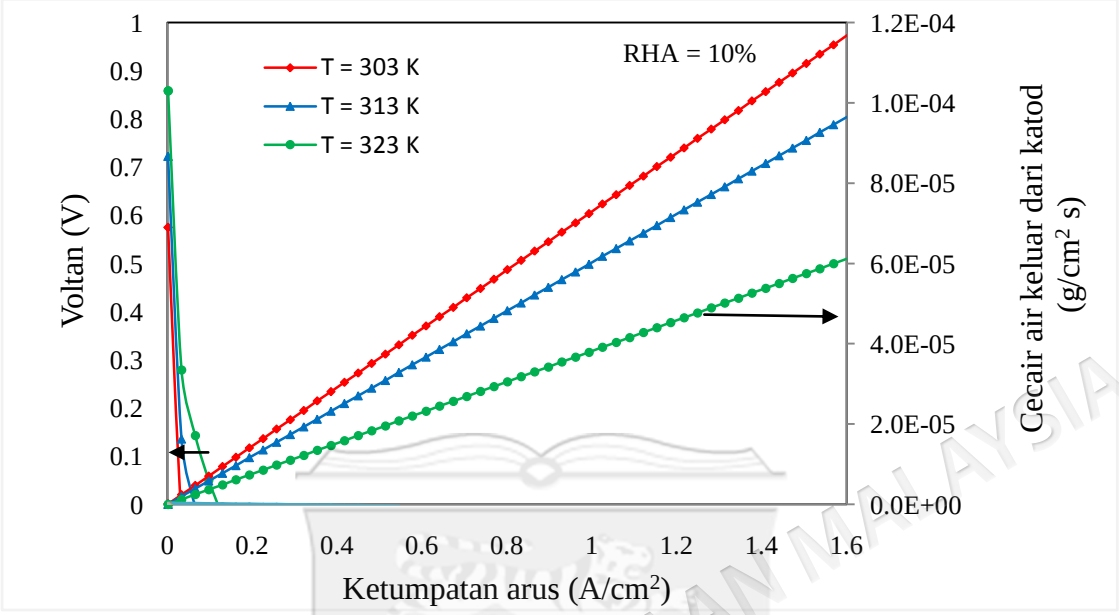
Rajah 6.3 menunjukkan bahawa prestasi PEMFC meningkat pada suhu operasi yang lebih tinggi. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai voltan pada ketumpatan arus yang tetap. Meningkatnya suhu PEMFC mempengaruhi berlakunya penurunan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod. Keadaan ini berlaku kerana kenaikan suhu sel menyebabkan peningkatan jumlah air dalam fasa wap untuk mencapai kelembapan relatif 100%. Akibat daripada keadaan ini, jumlah air dalam fasa cecair mengalir keluar dari sisi katod mengalami penurunan pada suhu operasi yang lebih tinggi. Meningkatnya nilai RHA menyebabkan peningkatan terhadap jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod. Keadaan ini berlaku kerana disebabkan meningkatnya RHA sehingga mengakibatkan berlakunya sedikit peningkatan prestasi PEMFC. Keadaan ini boleh berlaku apabila nilai RHA meningkat daripada 10% kepada 90% pada 323 K, yang menyebabkan ketumpatan arus maksimum meningkat daripada 0,13 A cm^{-2} kepada 0.19 A cm^{-2}.

Kenaikan nilai prestasi PEMFC ditunjukkan oleh peningkatan nilai jumlah wap air berpindah bersama dengan proton pada fenomena EOD. Kesan akibat meningkatnya prestasi sel fuel ialah berlakunya peningkatan jumlah air yang dihasilkan melalui peristiwa tindak balas. Pada nilai RHA 10%, cecair air yang terbentuk dan mengalir keluar dari sisi katod pada suhu dalam julat 303 K hingga 323 K. Air yang mengalir keluar dari sisi katod berada dalam fasa wap apabila nilai suhu di atas 323 K. Kenaikan nilai RHA menyebabkan berlakunya peningkatan cecair air. Perilaku ini boleh diamati pada nilai RHA 50% dan 90% .Pada keadaan ini, cecair air berlaku pada suhu daripada 303 K hingga 333 K. Jika suhu di atas 333 K, semua air yang mengalir keluar dari sisi katod berada dalam fasa wap.

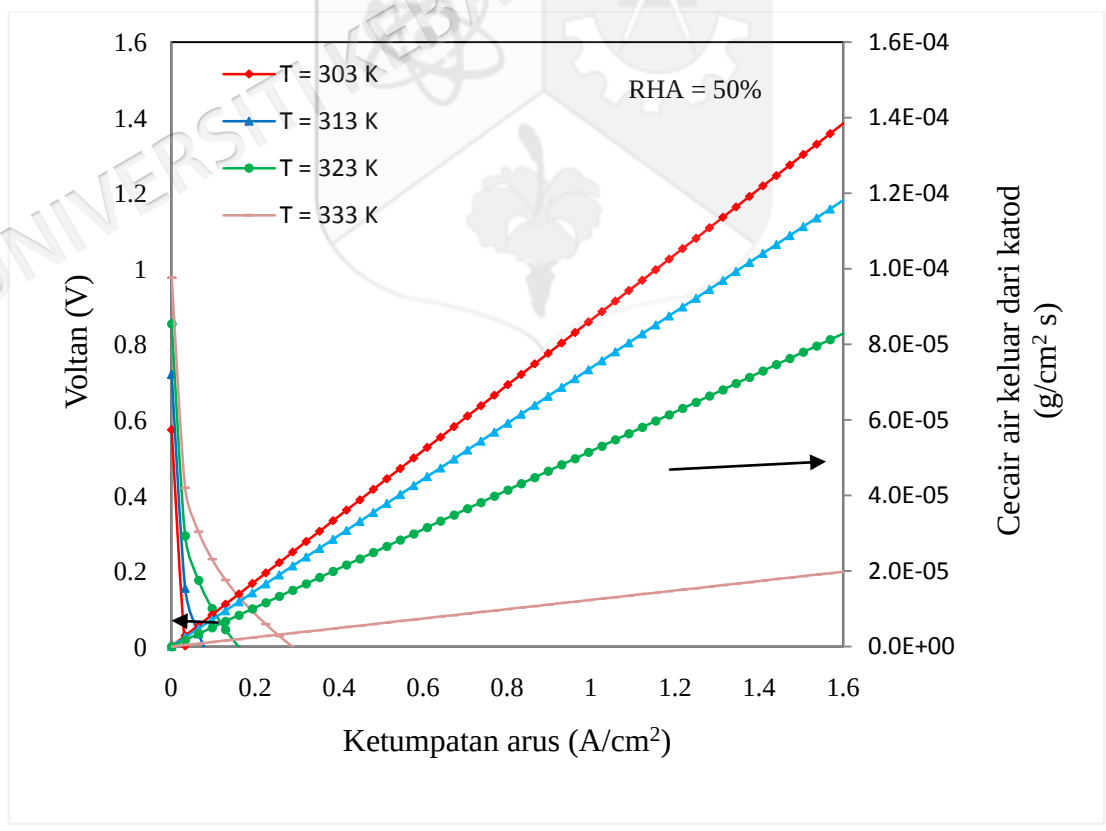
Ketumpatan arus untuk semua keadaan operasi menunjukkan bahawa cecair air yang dihasilkan cenderung memiliki nilai yang sama walaupun terdapat perbezaan nilai RHK. Ketumpatan arus pada setiap suhu operasi hampir sama, walaupun nilai RHA berbeza. Jumlah cecair air pada nilai RHK 90% dan suhu 333 K lebih rendah jika berbanding pada suhu di bawah 333 K. Jumlah cecair air yang mengalir keluar

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

dari sisi katod adalah lebih tinggi apabila nilai voltan adalah 0 V dan ketumpatan arus ialah pada nilai yang besar.

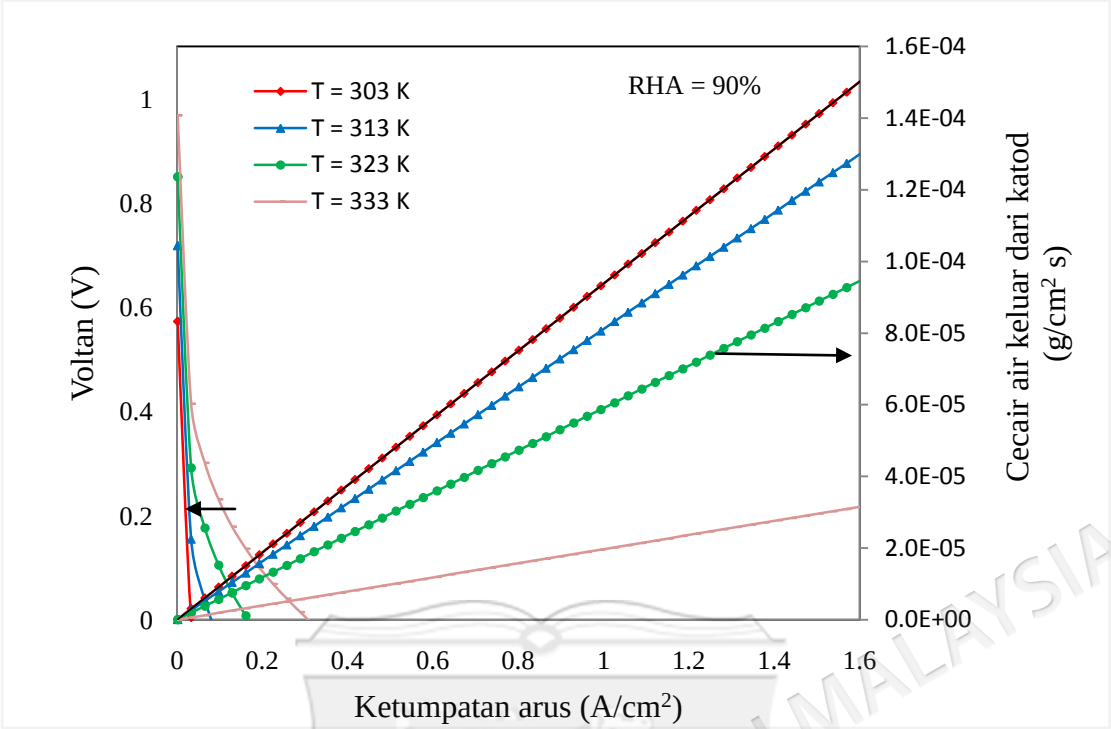


(a)



(b)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



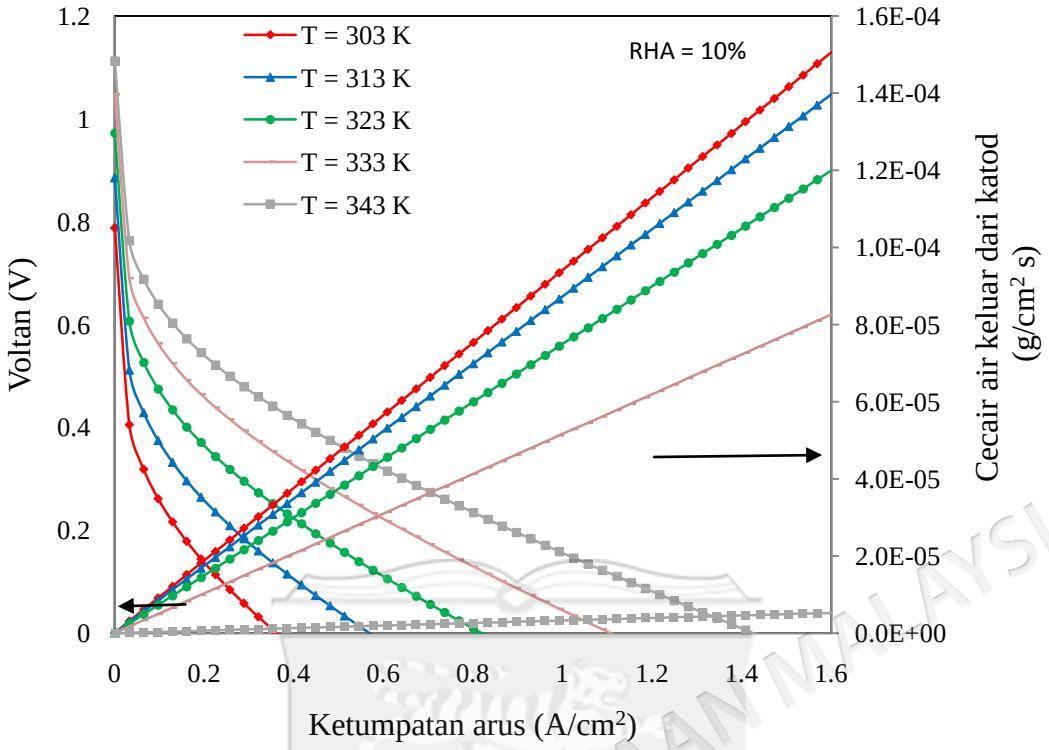
(c)

Rajah 6.4 Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 10% pada nilai (a) RHA 10% (b) RHA 50% dan (c) RHA = 90%

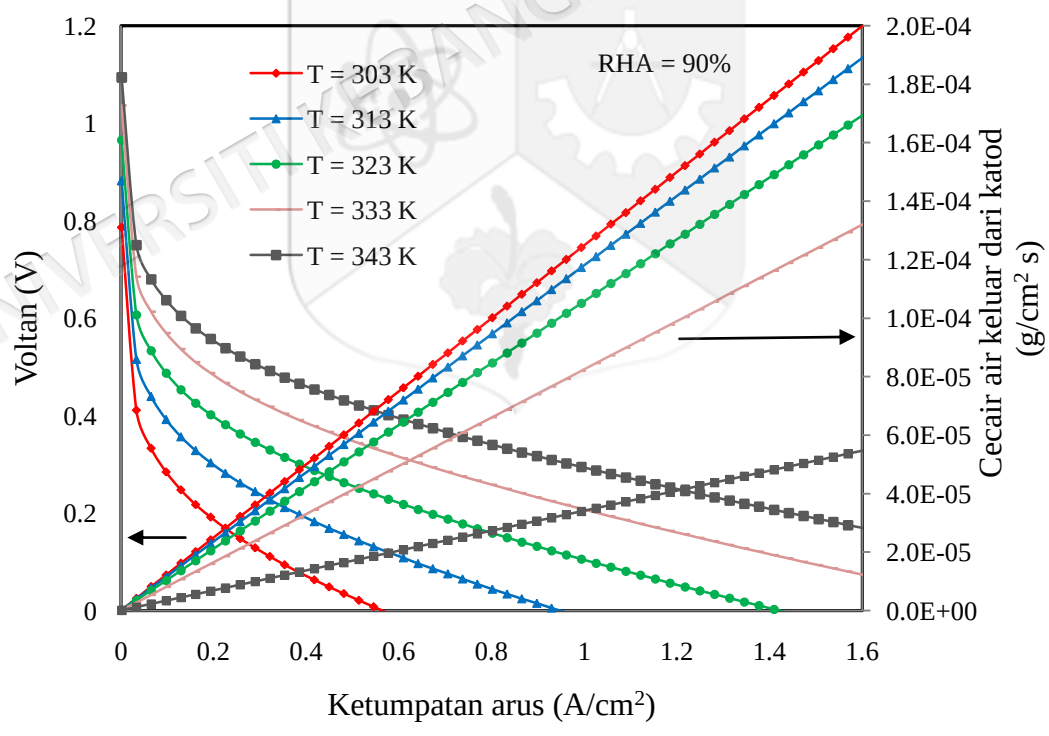
Rajah 6.4 menunjukkan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air pada RHK 50%. Pada nilai RHA dalam julat 10% hingga 90% dan suhu PEMFC daripada 303 K hingga 343 K maka berlakunya pembentukan cecair air . Meningkatnya nilai RHA maka menyebabkan peningkatan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod dengan ketara. .

Peningkatan jumlah air juga menyebabkan berlakunya penurunan prestasi PEMFC. Kenaikan nilai suhu operasi PEMFC menyebabkan berlakunya penurunan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod. Pada suhu 303 K hingga 333 K, peningkatan suhu operasi menyebabkan meningkatnya prestasi PEMFC. Kenaikan suhu operasi pada nilai ketumpatan arus di bawah 0,6 A cm^{-2} menunjukkan sedikit peningkatan jumlah cecair air yang terbentuk. Sedangkan pada suhu 333 K dan 343 K menunjukkan peningkatan jumlah pembentukan cecair air. Ini dibuktikan oleh peningkatan nilai voltan dan ketumpatan arus.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)

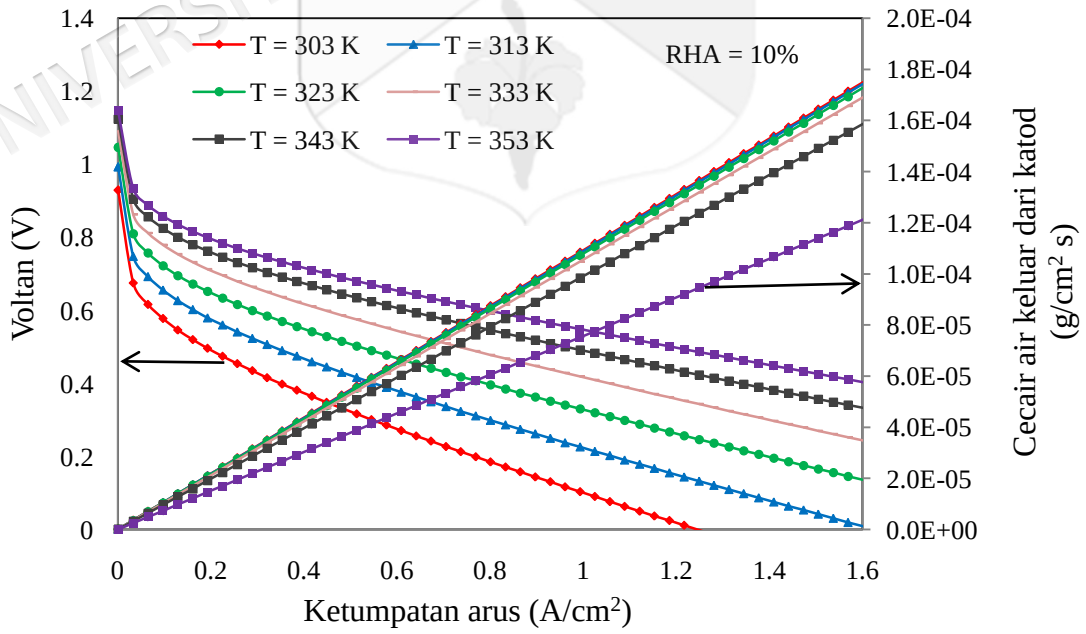


(b)

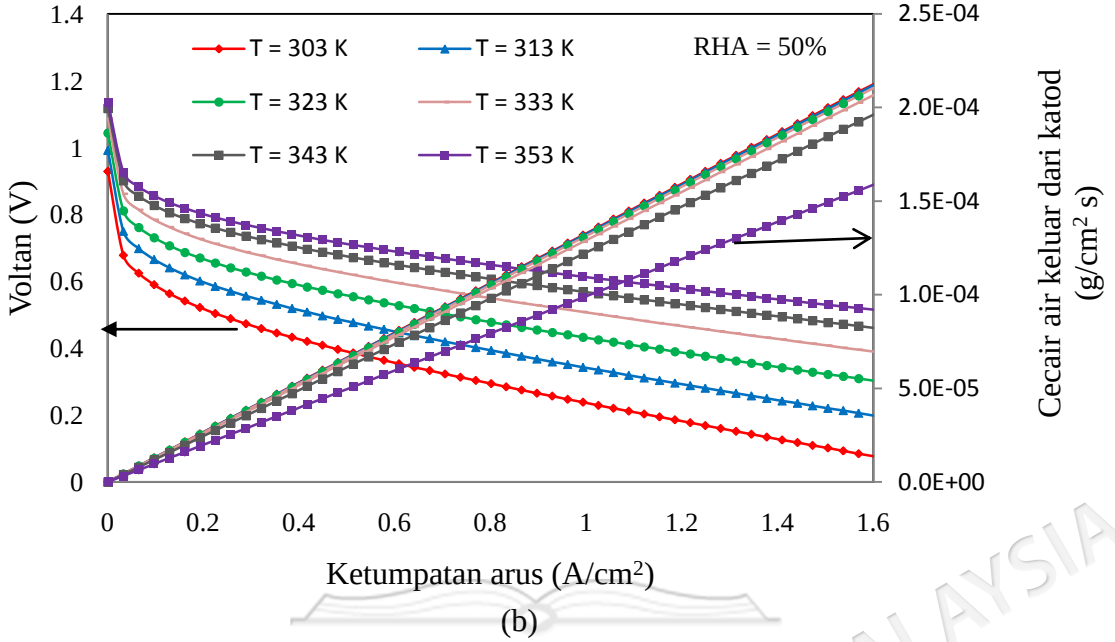
Rajah 6.5 Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 50% dengan (a) RHA = 10% dan (b) RHA = 90%.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

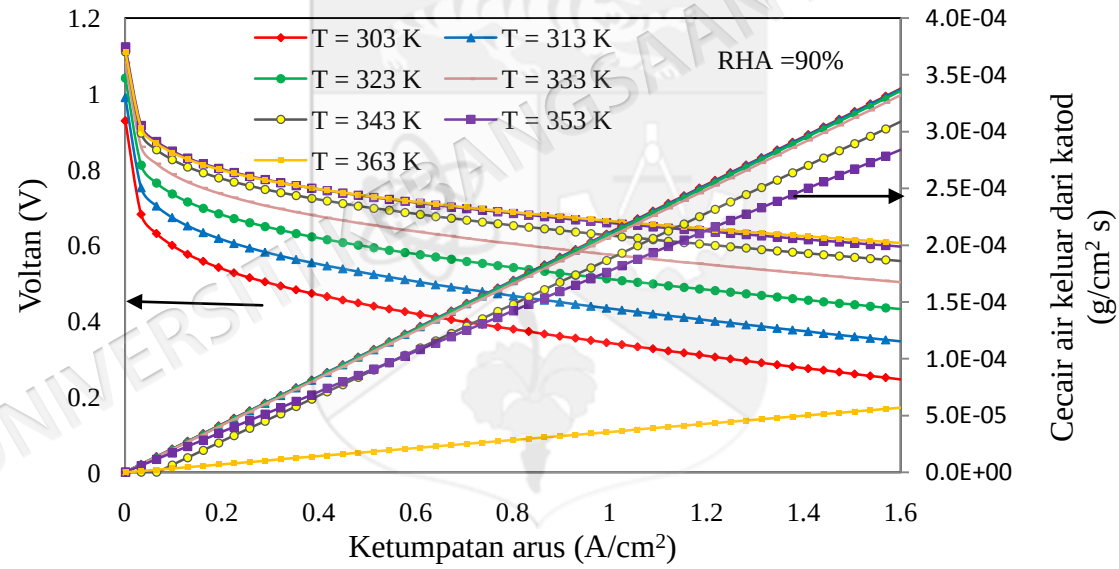
Rajah 6.5 menunjukkan bahawa pembentukan cecair air berlaku di RHK 90% dan suhu PEMFC daripada 303 kepada 363 K. Peningkatan prestasi PEMFC terutama berlaku pada suhu 303 K hingga 333 K. Sedangkan untuk suhu besar daripada 333 K, peningkatan prestasi PEMFC berlaku tidak ketara. Pada nilai RHA 10% prestasi PEMFC sedikit berbeza pada suhu 343 K dan 353 K, dan pada RHA 50% cenderung mempunyai nilai sama, sedangkan pada RHA 90% mempunyai nilai sama pada 353 K dan 363 K dan cenderung sama pada suhu 343 K. Keadaan ini menunjukkan bahawa kenaikan nilai RHA, RHK dan suhu PEMFC tidak mempunyai kesan pada peningkatan PEMFC. Apabila nilai RHA ialah 10%, 70% dan 90% dan suhu PEMFC ialah 303 K, 313 K dan 323 K, maka jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod ialah sama. Pada suhu PEMFC 343 K dan 353 K dengan RHA 90%, jumlah air yang terdapat pada sisi katod ialah sama dengan nilai ketumpatan arus di bawah 1 Acm^{-2}. Sedangkan jika nilai ketumpatan arus di atas 1 Acm^{-2}, terdapat sedikit perbezaan jumlah cecair air. Jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod yang mempunyai nilai sama menunjukkan bahawa tidak berlakunya peningkatan jumlah air pada sisi katod. Hal ini disebabkan kerana tidak terjadi lagi peningkatan perubahan tindak balas hidrogen dengan oksigen sehingga jumlah air yang terbentuk menjadi tetap di dalam stek PEMFC.



(a)



(b)



(c)

Rajah 6.6 Hubungan prestasi PEMFC terhadap pembentukan cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod pada RHK 90% dengan (a) RHA = 10% dan (b) RHA = 90%.

6.6. Pengesahan Jumlah Pembentukan Cecair Air

Keputusan pada penyelidikan ini berbanding dengan uji kaji yang dilakukan oleh Cai et al.(2006) dan Karmik (2006). Rajah 6.6 menunjukkan bahawa hasil yang dihasilkan adalah cenderung memiliki nilai sama. Rajah 6.6a menunjukkan hubungan nilai

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

ketumpatan arus terhadap jisim air yang mengalir keluar daripada sisi katod. Keadaan operasi sistem ini ditunjukkan dalam Jadual 6.1. Peningkatan nilai ketumpatan arus PEMFCmenyebabkan berlakunya peningkatan jisim air yang mengalir keluar dari pada sisi katod.. Hasil kajian simulasi berbanding dengan uji kaji Cai mempunyai kecenderungan yang sama tetapi dan terlihat pada Rajah 6.6(a). Di bawah ketumpatan arus 0.4 A cm^{-2} terlihat bahawa berlaku sedikit perbezaan jisim air yang mengalir keluar daripada sisi katod, manakala diatas 0.4 jisim air yang mengalir keluar katod adalah cenderung sama. Salah satu faktor penyebab ialah perbezaan prestasi yang dihasilkan. Semakin tinggi prestasi maka air yang dihasilkan semakin banyak.

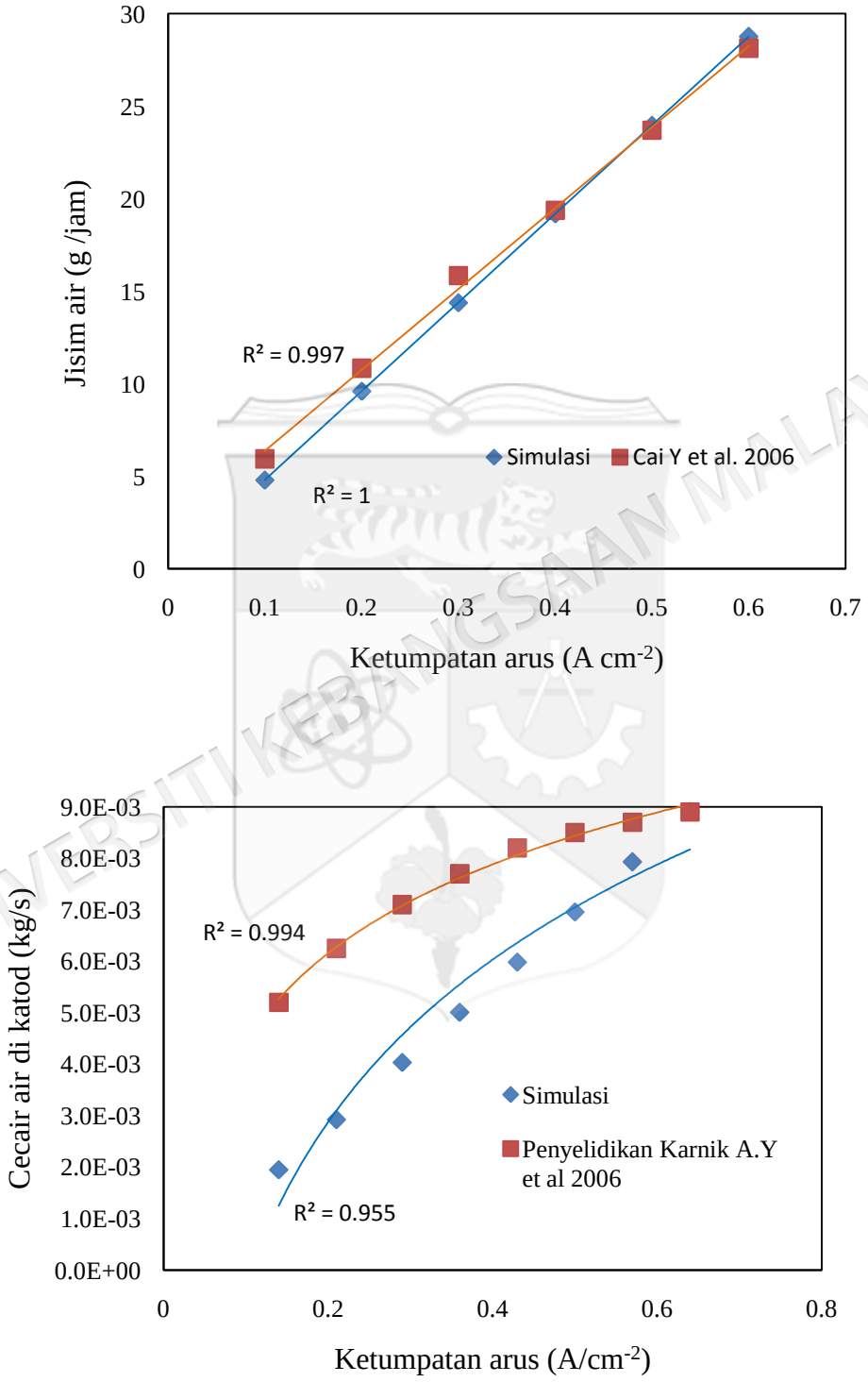
Jadual 6.1. Parameter penyelidikan oleh Cai dan Karmik,

Parameter	**Cai**	**Karmik**
Kelembapan relatif di katod (RHK)	75%	0
Kelembapan relatif di anod (RHA)	56%	100%
Tekanan di anod (PA)	2 atm	1.3 atm
Tekanan di katod (PK)	2 atm	1.3atm
Ketumpatan arus (i)	0.1-0.6 A cm^{-2}	0.1-0.6 A cm^{-2}
Suhu (T)	333 K	353 K
Nisbah stoikhiometri hidrogen	1.1	2
Nisbah stoikhiometri oksigen	2.5	2
Kawasan aktif MEA	128 cm^2	280 cm^2

Rajah 6.6(b) merupakan hasil kajian terhadap penyelidikan yang dilakukan oleh Karmik. Rajah ini menunjukkan hubungan antara ketumpatan arus dan jumlah cecair air yang dihasilkan di sebelah katod. Data yang digunakan untuk keadaaan operasi sistem ditunjukkan oleh Jadual 6.1. Peningkatan nilai ketumpatan arus menyebabkan naiknya jumlah cecair air air yang dihasilkan pada sisi katod. Hasil kajian ini menunjukan kecenderungan yang sama antara kenaikan nilai ketumpatan arus terhadap jumlah cecair air yang dihasilkan pada sisi katod. Peningkatan ketumpatan arus menyebabkan jumlah cecair air yang dihasilkan kecenderungan sama. Hal ini terlihat pada ketumpatan yang tinggi, dimana kenaikan jisim cecair air peningkatannya tidak terlalu tinggi bahkan hampir sama. Samping itu, hasil kajian ini

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

menunjukan hasil simulasi lebih rendah jumlah cecair air yang dihasilkan berbanding penyelidikan yang dilakukan oleh Karnik.



Rajah 6.7. Perbandingan cecair air hasil penelitian dengan (a) penyelidikan Can et al 2006 dan (b) penyelidikan Karmik et al 2006.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

6.7 KESIMPULAN

1. Kenaikan nilai RHA menyebabkan peningkatan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan sisi katod, sedangkankenaikan nilai RHK menyebabkan penurunan jumlah cecair air mengalir keluar dari sisi anod dan kenaikan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod.
2. Pembentukan cecair air pada sisi anod PEMFC berlaku dalam julat suhu 353 K hingga 363 K. Pada suhu di bawah 353 K, air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap. Cecair air pada suhu 353 K berlaku dalam julat nilai RHK daripada 10 % kepada 30% dan nilai RHA daripada 61% hingga 100%. Pada 363 K, cecair air berlaku pada nilai RHK pada julat 10 % hingga 70% RHC dan nilai RHA pada julat 35 % hingga 55% .
3. Kenaikan nilai RHK menyebabkan berlakunya peningkatan nilai voltan. Sedangkan kenaikan nilai RHA tidak menyebabkan peningkatan yang ketara terhadap prestasi PEMFC.
4. Jika suhu operasi PEMFC mengalami penurunan daripada 363 K kepada 323 K maka cecair air berlaku pada nilai RHK yang lebih rendah.
5. Pada kondisi nilai RHK dan RHA 90% dan suhu operasi 303 K hingga 333 K, maka menunjukkan berlakunya kenaikan prestasi PEMFC dan jumlah cecair air mengalir keluar dari sisi katod. Kenaikan suhu di atas 333 K kesannya tidak ketara terhadap kenaikan prestasi atau pembentukan cecair air, bahkan pada keadaaan tersebut jumlahnya cenderung sama.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB VII

KAWALAN KANDUNGAN AIR PADA SISTEM PEMFC MENGGUNAKAN PELEMBAPAN MEMBRAN

7.1 PENGENALAN

Salah satu isu yang berhubungan dengan prestasi PEMFC ialah mendapatkan dan mengekalkan kelembapan pada membran PEMFC. Pada reka bentuk proses sistem PEMFC terdapat dua jenis sumber air iaitu air yang bersumber daripada tindak balas pada sisi katod dan air yang dibawa oleh gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC.

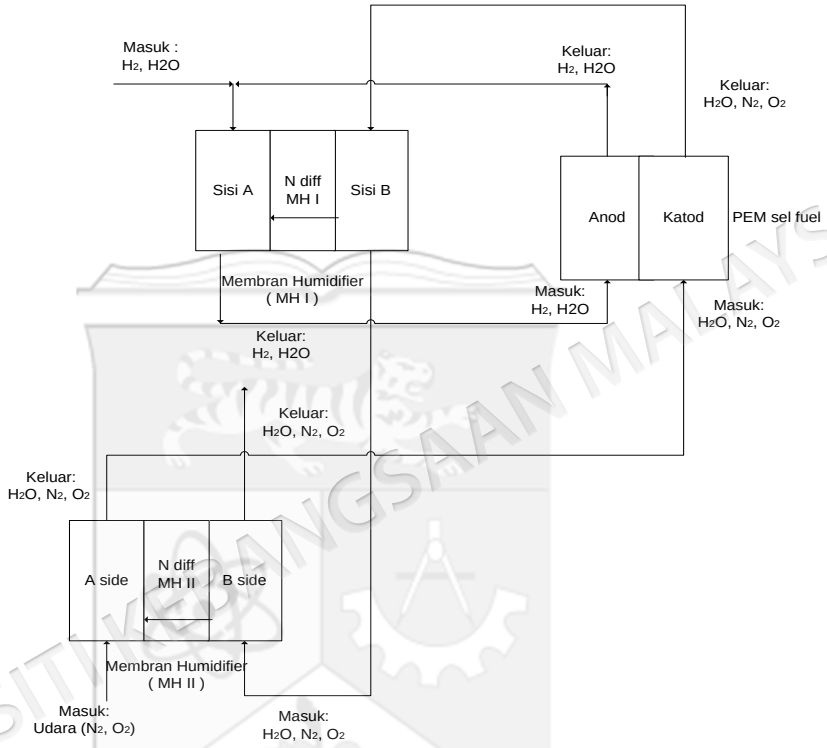
Penggunaan pelembapan pada sistem PEMFC bertujuan untuk memastikan bahan tindak balas berada dalam keadaan terhidrat sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC. Oleh itu, tindak balas pada PEMFC bergantung kepada kandungan air membran yang diperoleh daripada gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC.

Jenis pelembap yang banyak digunakan ialah pelembap luaran. Pelembap luaran merupakan salah satu alternatif untuk mengganti jenis pelembap dalaman PEMFC. Pelembap luaran boleh bekerja dengan mengatur keadaan operasi yang diinginkan dan tingkat kelembapan bahan tindak balas yang mengalir masuk dan keluar dari sisi anod dan sisi katod PEMFC (Yan et al. 2006; Zhou et al. 2006). Tujuan penyelidikan ini ialah mengatasi masalah kelembapan di dalam sistem PEMFC dengan menggunakan pelembap luaran. Masalah kelembapan di dalam sistem PEMFC boleh dicapai dengan mengubah kondisi operasi aliran bahan tindak balas yang mengalir masuk dan keluar dari sisi anod dan sisi katod. PEMFC.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.2 PROSES REKA BENTUK PELEMBAPAN MEMBRAN

Penyelidikan pada sistem pelembapan membran menggunakan pemodelan matematik dan fokus terhadap aliran wap air yang digunakan untuk melembapkan gas-gas kering. Rajah 7.1 menggambarkan pelaksanaan tipikal pelembapan membran pada sistem PEMFC.



Rajah 7.1 Unit pelembapan membran pada reka bentuk proses sistem PEMFC

Reka bentuk proses sistem PEMFC memiliki dua unit pelembap membran iaitu MH I dan MH II. Masing-masing pelembapan membran memiliki dua sisi iaitu sisi A dan sisi B seperti terlihat pada Rajah 7.2. Sisi A merupakan tempat laluan gas kering yang sejuk, sedangkan sisi B merupakan tempat laluan wap air (gas lembap) yang panas. Pada Rajah 7.1, pelembap MH I berfungsi untuk melembapkan gas hidrogen sebelum mengalir masuk ke dalam sisi anod PEMFC. Sisi A pada MH I merupakan tempat laluan gas hidrogen. Hidrogen diperoleh daripada hidrogen suapan dan hidrogen baki yang mengandung sedikit wap air yang mengalir keluar dari sisi anod sistem PEMFC. Pada sisi A MH I mengalir masuk gas hidrogen dengan sedikit wap air yang memiliki suhu yang sejuk. Pelembapan gas hidrogen pada MH I

menggunakan wap air yang mengalir keluar dari sisi katod PEMFC bersama sama dengan oksigen dan nitrogen. Selain daripada itu, wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH I diperoleh daripada keluaran B MH II. Gas yang mengalir keluar sisi katod merupakan gas lembap dan memiliki suhu yang lebih besar dan mengalir masuk ke dalam sisi B MH1. Perbezaan kepekatan dan suhu wap air pada sisi A berbanding sisi B maka berlaku resapan wap air dan perpindahan haba dari sisi B ke sisi A. Akibatnya, gas yang mengalir keluar dari sisi A MH1 berupa gas lembap yang memiliki suhu panas untuk dialirkan masuk sebagai gas bahan tindak balas ke dalam sisi anod PEMFC.

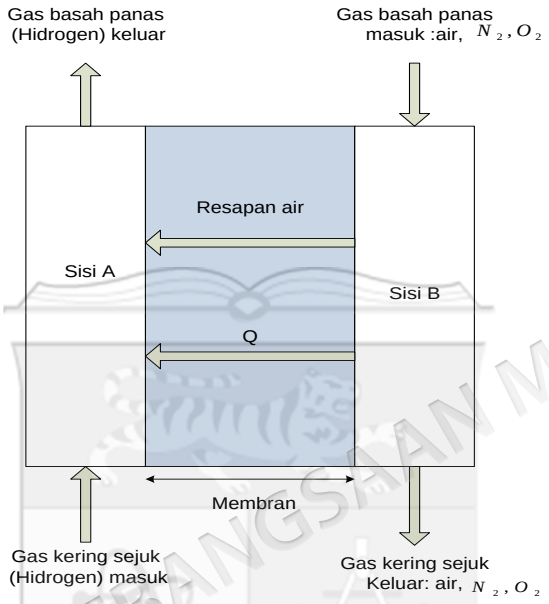
Pelembap membran II (MH II) berfungsi untuk melembapkan udara sebagai gas bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod PEMFC. Udara sejuk mengalir masuk ke dalam sisi A MH II dan wap air (gas lembap) yang panas mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II diperoleh daripada keluaran sisi B MH I. Di dalam MH1 berlaku resapan wap air dan perpindahan haba ke sisi A. Akibatnya gas yang mengalir keluar dari sisi A MH II ialah gas lembap yang panas dan digunakan sebagai bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sisi katod PEMFC.

Pelembapan membaran di MH I dan MH II merupakan unit yang fungsi utamanya mengawal kelembapan relatif dan suhu bahan tindak balas. Pengoperasian sistem PEMFC ini dilakukan dengan menetapkan bahawa kelembapan relatif dan suhu operasi yang mengalir keluar dari sisi A MH I dan MH II adalah sama dengan yang mengalir masuk stek PEMFC. Kawalan kelembapan relatif dan suhu di pelembap membran untuk mendapatkan keadaan operasi di PEMFC adalah dengan memanfaatkan suhu dan baki jumlah wap air yang mengalir keluar daripada stek PEMFC.

Reka bentuk proses pada sistem PEMFC ini berlaku secara serentak. Penyelidikan ini mengkaji tentang kepekatan air yang mengalir masuk, keluar dan meresap di dalam pelembap masing masing dengan melakukan perubahan terhadap suhu operasi dan kelembapan relatif yang diinginkan. Tekanan berlangsung pada 1 atm, nisbah stoikiometri hidrogen dan oksigen adalah 1.2 / 2 dan ketumpatan arus

UNIVERSITI MALAYSIA

tetap 0.5 A cm^{-2}. Selain daripada itu juga membuat reka bentuk terhadap pelembap membran dengan menghitung jumlah sel yang diperlukan untuk memperoleh kelembapan relatif yang sesuai dengan yang diperlukan pada PEMFC. Hasil akhirnya boleh mengira perbandingan luas kawasan pelembanpan membran berbanding luas kawasan sistem PEMFC.



Rajah 7.2 Sel pelembapan membran

7.3 PELEMBAPAN LUARAN

Pelembap membran pada sistem PEMFC banyak dikesan oleh beberapa parameter penting seperti pekali resapan air, pekali *electro osmotic drag* (EOD), resapan air sesuhu, keberaliran dan tebal membran (Janssen & Overvelde 2001; Ceraolo et al. 2003). Kandungan air membran pada sistem PEMFC ditentukan oleh keseimbangan antara pengeluaran air dan pengangkutan air pada proses.

Kes pengangkutan air pada sistem seperti berikut: 1. Perpindahan air pada fenomena EOD. Fenomena ini berhubungan dengan perpindahan proton bersama wap air dari sisi anod melewati membran ke sisi katod. 2. Penyerapan balik wap air dari sisi katod ke sisi anod. 3. Resapan wap air berlaku dari atau ke oksida (oksigen) atau bahan api (hidrogen) aliran gas pada sistem PEMFC (Chang et al. 2002; Kraytsberg & Ein-Eli 2006).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Pelembap luaran terdiri daripada beberapa jenis iaitu: muncung semburan (*spray nozzle*), menggelegak gas (*gas bubbling*), pelembap roda entalpi (*enthalpy wheel humidifier*) dan pelembap membran (*membrane humidifier*). Teknik pelembapan yang digunakan terdiri dari dua metoda. Pertama, injeksi langsung cecair air dan berhubungan dengan sistem medan aliran terintegrasi. Tujuan metode ini adalah untuk meningkatkan pengangkutan bahan tindak balas dan produk di dalam lapisan pemangkin. Selain daripada itu, melakukan kontak langsung air dengan antar muka membran sehingga boleh meningkatkan keberaliran membran (Wood et al. 1998). Kedua, melewatkan gas-gas bahan tindak balas melalui unit pelembapan sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC.

Pelembap membran terdiri daripada saluran gas kering dan saluran gas lembap dan dipisahkan oleh membran telap air. Samping daripada itu, wap air mengalir di alirannya dan berpindah menembusi membran dari saluran air atau gas lembap ke saluran gas kering. Perpindahan ini berlaku kerana terdapat kecerunan kelembapan relatif yang merentasi membran. Akibat sistem ini, gas kering yang mengalir masuk ke dalam pelembap jika mengalir keluar merupakan gas lembap. Pelembap roda entalpi dan membran lebih sesuai untuk aplikasi mudah alih. Pelembap jenis ini menggunakan semula sejumlah besar haba dan kelembapan yang dijalankan sistem oleh aliran berlebihan dalam sistem PEMFC. Perbezaan antara pelembap roda entalpi dan pelembap membran iaitu keperluan motor elektrik pada pelembap roda entalpi (Park et al. 2008; Kang et al. 2010).

7.4 PEMODELAN MATEMATIK

Pemodelan matematik pada reka bentuk proses dalam kajian ini mencakup keseluruhan unit yang terdapat pada sistem PEMFC. Pemodelan matematik yang berhubungan dengan unit PEMFC telah dijelaskan pada Bab IV, V dan V1. Pemodelan matematik pada sistem pelembapan membran ini mencakup imbangan jisim air dan haba. Rajah 7.1 dan 7.2 menunjukkan proses imbangan jisim yang berlaku pada sistem pelembapan membran. Imbangan jisim yang berlaku pada pelembapan membran seperti berikut:

a. Imbangan jisim di MH I

Mol masuk A MH I + Mol masuk B MH I = (Mol keluar A MH I + Mol resap MH I) + (Mol Keluar B MH I - Mol resap MH I)

- Komponen yang masuk A MH I ialah: hidrogen dan wap air
- Komponen yang masuk B MH I ialah: udara dan wap air
- Komponen yang keluar A MH I ialah: hidrogen dan wap air
- Komponen yang keluar B MH I ialah oksigen, nitrogen dan wap air

Maka persamaan imbangan jisim pada MH I adalah sebagai berikut:

$$masuk\ A\ MH\ I\left(\mathcal{N}_{H_2} + \mathcal{N}_{H_2O(g)}\right) + masuk\ B\ \ MH\ I\ (\mathcal{N}_{O_2} + \mathcal{N}_{\mathrm{N}_2} + \mathcal{N}_{\mathrm{H_2O}}) =$$
$$\left(keluar\ A\ MH\ I\left(\mathcal{N}_{H_2} + \mathcal{N}_{H_2O(g)}\right) - \text{resap MH I}(\mathcal{N}_{\text{resap } \mathrm{H_2O}})\right) +$$
$$\left(keluar\ B\ MH\ I\left((\mathcal{N}_{\mathrm{H_2O}} + \mathcal{N}_{\mathrm{N}_2} + \mathcal{N}_{\mathrm{O}_2}\right) - \text{resap MH I}\ (\mathcal{N}_{\text{resap } \mathrm{H_2O}})\right) \quad (7\text{-}1)$$

b. Imbangan jisim di MH II

Mol masuk A MH II + Mol masuk B MH II = (Mol keluar A MH II + Mol resap MH II) + (Mol Keluar B MH II - Mol resap MH II)

- Komponen yang masuk A MH II ialah: udara (oksigen dan nitrogen) kering
- Komponen yang masuk B MH II ialah: wap air, oksigen dan nitrogen
- Komponen yang keluar A MH II ialah: udara dan wap air
- Komponen yang keluar B MH II ialah: wap air, oksigen, nitrogen

Maka persamaan imbangan jisim pada MH II adalah sebagai berikut:

$$masuk\ A\ MH\ II\left(\mathcal{N}_{udara}\ \right) + masuk\ B\ \ MH\ II\ (\mathcal{N}_{O_2} + \mathcal{N}_{\mathrm{N}_2} + \mathcal{N}_{\mathrm{H_2O}})$$
$$= \left(keluar\ A\ MH\ II(\mathcal{N}_{udara}) + \text{resap MH II}\ (\mathcal{N}_{\text{resap } \mathrm{H_2O}})\right)$$
$$+ \left(keluar\ B\ MH\ II\left((\mathcal{N}_{\mathrm{H_2O}} + \mathcal{N}_{\mathrm{N}_2} + \mathcal{N}_{\mathrm{O}_2}\right) - \text{resap MH II}\left(\mathcal{N}_{\mathrm{H_2O}}\right)\right)$$
(7-2)

7.4.1 Imbangan Jisim di MH I

Berdasarkan pemodelan matematik Bab IV dan Bab VI boleh dihitung komponen yang mengalir masuk ke dalam sistem pelembapan membran. Kepekatan hidrogen yang mengalir masuk ke dalam A MH I sama dengan kepekatan hidrogen yang mengalir keluar dari sisi A MH I, jumlahnya sebagai berikut:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$\mathcal{N}_{\mathrm{H_2 masuk}}\ \text{A MH I} = \mathcal{N}_{\mathrm{H_2\ keluar}}\ \text{A MH I} \tag{7-3}$$

Kepekatan hidrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH I ialah jumlah hidrogen suapan ditambah hidrogen baki tindak balas yang mengalir keluar dari sisi anod. Kepekatan hidrogen suapan sebelum mengalir masuk ke dalam sisi anod ($\mathcal{N}_{H_2\ suap}$) nilainya sama dengan kepekatan hidrogen bertindak balas dalam PEMFC, yang nilainya adalah:

$$\mathcal{N}_{H_2\ suap} = \chi H_2 . \frac{I}{2F} . n_{cell} \tag{7-4}$$

Kepekatan hidrogen yang mengalir keluar dari sisi anod ($\mathcal{N}_{H_2\ keluar\ \ anod}$) merupakan selisih hidrogen yang diperlukan pada sisi anod (($\mathcal{N}_{H_2\ masuk\ \ anod}$) di kurang kepekatan hidrogen yang bertindak balas ($\mathcal{N}_{H_2\ bertindak\ \ balas}$). Nilainya adalah adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2\ keluar\ \ anod} = \left(\frac{I}{2F} . n_{cell}\right)\left(\mathcal{S}_{H_2} - \chi H_2\right) \tag{7-5}$$

Maka jumlah hidrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH I adalah

$$\mathcal{N}_{H_2\ masuk\ \ A\ MH\ I} = \mathcal{N}_{H_2\ suap} + \mathcal{N}_{H_2\ keluar\ \ anod} \tag{7-6}$$

Berdasarkan pemodelan matematik Bab VI persamaan (6-9), maka jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH I merupakan wap air yang mengalir keluar dari sisi anod sistem PEMFC, yang nilainya adalah:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ masuk\ \ sisi\ A\ MH\ I} = \left(\mathcal{S}_{H_2} . \mathcal{N}_{H_2} . \eta_{cell} . \frac{\varphi . P_{V_s}}{P_a - \varphi . P_{V_s}} - \frac{n_d(x) I(x)}{F}\right) + k_g(y_a - y_c) \tag{7-7}$$

Kepekatan oksigen, nitrogen dan wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I merupakan kepekatan oksigen, nitrogen dan wap air yang mengalir keluar dari sisi katod ditambah 50% aliran kitar semula daripada komponen keluar dari sisi B MH II. Kitar semula wap air yang keluar daripada B MH II sebanyak 50% bertujuan untuk

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

menjaga wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH I setelah bergabung dengan wap air daripada keluaran sisi katod adalah mempunyai jumlah tetap. Berdasarkan pemodelan matematik Bab IV persamaan (4-39), maka kepekatan oksigen yang mengalir keluar dari sisi katod adalah:

$$\mathcal{N}_{O_2\ keluar\ \ katod} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell} - \left(\frac{1}{2}\chi H_2 \mathcal{N}_{H_2}.n_{cell}\right) \quad (7\text{-}8)$$

Kepekatan nitrogen yang mengalir keluar dari sisi katod berdasarkan Bab IV persamaan (4-26) seperti berikut

$$\mathcal{N}_{N_2\ keluar\ \ katod} = \mathcal{S}_{O_2}.\mathcal{N}_{O_2}.n_{cell}.\frac{1-Xmol\ O_2}{XmolO_2} \quad (7\text{-}9)$$

Kepekatan wap air yang mengalir keluar dari sisi katod berdasarkan pemodelan matematik Bab VI persamaan (6-7) adalah:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ katod} = \left(\mathcal{S}_{O_2}.n_{cell}\ \frac{\mathcal{N}_{O_2}}{XO_2}\ \frac{\varphi.P_{V_s}}{P_c-\varphi.P_{V_s}} + \frac{\mathcal{N}_{H_2 supply}}{\mathcal{S}_{H_2}} + \frac{n_d(x)I(x)}{F}\right) - k_g(y_a - y_c) \quad (7\text{-}10)$$

Pada proses reka bentuk sistem PEMFC ini, komponen keluaran daripada sisi B MH II diandaikan 50% di kitar semula dan mengalir masuk ke dalam sisi B MH1. Maka kepekatan oksigen, nitrogen dan wap air mengalir masuk ke dalam B MH I adalah:

$$\mathcal{N}_{O_2\ masuk\ \ B\ MH\ I} = \mathcal{N}_{O_2\ keluar\ \ katod} + 50\%\mathcal{N}_{O_2\ keluar\ \ B\ MH\ II} \quad (7\text{-}11)$$

$$\mathcal{N}_{N_2\ masuk\ \ B\ MH\ I} = \mathcal{N}_{N_2\ keluar\ \ katod} + 50\%\mathcal{N}_{N_2\ keluar\ \ B\ MH\ II} \quad (7\text{-}12)$$

$$\mathcal{N}_{H_2O\ masuk\ \ B\ MH\ I} = \mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ katod} + 50\%\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ B\ MH\ II} \quad (7\text{-}13)$$

Di dalam sel pelembap membran I (MH I) berlaku resapan wap air dari sisi B melewati membran menuju ke sisi A. Kepekatan per luas kawasan resapan air

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$N_{resapH\ 20}$ (Zong et al. 2006; del Real et al. 2007; Chen et al. 2008; Gao et al. 2010) adalah sebagai berikut:

$$\mathcal{N}_{resap\ \ H20\ MH\ I} = D_w \frac{(C_{B,v1} - C_{A,v1})}{x_m} \tag{7-14}$$

Atau

$$\mathcal{N}_{resap\ \ H20\ MH\ I} = \frac{\rho_{kering}}{M_e} \frac{D_w}{x_m} (\lambda_B - \lambda_A) \tag{7-15}$$

Dimana (λ) ialah kandungan air di dalam lapisan membran pada sisi A dan sisi B. Nilai kandungan air membran bergantung kepada nilai keaktifan wap air yang nilainya adalah sebagai berikut (Chu et al. 2007; E.Afshari & JazayeriI 2008; Gao et al. 2010):

$$\lambda_m = 0.043 + 17.81a_m - 39.85a_m^2 + 36.0a_m^3 \tag{7-16}$$

Dimana a_m ialah keaktifan air dan nilainya dihitung berdasarkan tekanan separa air p_{H2O} (P_a) dan tekanan tepuan air (Pa). Nilai keaktifan air adalah sebagai berikut :

$$a_m = \frac{\varphi_a + \varphi_b}{2} \tag{7-17}$$

Nilai pekali resapan air pada membran di dalam pelembapan membran adalah sebagai berikut:

$$D_w = D_\lambda \exp[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{s(x)}}\right) \tag{7-18))}$$

Dimana D_λ adalah pembetulan pekali resapan di dalam pelembap membran yang nilainya adalah (Del Real et al. 2007) :

$$D_\lambda \begin{cases} 10^{-6} & \lambda_m < 2 \\ 10^{-6}\left(1 + 2(\lambda_m - 2)\right) & 2 \le \lambda_m \le 3 \\ 10^{-6}\left(3 - 1.67(\lambda_m - 3)\right) & 3 < \lambda_m < 4.5 \\ 1.25\ 10^{-6} & \lambda_m \ge 4.5 \end{cases} \tag{7-19}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.4.2 Imbangan Jisim di MH II

Imbangan jisim pada pelembapan membran II (MH II) mencakup aliran gas kering yang mengalir masuk dan keluar dari sisi A MH II, aliran gas lembap yang mengalir masuk dan keluar dari sisi B MH II, dan resapan wap air dari sisi B melewati membran ke sisi A MH II. Gas kering yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH II merupakan jumlah udara yang diperlukan pada sisi katod sistem PEMFC.

Berdasarkan pemodelan matematik Bab IV persamaan (4-20), maka kepekatan udara yang mengalir masuk sisi A MH II ialah:

$$\mathcal{N}_{udara\ \ masuk\ \ A\ MH\ II} = \mathcal{S}_{O_2} . \frac{I}{4F} . n_{cell} . \frac{1}{XO_2} \tag{7-20}$$

Kepekatan oksigen dan nitrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi B adalah sama dengan nilai kepekatan oksigen dan nitrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I. Sedangkan kepekatan wap air yang mengalir masuk ke dalam B MH II ialah kepekatan wap air yang mengalir keluar daripada sisi B MH I. Jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II ialah jumlah wap air yang masuk ke dalam sisi B MH I dikurangi jumlah wap air meresap di MH I, nilainya seperti berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ masuk\ \ B\ MH\ II} = \mathcal{N}_{H_2O\ masuk\ \ B\ MH\ I} - \mathcal{N}_{resap\ \ H20\ MH\ I} \tag{7-21}$$

Secara amnya jumlah resapan wap air yang berlaku pada MH II sama dengan jumlah resapan wap air pada MH I, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (7.15).

$$\mathcal{N}_{resap\ \ H20\ MH\ II} = D_w \frac{(C_{B,v2} - C_{A,v2})}{x_m} \tag{7-22}$$

Dimana $\mathcal{N}_{resap\ \ H20\ MH\ II}$ ialah kepekatan wap air yang meresap dari sisi B melewati membran ke sisi A MH II (mol).

Kepekatan udara yang mengalir keluar daripada sisi A MH II sama jumlahnya dengan kepekatan udara yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH II. Sedangkan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

jumlah wap air yang mengalir keluar dari sisi A MH II sama jumlahnya dengan wap air yang meresap di MH II atau sebanding dengan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi anod sistem PEMFC. Berdasarkan Bab IV persamaan (4-63) nilainya seperti berikut:

$$\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ A\ MH\ II} = \mathcal{S}_{O_2}.n_{cell}\ \frac{\mathcal{N}_{O_2}}{XO_2}\ \frac{\varphi.P_{V_s}}{P_c-\varphi.P_{V_s}} \tag{7-23}$$

Kepekatan oksigen dan nitrogen yang mengalir keluar dari sisi B MH II sama jumlahnya dengan yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Sedangkan kepekatan wap air yang mengalir keluar dari sisi B sama jumlahnya dengan jumlah yang mengalir masuk ke dalam sisi B ditambah wap air yang meresap di MH II. Nilainya adalah seperti berikut:

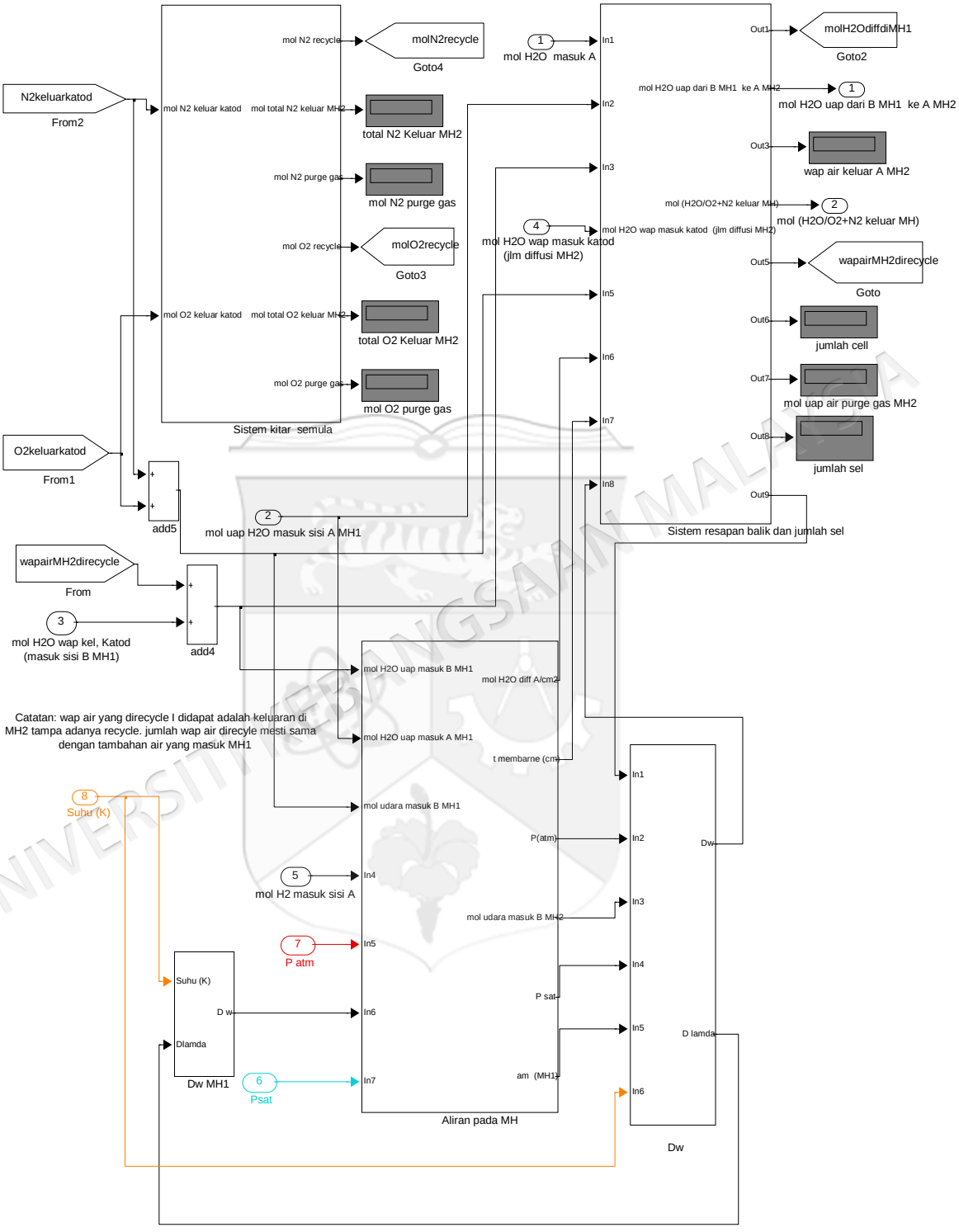
$$\mathcal{N}_{H_2O\ keluar\ \ B\ MH\ II} = \mathcal{N}_{H_2O\ masuk\ \ B\ MH\ II} - \mathcal{N}_{resap\ \ H20\ MH\ II} \tag{7-24}$$

7.5 SIMULASI PADA PELEMBAPAN MEMBRAN

Pembangunan simulasi pada pelembap membran juga menggunakan imbangan jisim sebagai asas penentuan komponen lainnya. Perhitungan yang dilakukan pada tahapan ini meliputi penentuan imbangan jisim, komponen pada kitar semula, pekali resapan membran, nilai aktiviti air dan pembetulan pekali pesapan pada pelembapan membran. Pembangunan simulasi menggunakan pemodelan matematik pada pelembap membran ditunjukan oleh Rajah 7.3 hingga 7.9 .

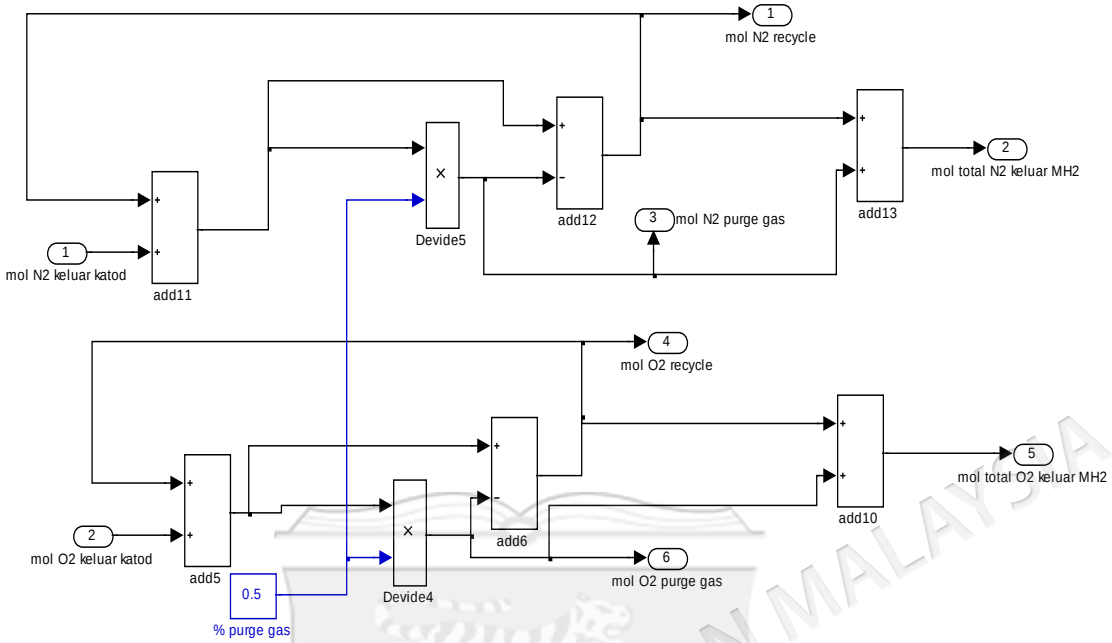
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

A. Pelembap membran



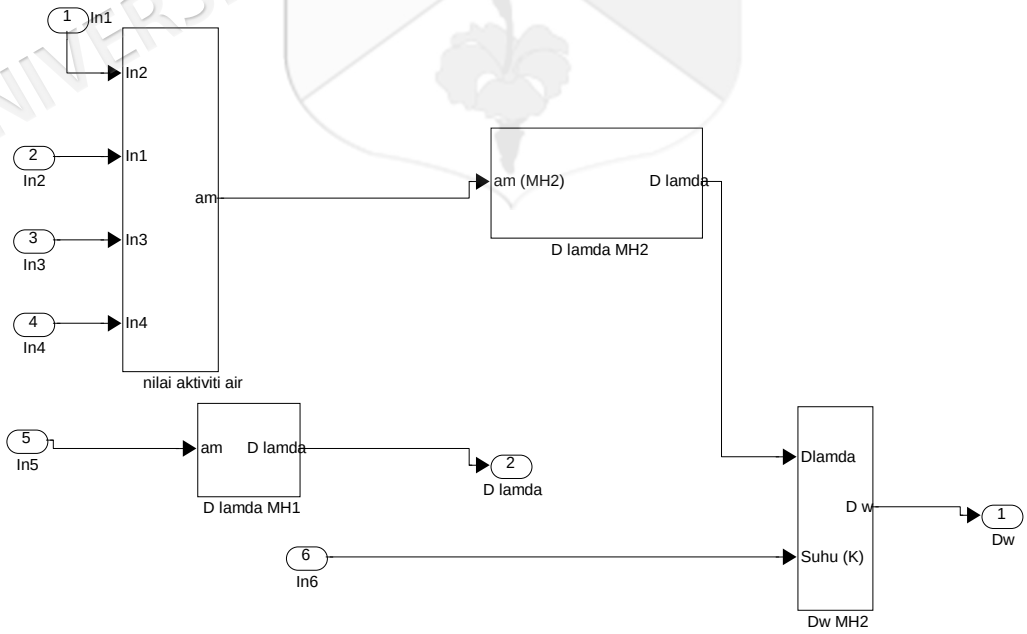
Rajah 7.3 Imbangan jisim pada pelembapan membran

B. Kitar semula pelembap membran



Rajah 7.4 Sistem kitar semula pada pelembapan membran

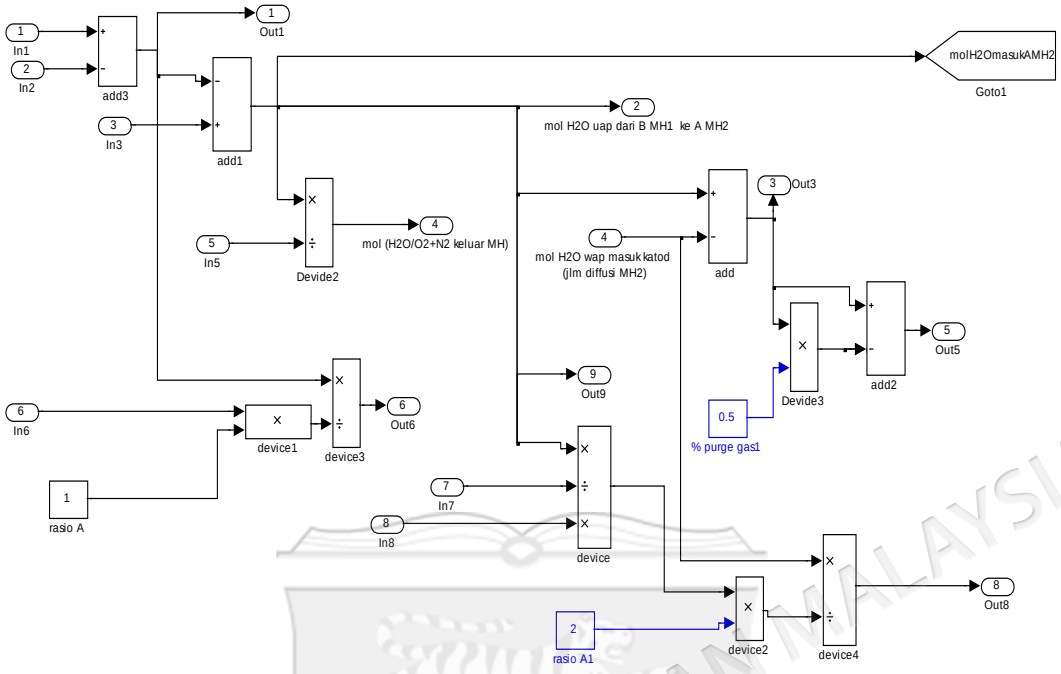
C. Pekali resapan membran



Rajah 7.5 Blok aliran pekali resapan membran

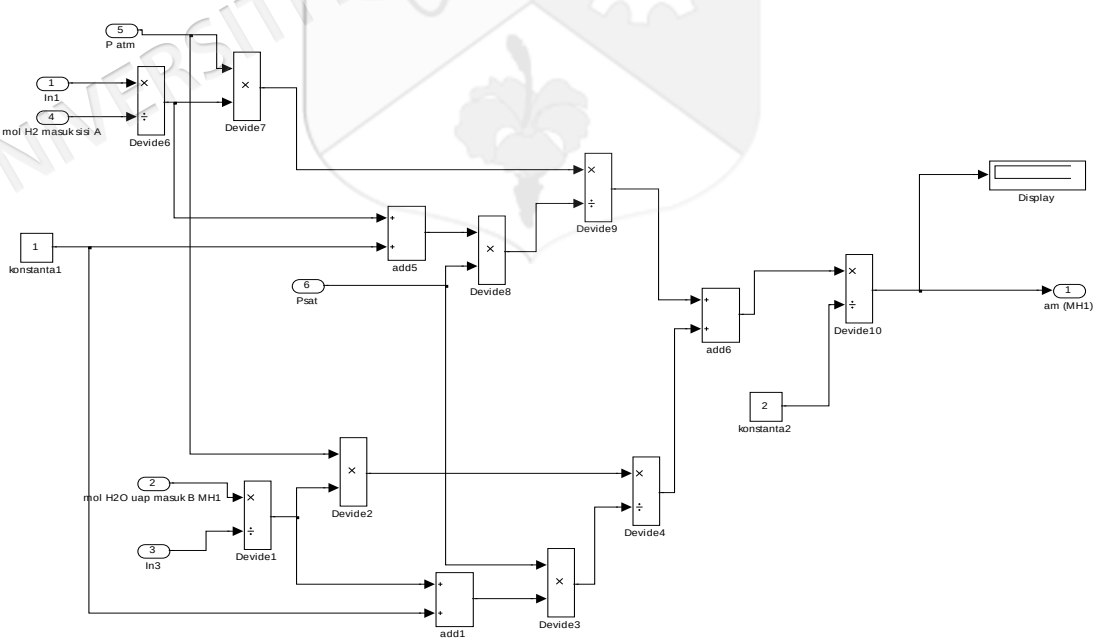
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

D. Jumlah sel



Rajah 7.6 Sistem penentuan resapan balik dan jumlah sel pada pelembapan membran

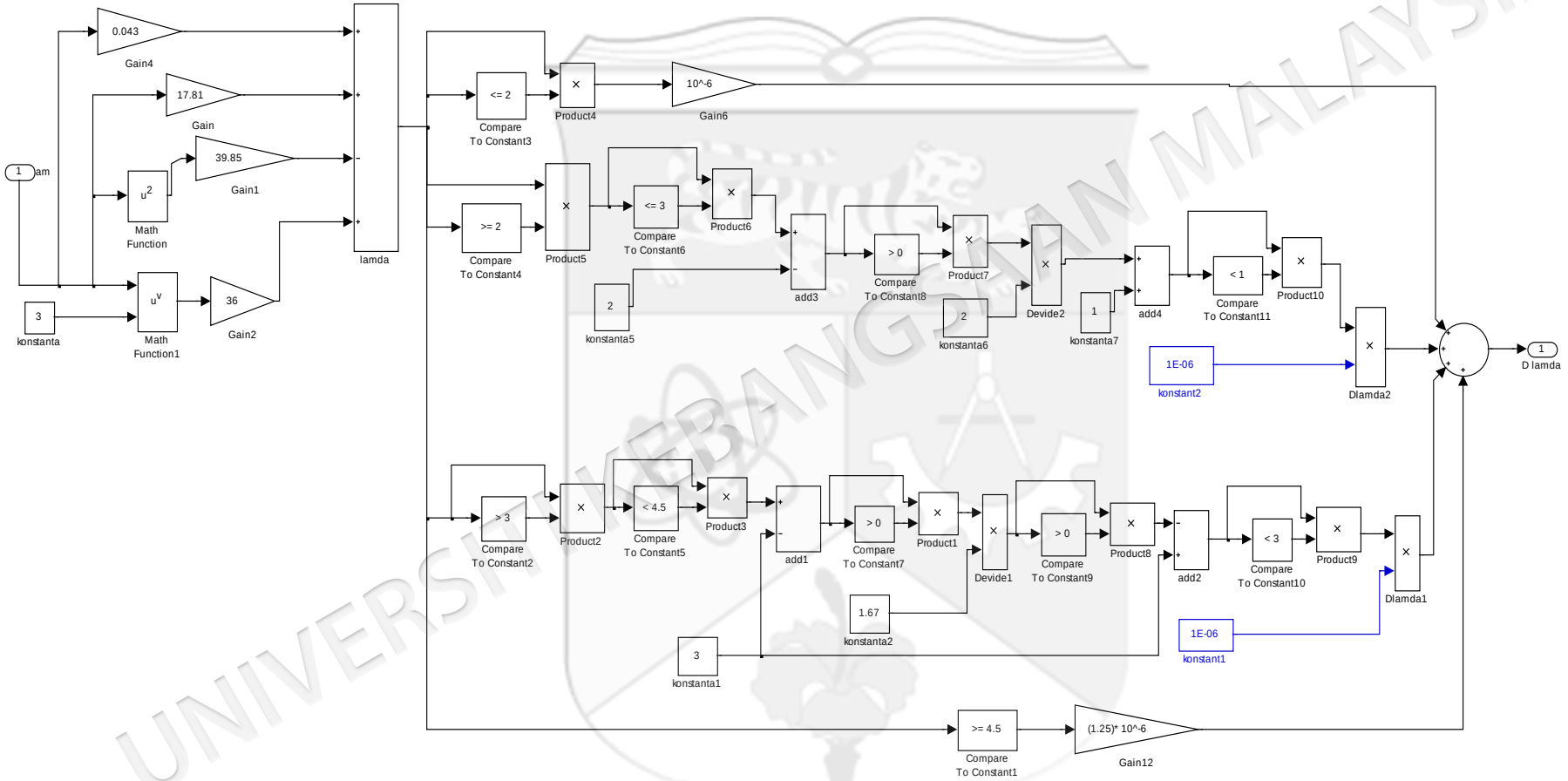
E. Aktiviti air pada pelembap membran



Rajah 7.7 Penentuan nilai aktiviti air pada pelembapan membran.

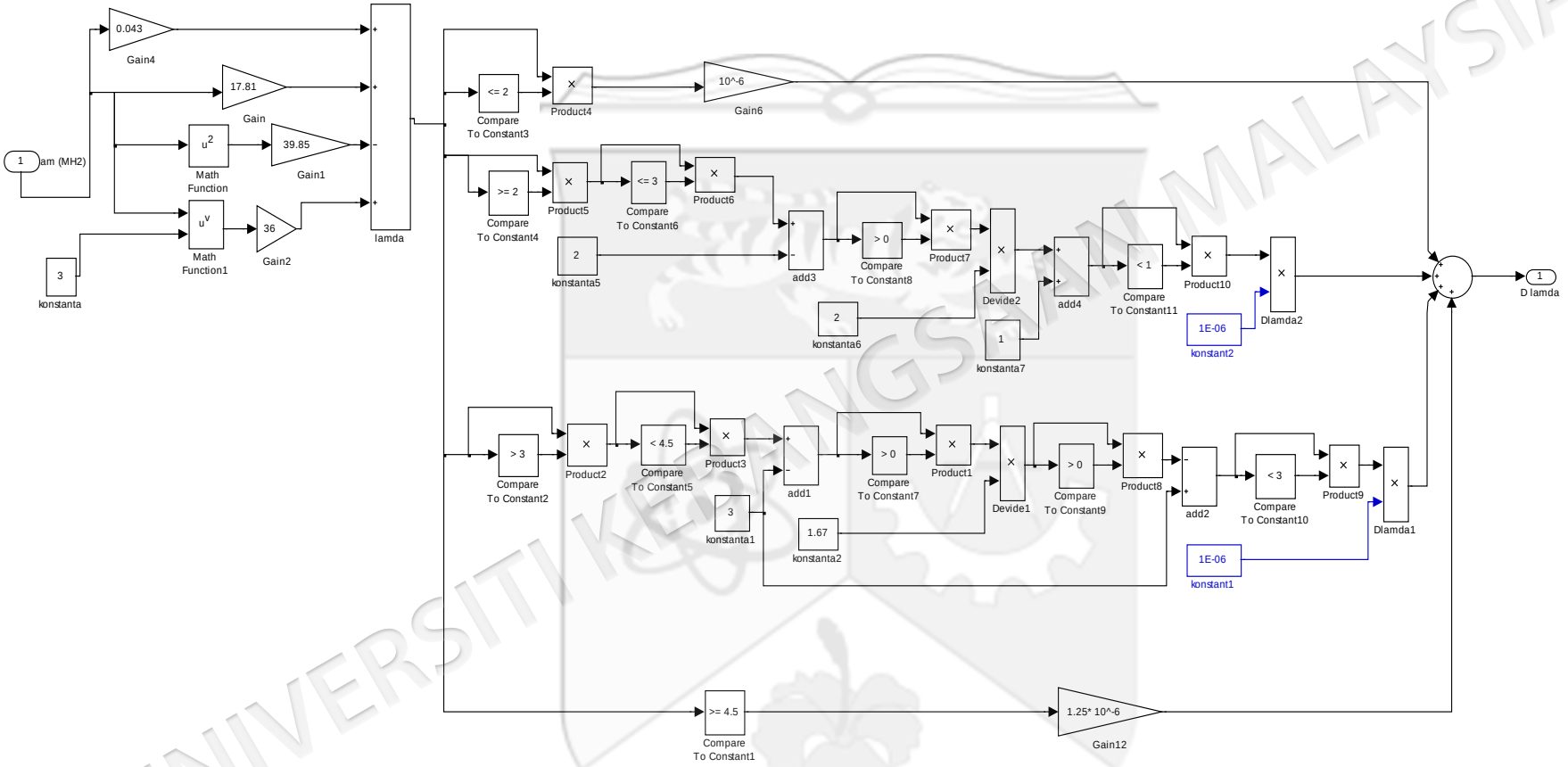
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

F. Pembetulan Pekali Resapan



Rajah 7.8 Pembetulan Pekali Resapan pada Pelembapan Membran I

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Rajah 7.9 Pembetulan Pekali Resapan pada Pelembapan Membran II

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.6 KEPUTUSAN DAN PEMBAHASAN

Salah satu yang mempengaruhi prestasi PEMFC adalah pengawalan keseimbangan air pada sistem operasi. Kawalan air pada proses reka bentuk sistem PEMFC boleh dilakukan dengan menggunakan pelembapan luaran. Kajian tentang pelembapan membran mencakup jumlah wap air yang mengalir masuk dan keluar pada masing-masing pelembapan, jumlah air yang meresap pada pelembap, dan nisbah luas kawasan pelembap membran berbanding PEMFC.

Pelembap membran pada sistem PEMFC dipengaruhi oleh beberapa kondisi operasi untuk mencapai prestasi maksimum PEMFC. Kondisi operasi tersebut seperti: tekanan pada sisi A dan B pelembap membran serta tekanan pada sisi anod dan katod PEMFC adalah 1 atm. Penggunaan tekanan 1 atm adalah untuk memperoleh penggunaan sistem PEMFC mempunyai peralatan pemampatan yang minimum. Nisbah stoikiometri aliran gas bahan tindak balas yang mengalir masuk PEMFC adalah 1.2 untuk gas hidrogen dan 2 untuk udara. Ketumpatan arus pada PEMFC adalah 1.185 A cm^{-2}. Suhu operasi yang aliran gas yang masuk PEMFC dibezakan daripada 303 K hingga 363 K dan kelembapan relatif di sisi anod dan katod dibezakan dalam julat 50% hingga 90%.

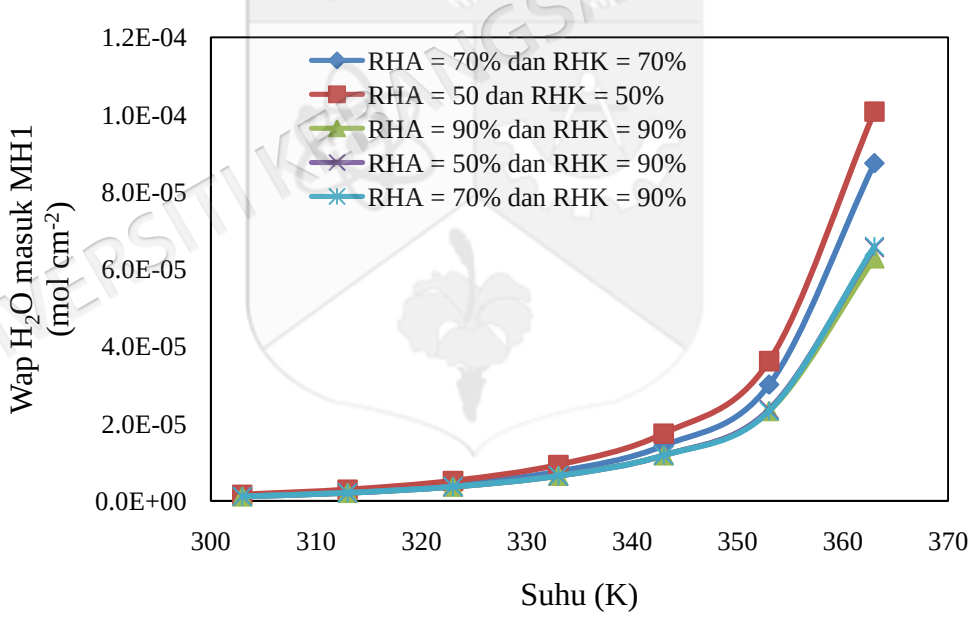
7.6.1 Jumlah Wap Air Yang Mengalir Masuk ke Dalam B MH I

Wap air yang mengalir masuk ke dalam pelembapan membran melalui sisi B MH I. Wap air ini berguna untuk melembapkan hidrogen pada sisi A MH I dan udara pada sisi A MH II. Wap air yang mengalir masuk ke dalam B MH I diperoleh daripada keluaran katod PEMFC dan keluaran B MH II. Pelembapan gas kering bertujuan untuk mempersiapkan kelembapan gas kering yang sesuai sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC. Jumlah wap air yang mengalir masuk bergantung kepada keperluan suhu operasi dan kelembapan relatif di PEMFC.

Rajah 7.10(a) berikut menunjukkan jumlah air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I pada perbezaan suhu operasi. Secara amnya naiknya suhu operasi menyebabkan semakin meningkatnya jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam

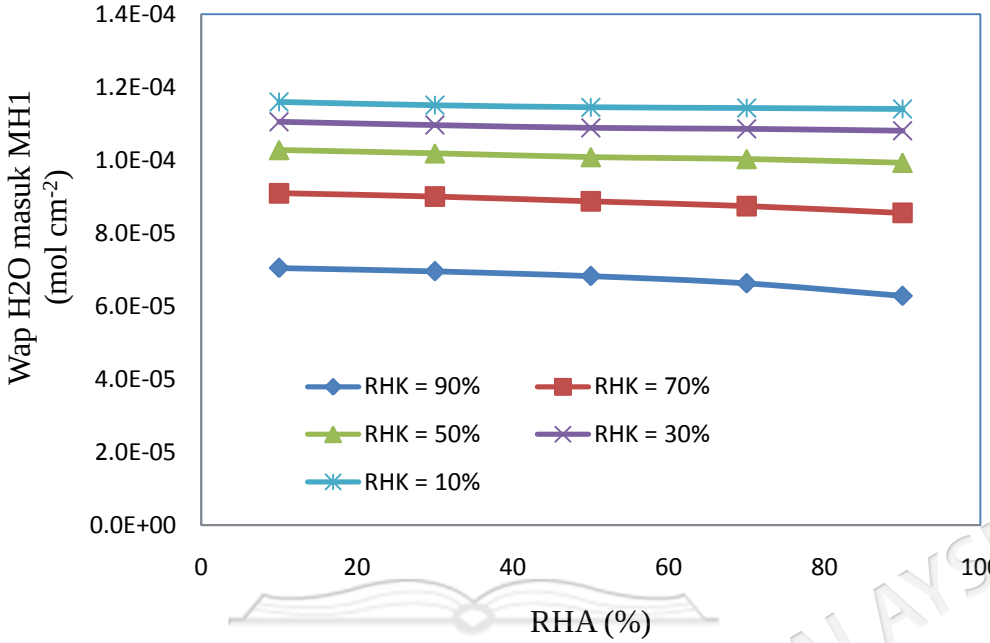
sisi B MH I. Meningkatnya suhu operasi daripada 303 K kepada 333 K menunjukkan kenaikan jumlah wap yang tidak ketara, tetapi meningkatnya suhu daripada 333 K kepada 363 K menunjukkan berlakunya peningkatan jumlah wap air yang mengalir masuk B MH I secara ketara. Peningkatan suhu PEMFC menyebabkan sisi katod mengeluarkan wap air yang lebih banyak kerana akibat berlakunya tindak balas dan meningkatnya kelembapan udara yang mengalir masuk sisi katod. Akibatnya, wap air keluaran sisi katod dan selanjutnya disuapkan ke sisi B MH I menjadi meningkat.

Selain daripada itu, jumlah wap air yang mengalir masuk sisi B MH I juga meningkat dengan naiknya suhu operasi dan turunnya nilai kelembapan relatif pada sisi anod. Rajah 7.10(a) menunjukkan peningkatan jumlah wap air yang tinggi dengan naiknya suhu pada RHA 50% dan RHK 50%. Pada kondisi RHA yang berbeza (50%, 70% dan 90%) dan RHK tetap 90%, tidak menunjukkan perbezaan jumlah wap air yang mengalir masuk B MH I pada suhu yang sama.



(a).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(b)

Rajah 7.10 Jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam MH I per cm^{-2} luas kawasan pelembap membran pada kondisi operasi (a) perbezaan suhu (b) perbezaan kelembapan relatif.

Rajah 7.10(b) menunjukkan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MHI dengan perbezaan nilai kelembapan relatif. Secara amnya, kenaikan nilai kelembapan relatif pada sisi anod menyebabkan berlakunya penurunan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I. Tetapi dengan naiknya nilai RHK menyebabkan berlakunya penurunan jumlah wap air yang mengalir masuk B MH I. Aliran wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I diperoleh daripada wap air yang mengalir keluar dari katod dan aliran kitaran semula daripada keluaran B MH II.

Berdasarkan pembahasan tentang pembentukan cecair air di Bab VI menunjukkan bahawa naiknya nilai RHA dan RHK menyebabkan berlakunya penurunan jumlah wap air yang mengalir keluar daripada katod. Sebaliknya, aliran wap air yang mengalir keluar dari katod PEMFC mengalami kenaikan dengan turunnya nilai RHK. Akibatnya, aliran wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I mengalami penurunan.

Berdasarkan Rajah 7.10 menunjukkan bahawa pada nilai RHK tetap dan RHA berbeza maka aliran wap air yang mengalir masuk ke dalam B MH I nilainya tetap

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

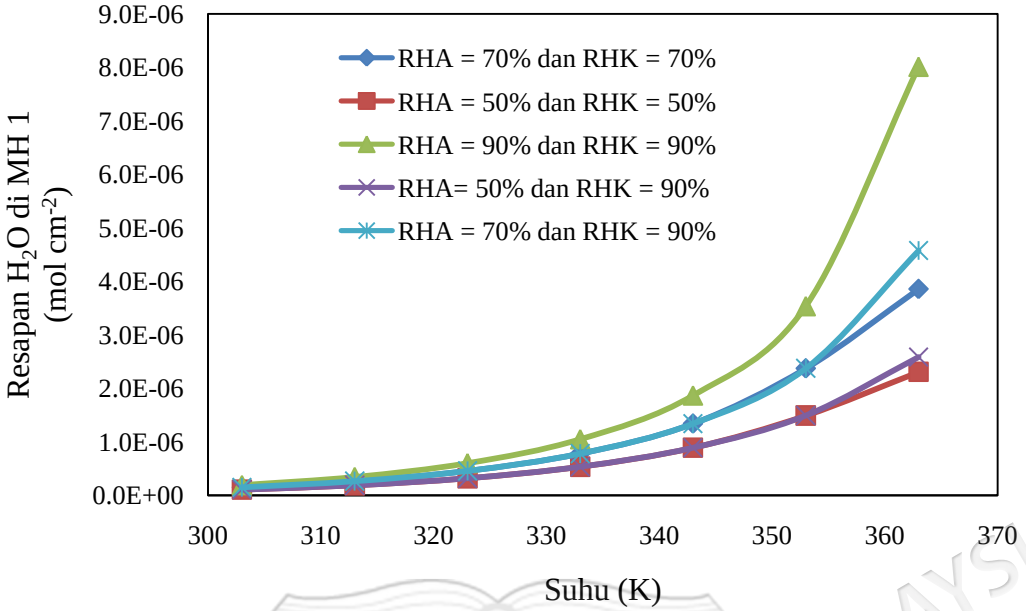
pada masing-masing suhu operasi. Jumlah air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I meningkat dengan turunnya nilai RHK walaupun nilai RHA tetap. Jadi peningkatan nilai RHA tidak memberi kesan terhadap peningkatan jumlah aliran wap air yang mengalir masuk sisi B berbanding peningkatan nilai RHK. Suhu di atas 303 K dan nilai RHK turun daripada 90% kepada 50%, memberi kesan terhadap peningkatan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH I

7.6.2 Resapan Wap Air di MH I

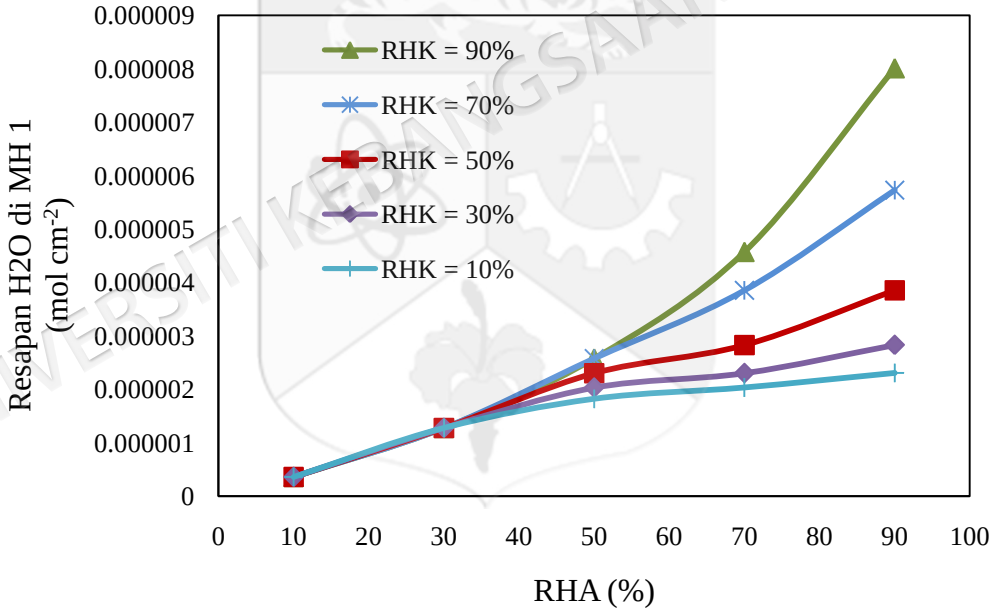
Wap air yang mengalir masuk B MH 1 digunakan untuk melembapkan gas hidrogen yang akan dialirkan masuk menuju sisi anod PEMFC. Suhu aliran gas hidrogen yang keluar daripada sisi A MH I serupa dengan suhu gas tersebut mengalir masuk ke dalam sisi anod PEMFC. Rajah 7.11(a) menunjukkan bahawa peningkatan suhu operasi akan menyebabkan peningkatan jumlah wap air yang meresap dari sisi B ke sisi A MH I. Naiknya suhu menyebabkan semakin banyaknya jumlah wap air yang terkandung di dalam oksigen pada kelembapan relatif yang sama, seperti terlihat Bab 4.6.1. Akibatnya sisi anod memerlukan jumlah wap air yang tinggi jika suhu operasi meningkat.

Peningkatan nilai RHA menyebabkan berlakunya kenaikan jumlah resapan wap air dari sisi B ke sisi A MH I. Di bawah suhu 353 K, tidak terdapat perbezaan jumlah resapan wap air di MH I pada nilai RHA tetap dan RHK berbeza, tetapi terlihat berbeza jika suhu operasi di atas 353 K. Berdasarkan perbincangan Bab 4.6 menyatakan bahawa naiknya RHK menyebabkan berlakunya penurunan jumlah wap air yang mengalir keluar dari sisi anod sistem PEMFC pada suhu di atas 353 K. Sebagaimana diketahui, aliran yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH I terdiri daripada gas hidrogen dan wap air yang diperoleh daripada keluaran sisi anod. Kerana itu di atas suhu 353 K dan nilai RHA tetap, kenaikan nilai RHK menyebabkan wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi A menjadi turun. Kesan yang berlaku terhadap resapan wap dari sisi B ke sisi A ialah mengalami peningkatan jika RHK juga meningkat. Perbezaan nilai resapan wap air lebih terlihat pada suhu 363 K dan boleh ditunjukkan oleh Rajah 7.11(b).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)



(b)

Rajah 7.11 Resapan wap air di MH I pada pelbagai kondisi operasi (a) perbezaan suhu dan (b) perbezaan kelembapan relatif

Rajah 7.11(b) menunjukkan perbezaan jumlah resapan wap air dari sisi B ke A MH I pada suhu 363 K dan perubahan nilai RHA dan RHK. Pada RHK 90% dan 70 %, resapan wap air jumlahnya sama dengan RHA di bawah 50 % dan berbeza pada RHK di atas 50%. Hal ini menunjukkan bahawa pada kondisi RH di atas 50% berlaku

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

penurunan jumlah wap air yang mengalir keluar dari sisi anod sehingga memerlukan wap air lebih banyak pada MH I. Sedangkan untuk RHK 50%, 30% dan 10%, resapan wap air mempunyai jumlah yang sama jika RHA di bawah 30% dan berbeza jika RHA di atas 30%. Hal ini juga menunjukkan bahawa di atas RHA 30% wap air mengalami penurunan pada sisi anod dan memerlukan wap air yang lebih di MH I. Huraian yang ditunjukkan oleh Rajah 7.11 merupakan resapan air yang berlaku pada satu sel MH I. Jumlah wap air yang diperlukan dari sisi B MH I untuk mencukupi keperluan wap air di anod diterangkan selanjutnya tentang jumlah sel yang diperlukan di MH I.

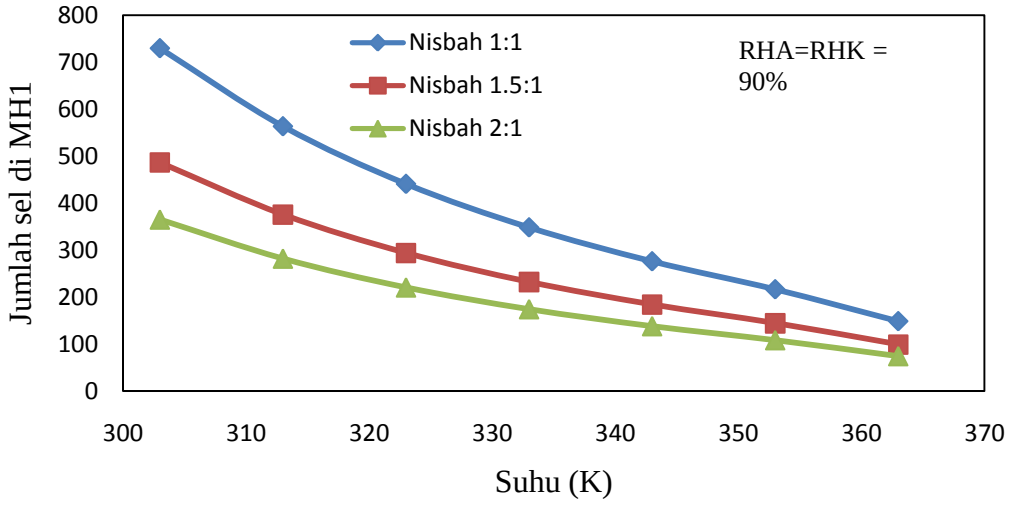
7.6.3 Jumlah Sel Pada MH1

Berdasarkan Rajah 7.1 menunjukan bahawa wap air yang mengalir keluar daripada sisi katod berguna melembapkan hidrogen dan oksigen. Pencapaian kelembapan bahan tindak balas yang diinginkan dilakukan dengan memambahkan beberapa sel pada pelembap membran. Jumlah sel tersebut berguna untuk mencukupkan keperluan wap air untuk mencapai kelembapan yang ditetapkan dengan memanfaatkan wap air daripada PEMFC tanpa menambahkan wap air daripada luaran sistem.

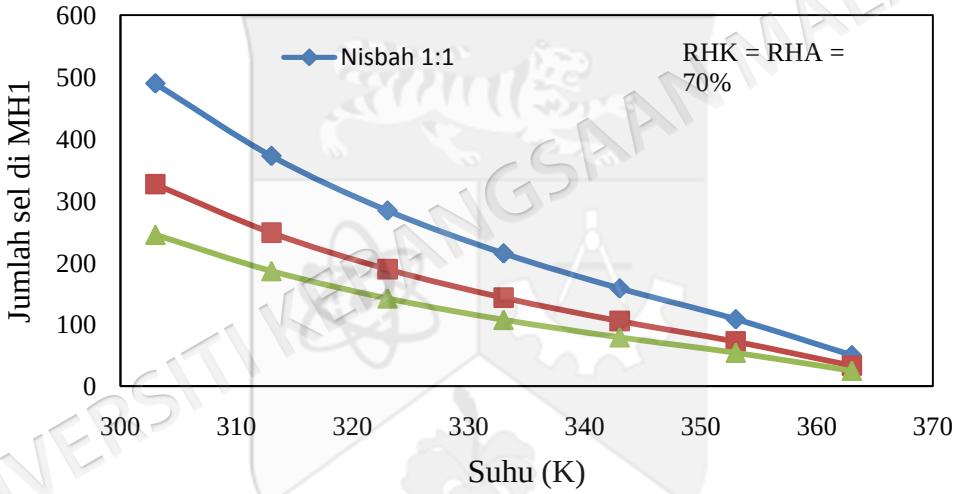
Rajah 7.12 menunjukkan jumlah sel yang diperlukan untuk mendapatkan wap air melalui resapan wap air dari sisi B ke sisi A MH I. Jumlah wap air yang diperlukan di dalam gas hidrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi anod ditunjukkan oleh Bab 4. Rajah 4.12(a). Jumlah sel MH I diperoleh daripada jumlah resapan wap air pada sel pelembapan membran dengan melakukan perbezaan suhu, RHA dan RHK. Jumlah sel pelembap membran sangat erat hubungannya dengan jumlah resapan wap air. Penggunaan sejumlah sel adalah untuk menaikan jumah resapan wap air pada pelembap membran. Penggunaan sel tunggal pada pelembap membran akan memerlukan luas pelembap membran yang besar berbanding PEMFC untuk mencapai kelembapan bahan tindak balas yang diinginkan.

Jumlah sel pada MH I di reka bentuk berdasarkan nisbah luas MH I berbanding luas PEMFC. Nisbah yang diamati iaitu: 1:1, 1.5:1, dan 2:1

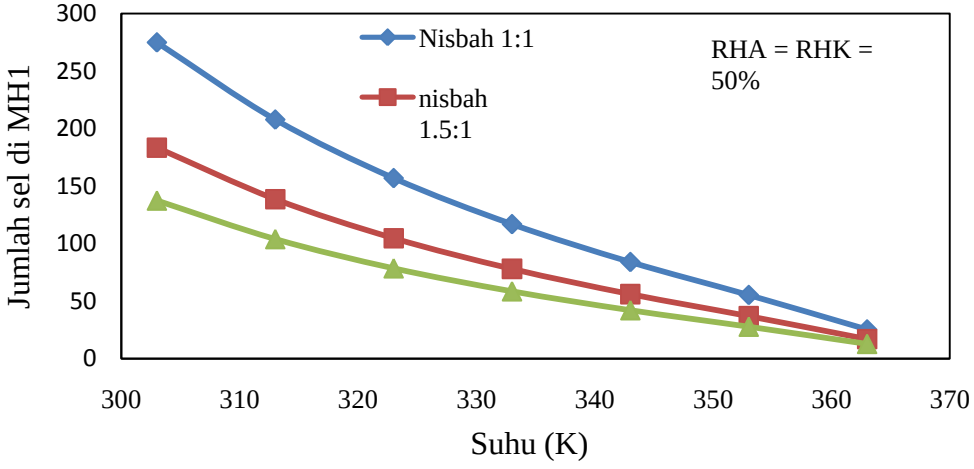
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)

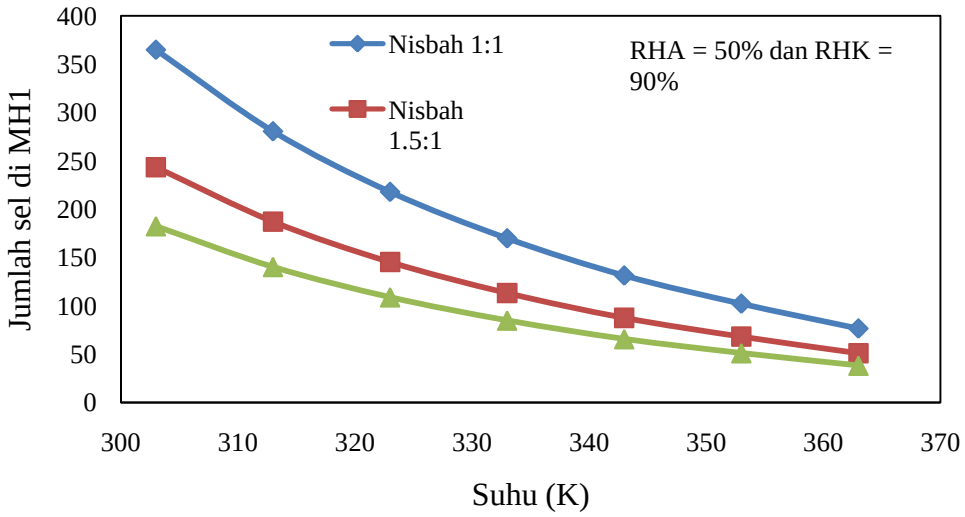


(b)

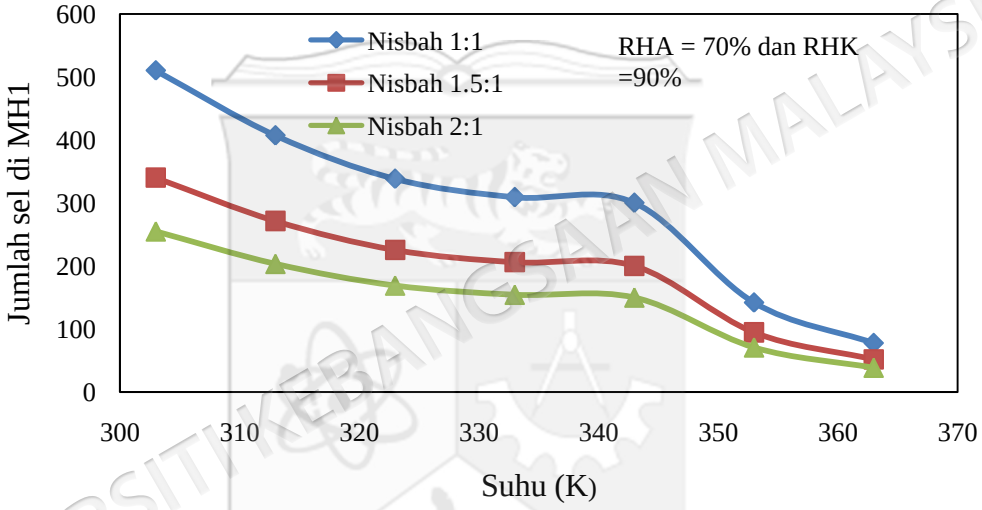


(c)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(d)



(e)

Rajah 7.12 Jumlah sel yang diperlukan di MH I pada perbezaan kondisi operasi (a) RHA dan RHK = 90% (b) RHA dan RHK=70% (c) RHA dan RHK = 50% (d) RHA = 50% dan RHK = 90% (e) RHA = 70% dan RHK = 90%

Jumlah sel di MH I diperlukan lebih sedikit untuk memperoleh resapan wap air dari sisi B MH I ke sisi A MH I jika berlaku kenaikan suhu operasi. Kenaikan suhu operasi menyebabkan peningkatan jumlah wap air yang meresap tiap satu sel MH I, akibatnya semakin sedikit jumlah sel yang diperlukan. Pada RHA tetap dan RHK berbeza, kenaikan nilai RHK hanya menyebabkan sedikit kenaikan jumlah sel yang diperlukan di MH I seperti Rajah 7.12(b) dengan 7.12(e), Rajah 7.12(c) dengan 7.12(d). Pada RHA berbeza dan RHK tetap, kenaikan nilai RHA menyebabkan kenaikan jumlah sel yang digunakan seperti Rajah 7.12(a),7.12(d) dan 7.12 (e). Kes

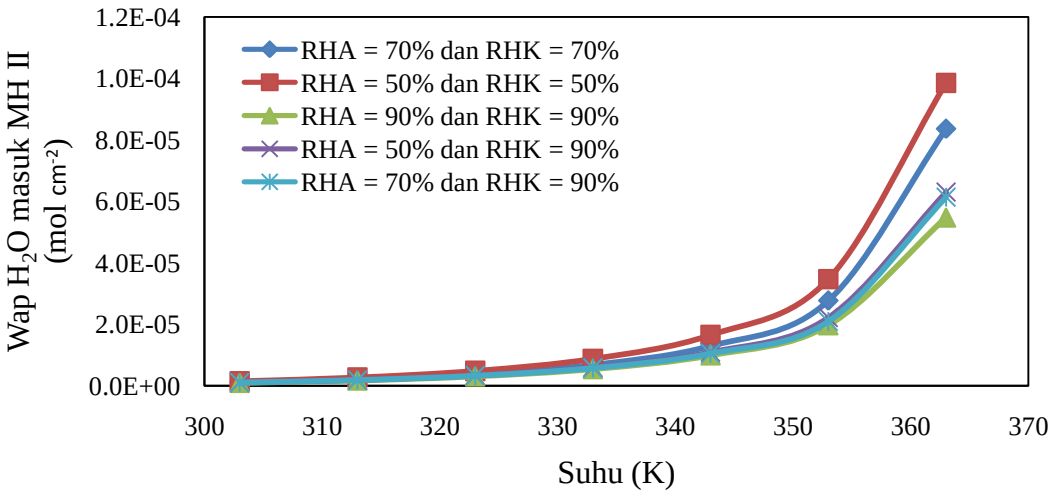
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

yang serupa juga berlaku pada nilai RHA dan RHK sama, kenaikan nilai kelembapan menyebabkan meningkatnya jumlah sel yang diperlukan di MH I. Untuk semua kondisi operasi yang berlaku. jumlah sel MH I paling sedikit diperlukan berlaku pada suhu tinggi iaitu 363 K. Pada suhu 363K, nisbah luas kawasan MH I berbanding PEMFC adalah 1:1 boleh digunakan untuk reka bentuk sistem. Rajah 7.12 menunjukkan bahawa tidak terdapat peningkatan penggunaan jumlah sel yang tinggi jika dibezakan nisbah MH I berbanding PEMFC. Sebaliknya, pada suhu rendah untuk mengurangi penggunaan jumlah sel yang banyak di MH I boleh dilakukan dengan membuat luas kawasan MH I lebih besar daripada PEMFC. Jumlah sel MH I diperlukan tersebut boleh dilihat pada nisbah 1.5:1 dan 2:1. Semakin rendah suhu operasi semakin banyak sel yang diperlukan kerana resapan wap air juga semakin kecil. Semakin rendah resapan wap air maka sel pelembap membran diperlukan semakin banyak untuk memcapai kelembapan bahan tindak balas sesuai dengan yang mengalir masuk PEMFC.

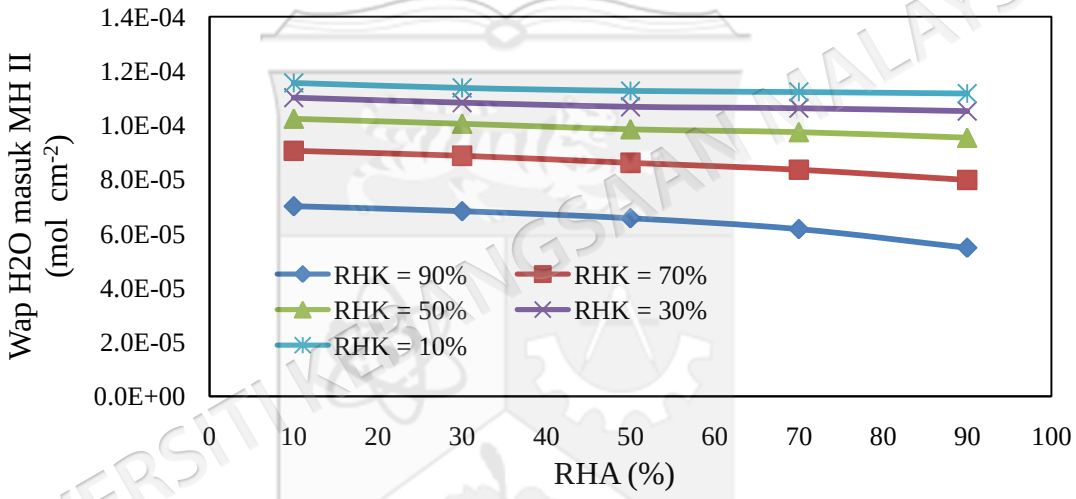
7.6.4 Wap Air Mengalir Masuk B MH II

Wap air yang mengalir masuk ke dalam B MH II diperoleh daripada wap air yang mengalir keluar dari sisi B MH I. Wap air ini digunakan untuk melembapkan udara sebelum mengalir masuk ke dalam sisi katod PEMFC. Rajah 7.13 menunjukkan jumlah wap air mengalir masuk B MH II. Kesan kondisi operasi yang digunakan di MH II menunjukkan huraian yang sama tetapi berbeza dalam jumlah wap air dengan MH I. Rajah 7.13(a) menunjukkan bahawa kenaikan suhu operasi menyebabkan kenaikan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Kenaikan nilai RHA menyebabkan berlakunya penurunan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Pada RHA berbeza dan RHK tetap jumlah wap air yang mengalir masuk B MH II mempunyai nilai sama, tetapi sedikit berbeza di atas 353 K.. Rajah 7.13(b) menunjukkan bahawa kenaikan nilai RHA dan nilai RHK menyebabkan berlakunya penurunan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Berdasarkan hasil yang ditunjukkan oleh Rajah.7.13 terlihat bahawa wap air yang mengalir masuk B MH I sangat besar berbanding jumlah wap air yang meresap ke dalam sisi A MH I. Fenomena ini ditunjukkan oleh Rajah 7.13 bahawa tidak berlaku kekurangan wap air yang tinggi terhadap wap air yang mengalir masuk sisi B MH II.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)



(b)

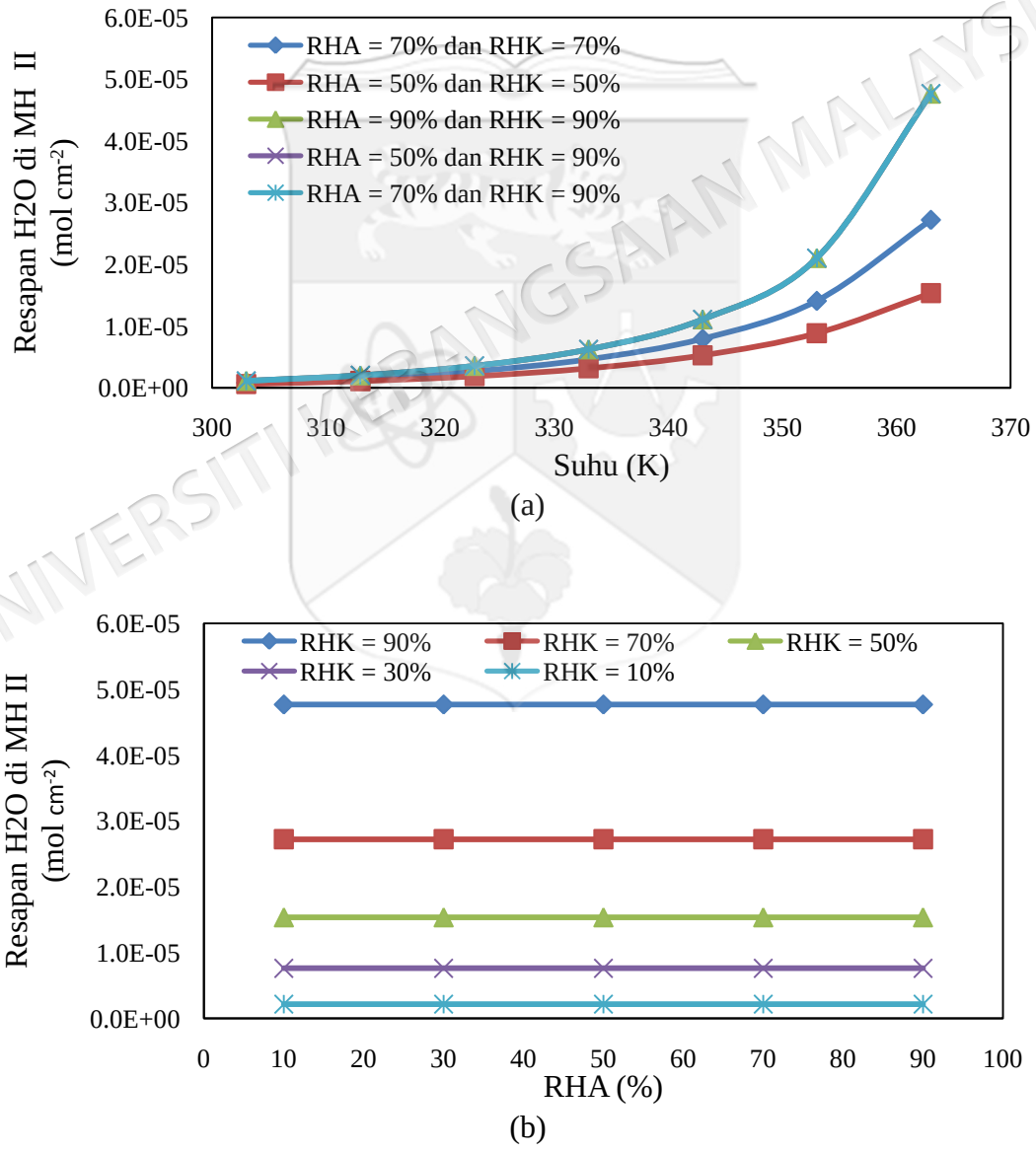
Rajah 7.13 Jumlah wap air mengalir masuk sisi B MH II dengan kondisi operasi berbeza (a) perbezaan suhu dan (b) perbezaan kelembapan relatif

7.6.5. Resapan Wap Air di MH II

Rajah 7.14 menunjukkan resapan wap air yang berlaku pada MH II. Jumlah wap air yang meresap pada MH II dilihat daripada pengaruh suhu operasi dan perubahan nilai kelembapan relatif. Wap air ini digunakan untuk melembapkan udara sebelum mengalir masuk ke dalam sisi katod. Udara yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH II merupakan udara kering. Rajah 7.14(a) menunjukkan pengaruh suhu terhadap jumlah resapan wap air di MH II. Meningkatnya suhu operasi menyebabkan berlakunya kenaikan jumlah wap air yang meresap di MH II. Nilai RHA berbeza dan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

RHK tetap maka tidak berlaku terhadap perbezaan resapan jumlah wap air di MH II. Selain daripada itu, kenaikan nilai RHK menyebabkan berlakunya kenaikan jumlah wap air pada MH II. Rajah 7.14(b) menunjukkan bahawa kenaikan nilai RHA pada suhu 353 K tidak menyebabkan berlakunya kenaikan resapan wap air pada MH II. Kes ini disebabkan kerana udara yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH II merupakan udara kering. Sehingga perubahan nilai RHA tidak menyebabkan perubahan jumlah wap air yang meresap dari sisi B ke sisi A MH II. Rajah 7.14(a) dan 7.14(b) menunjukkan bahawa perubahan jumlah resapan wap air dipengaruhi oleh suhu dan nilai RHK.

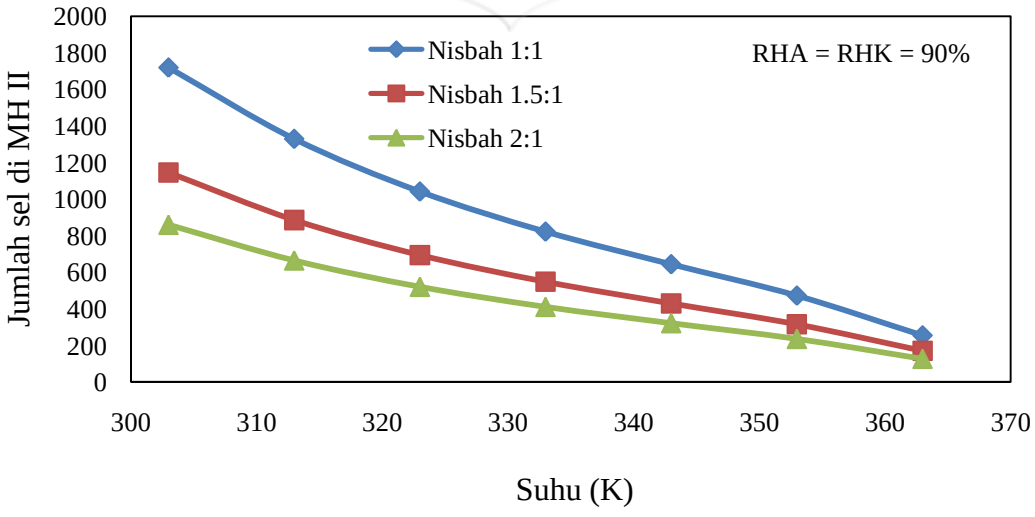


Rajah 7.14 Resapan wap air di MH II pada pelbagai kondisi operasi (a) perbezaan suhu dan (b) perbezaan kelembapan relatif

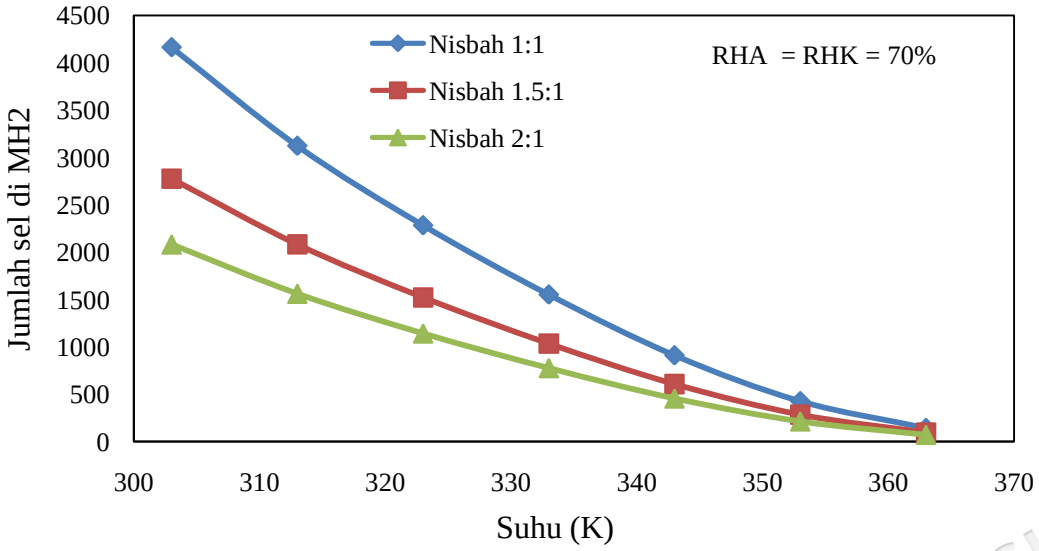
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.6.6 Jumlah Sel di MH II

Resapan wap air di MH II yang ditunjukkan oleh Rajah 7.14 merupakan resapan yang berlaku untuk satu sel MH II. Untuk memenuhi jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi katod seperti yang ditunjukkan Bab IV Rajah 4.12(b) maka diperlukan beberapa sel di MH II. Berikut ini merupakan huraian tentang jumlah sel yang diperlukan di MH II. Rajah 7.15 menunjukkan jumlah sel di MH II pada pelbagai nilai kelembapan relatif. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahawa kenaikan suhu operasi menyebabkan jumlah sel semakin sedikit diperlukan untuk meresapkan wap air pada MH II. Rajah 7.15(a) dan (b) menunjukkan bahawa perubahan RHA dan RHK daripada 90% kepada 70% dan akibatnya semakin banyak jumlah sel yang diperlukan di MH II. Penurunan nilai kelembapan menyebabkan resapan wap air semakin rendah, sehingga jumlah sel pelembap membran semakin banyak. Suhu maksimum 363 K menunjukkan jumlah minimum sel yang digunakan pada MH II. Selain daripada itu, luas kawasan MH II berbanding luas kawasan PEMFC tidak menunjukkan jumlah yang ketara sehingga memungkinkan untuk menggunakan nisbah 1:1 pada kondisi ini. Kondisi ini juga menunjukkan bahawa wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II mencukupi untuk melakukan pelembapan udara pada sisi A MH II. Kondisi ini juga memungkinkan proses reka bentuk sistem PEMFC dilakukan secara serentak. Penggunaan wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II untuk pelembapan udara ditunjukkan oleh Rajah 7.16.



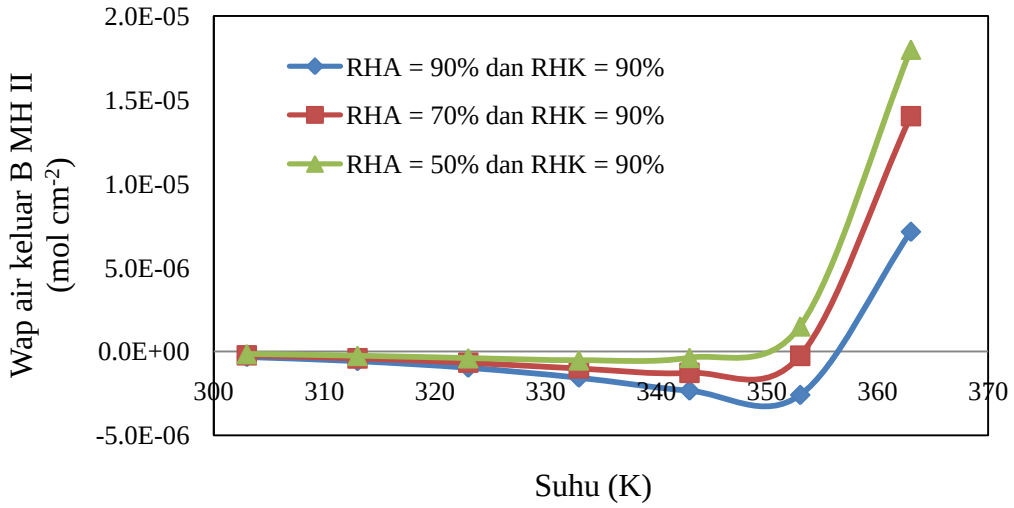
(a)



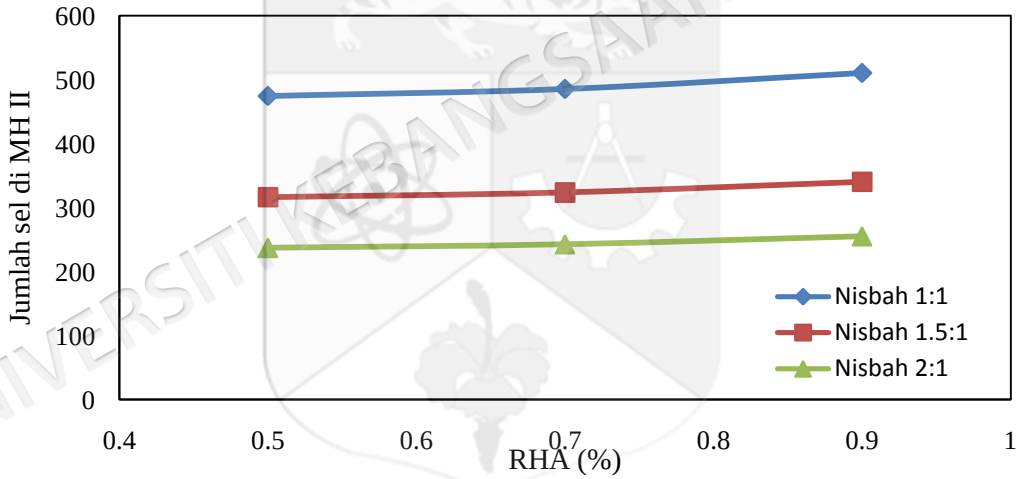
(b)

Rajah 7.15 Jumlah sel yang diperlukan di MH I pada perbezaan kondisi operasi (a) RHA dan RHK = 90% (b) RHA dan RHK=70%

Rajah 7.16 menunjukkan wap air mengalir keluar dari sisi B MH II berlangsung pada RHA berbeza dan RHK tetap 90%. Kondisi RHA 90% dan 70% sedangkan RHK tetap 90% menunjukkan bahawa jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B MH II mencukupi untuk digunakan sebagai pelembap udara di A MH II. Kondisi suhu di bawah 363 K wap air mengalir masuk ke dalam B MH II tidak mencukupi untuk melembapkan udara. Nilai RHA 50% dan RHK tetap 90% wap air mencukupi untuk melembapkan udara dan berlangsung di atas suhu 353 K. Suhu di bawah 353 K wap air tidak mencukupi untuk melembapkan udara. Nilai negatif pada Rajah 7.17 menujukan kekurangan jumlah wap air dan nilai positif menunjukkan kelebihan jumlah wap air. Kekurangan jumlah wap air disebabkan tingginya resapan wap air ke sisi A berbanding mengalir masuk ke dalam sisi B MH II. Jika melakukan proses reka bentuk sistem PEMFC secara serempak boleh menggunakan suhu 363K untuk mencukupi keperluan wap air di MH I dan MH II.



Rajah 7.16 Kesan perubahan suhu terhadap jumlah wap air yang mengalir keluar dari sisi B MH II dengan nilai RHK tetap 90% dan nilai RHA berbeza (90%. 70% dan 50%)



Rajah 7.17 Jumlah sel di MH II pada suhu 363 K dan RHK tetap 90%.

Rajah 7.17 menunjukkan jumlah sel yang diperlukan untuk melembapkan udara di MH II berlangsung pada suhu operasi 363 K. Kenaikan nilai RHA menyebabkan semakin banyaknya jumlah sel yang diperlukan pada MH II. Meningkatnya nilai RHA mengakibatkan semakin banyaknya jumlah resapan wap air di MH I. Tinggi resapan wap air mengakibatkan semakin kecil jumlah wap air mengalir masuk ke dalam B MH II, sehingga resapan air juga semakin kecil. Jadi naiknya RHA menyebabkan semakin kecilnya resapan air di MH II dan kesannya memerlukan jumlah sel yang banyak.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.7 PENGESAHAN HASIL SIMULASI

Sebagai pengesahan hasil kajian penyelidikan maka dibandingkan terhadap beberapa hasil penyelidikan yang telah dilakukan. Park et al. (2008) dan Sabharwal et al (2012) seperti yang ditunjukan oleh Rajah 7.18. Parameter yang digunakan bahagi kedua dua perbandingan ini ditunjukan oleh Jadual 7.1.

Jadual 7.1 Data penyelidikan oleh Park et al. (2008) dan Sabharwa et al. (2012).

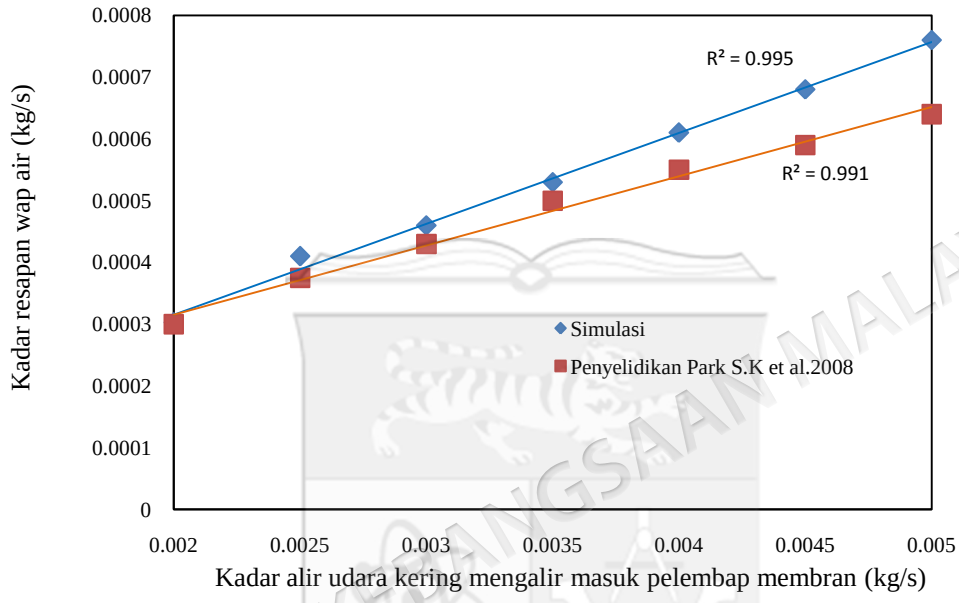
Parameter	**Cai**	**Karmik**
Kelembapan relatif di katod (RHK)	75%	0
Kelembapan relatif di anod (RHA)	56%	100%
Tekanan di anod (PA)	2 atm	1.3 atm
Tekanan di katod (PK)	2 atm	1.3atm
Ketumpatan arus (i)	0.1-0.6 A cm^{-2}	0.1-0.6 A cm^{-2}
Suhu (T)	333 K	353 K
Nisbah stoikhiometri hidrogen	1.1	2
Nisbah stoikhiometri oksigen	2.5	2
Kawasan aktif MEA	128 cm^2	280 cm^2

Rajah 7.18(a) menggambarkan kadar alir udara kering mengalir masuk pelembap membran terhadap resapan wap air pada membran. Secara amnya kenaikan kadar alir uadara kering masuk pelembap membran menyebabkan berlakunya kenaikan resapan wap air. Hasil simulasi kajian ini berbanding penyelidikan yang dilakukan oleh Park et al (2008) mempunyai trend yang sama. Pada kadar alir udara kering yang rendah, hasil simulasi mempunyai kadar alir resapan wap air yang sama dengan Park et al (2008). Hasil simulasi mempunyai kadar resapan wap air berbeza dengan Park et al (2008) pada kadar kadar alir udara yang tinggi, dimana hasil simulasi lebih rendah berbanding Park et al. (2008).

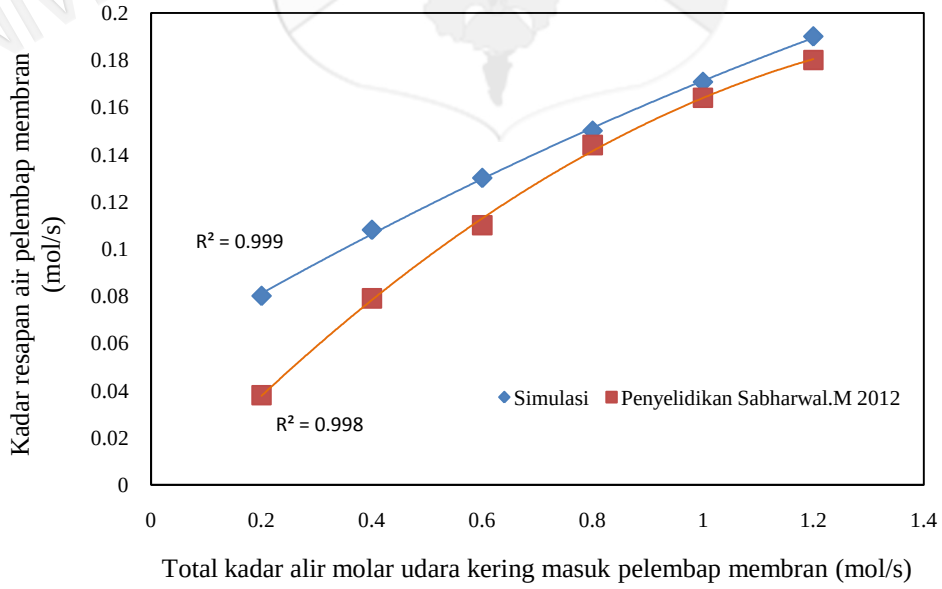
Rajah 7.18(b) merupakan perbandingan terhadap penyelidikan yang dilakukan oleh Sabharwa et al (2012). Rajah menunjukan hubungan kadar alir kepekatan udara kering terhadap kepekatan resapan wap air. Kenaikan kadar alir kepekatan udara

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

menyebabkan kenaikan kadar resapan wap air. Penyelidikan ini juga memiliki trend sama. Semakin tinggi kenaikan kadar alir kepekatan udara kering maka kenaikan kadar resapan tidak meningkat secara ketara.Kondisi ini juga menunjukkan hasil simulasi mempunyai kadar alir resapan wap air yang hampir sama dengan penyelidikan yang dilakukan Sabharwa M et al.



(a)



Rajah 7.18 Perbandingan uji kaji terhadap (a) penyelidikan Park et al (2008) dan (b) penyelidikan Sabharwal (2012).

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7.8 KESIMPULAN

1. Peningkatan nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) tidak memberi kesan terhadap peningkatan jumlah aliran wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B pelembapan membran I (B MH I) berbanding peningkatan nilai kelembapan udara di katod (RHK)
2. Suhu di atas 303 K dan nilai kelembapan udara di katod (RHK) turun daripada 90% kepada 50%, memberi kesan terhadap peningkatan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B pelembapan membran I (MH I)
3. Peningkatan nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) akan menyebabkan berlakunya kenaikan jumlah resapan wap air di pelembapan membran I (MH I). Di bawah suhu 353 K, tidak terdapat perbezaan jumlah resapan wap air di pelembapan membran I (MH I) pada nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) tetap dan kelembapan udara di katod (RHK) berbeza, tetapi terlihat berbeza jika suhu operasi di atas 353 K
4. Jumlah sel pada pelembapan membran I (MH I) paling sedikit diperlukan berlaku pada suhu tinggi iaitu 363 K. Semakin rendah suhu operasi semakin banyak sel yang diperlukan kerana resapan wap air juga semakin kecil
5. Kenaikan jumlah resapan wap air pada pelembapan membran II (MH II) dipengaruhi oleh kenaikan suhu dan nilai kelembapan udara di katod (RHK). Kondisi suhu di bawah 363 K wap air mengalir masuk sisi B pada pelembapan membran II (B MH II) tidak mencukupi untuk melembapkan udara. Nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) 50% dan kelembapan udara di katod (RHK) tetap 90% wap air mencukupi untuk melembapkan udara dan berlangsung di atas suhu 353 K.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB VIII

IMBANGAN DAN PEMULIHAN HABA PADA PROSES REKA BENTUK SISTEM PEMFC

8.1 PENDAHULUAN

Salah satu komponen yang mempengaruhi tingginya biaya produksi pada sistem PEMFC ialah jumlah tenaga yang tinggi untuk pemprosesan. Jumlah tenaga yang diperlukan untuk pemprosesan PEMFC dihitung berdasarkan imbangan jisim dan haba pada sistem. Sistem PEMFC memiliki beberapa proses seperti, proses aliran bendalir, pengangkutan jisim dan haba bersempena dengan tindak balas elektrokimia. Proses tersebut mempunyai impak yang ketara terhadap isu penting operasi iaitu pengurusan air dan haba. Pengetahuan mengenai pengurusan haba merupakan hal yang sangat kritikal, kerana kecekapan sistem PEMFC yang tinggi boleh dicapai dengan menaikkan suhu operasi yang berkesan terhadap kenaikan kadar kinetik pada kawasan tindak balas (Wen et al. 2009). Membran penukar proton boleh terjejas pada suhu yang terlalu tinggi, akibatnya pengurusan haba merupakan salah satu cabaran pada sistem PEMFC untuk mencapai aplikasi kuasa yang tinggi.

Pengurusan haba pada PEMFC berasaskan pada imbangan tenaga yang berlaku pada sistem yang digunakan. Imbangan tenaga yang terdapat pada sistem PEMFC iaitu berdasarkan tenaga yang diserap atau dilepaskan oleh sistem. Sebagai contoh ialah kuasa yang dihasilkan, tindak balas dan kehilangan haba di dalam proses sistem PEMFC. Imbangan tenaga yang dihasilkan pada setiap jenis sel fuel juga berbeza kerana disebabkan perbezaan dalam tindak balas yang berlaku mengikuti jenis sel. Secara amnya imbangan tenaga menunjukkan bahawa aliran entalpi bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC adalah sama dengan aliran entalpi produk yang

mengalir keluar dari PEMFC. Samping daripada itu, ditambah haba dalam bentuk haba bersih yang dijana oleh proses fizikal dan kimia dalam sel, kuasa yang dihasilkan daripada sel, dan kehilangan haba dari PEMFC kepada persekitarannya. Tenaga kimia hidrogen dan oksigen di dalam sistem PEMFC secara langsung diubah menjadi tenaga elektrik, air, dan haba sebagai hasil sampingan.

Analisis haba pada sistem PEMFC melalui pemodelan proses merupakan suatu cabaran. Hal ini berlaku kerana pada sistem terdapatnya pemulihan terhadap haba yang dihasilkan melalui tindak balas dan juga adanya sistem penyejuk yang digunakan pada sistem PEMFC. Pemodelan proses tersebut amat berguna untuk menyiasati kesan parameter yang digunakan terhadap prestasi sistem.

Masalah haba secara amnya dikaitkan dengan sistem PEMFC ialah kesukaran dalam melesapkan haba buangan yang dijana oleh sistem PEMFC. Sistem PEMFC beroperasi optimal pada julat suhu 60^0C sehingga 80^0C dengan kecekapan elektrik sekitar 50% (Chang et al. 2007; Hwang et al. 2008). Hal ini bermakna bahawa 50% daripada tenaga perlu dilesapkan ke dalam haba buangan dan di keluarkan dari PEMFC di bawah keadaan operasi mantap.

Terdapat beberapa cabaran berhubungan dengan pengurusan haba pada sistem PEMFC. Cabaran tersebut meliputi pertama, pengurusan haba yang dilesapkan oleh sel dengan menggunakan air penyejuk guna memastikan sel fuel berada pada operasi suhu optimum. Kedua, haba sisa yang dilesapkan oleh sel fuel perlu dipulihkan dengan cara memanfaatkan untuk menaikkan suhu proses lainnya seperti menaikkan suhu bahan tindak balas sebelum melakukan tindak balas di dalam sel, dan terakhir adalah menaikkan suhu aliran masuk pelembapan membran.

Pada reka bentuk proses sistem PEMFC, penggunaan tenaga boleh dikurangi oleh penukar sistematik tenaga antara aliran panas dan sejuk dengan menggunakan alat penukar haba yang saling berhubungan yang dikenal dengan rangkaian penukar haba. Kajian yang dilakukan ini ditujukan untuk membangun sistem penyepadu pemulihan haba pada sistem PEMFC. Pemulihan haba ini diaplikasikan terhadap kecekapan panas dan kuasa elektrik yang dihasilkan.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

8.2 KAEDAH PENYELIDIKAN

8.2.1 Huraian Proses

Imbangan haba dihitung berdasarkan proses reka bentuk sistem PEMFC yang ditunjukkan oleh Rajah 8.1. Secara amnya terdapat dua proses utama pada carta alir iaitu proses pada PEMFC dan pelembapan bahan tindak balas di pelembapan membran. Haba pada PEMFC merupakan haba yang bersumber daripada hidrogen dan wap air yang mengalir masuk dan keluar dari sisi anod. Samping daripada itu juga, terdapat haba yang bersumber daripada udara dan wap air mengalir masuk dan keluar dari sisi katod. Sedangkan untuk proses berlaku pada pelembap membran di MH I dan MH II. Sumber haba pada MH I adalah bersumber daripada hidrogen dan wap air yang mengalir masuk dan keluar untuk dilembapkan. Komponen ini merupakan keluaran daripada anod ditambah hidrogen yang disuapkan. Manakala haba pelembap bersumber daripada wap air, oksigen dan nitrogen yang mengalir keluar dari katod PEMFC, selanjutnya mengalir masuk dan keluar di MH I. Sumber haba di MH II ialah udara yang mengalir masuk dan keluar pada MH II untuk dilembapkan. Manakala haba pelembap bersumber daripada wap air, oksigen dan nitrogen yang keluar dari MH I dan mengalir masuk dan keluar di MH II.

Sistem pemulihan haba proses reka bentuk sistem PEMFC bertujuan untuk memulihkan sejumlah haba yang terdapat pada sistem. Kajian tentang pemulihan haba yang dilakukan pada proses ini berlangsung pada tekanan operasi 1 atm , nisbah stoikiometri 1.2 untuk hidrogen dan 2 untuk oksigen dan ketumpatan arus ialah1.18 A cm^{-2}, dan kelembapan relatif yang berbeza. Nilai kelembapan relatif tersebut terdiri daripada keadaan 1 iaitu 70% untuk RHA dan 90% untuk RHK, keadaan 2 iaitu 50% untuk RHA dan 90% untuk RHK, keadaan 3 iaitu 50% untuk RHA dan 70% untuk RHK dan keadaan 4 iaitu 50% untuk RHA dan RHK. Pelembapan membran mempunyai dua sisi iaitu sisi A dan sisi B. Hidrogen dan wap air merupakan keluaran dari anod ditambah hidrogen suapan mengalir masuk ke dalam sisi A dengan suhu campuran 332.5 K. Air yang keluar dari sisi katod mempunyai dua fasa iaitu fasa cecair dan fasa wap. Air dalam fasa wap dengan oksigen dan nitrogen bergabung dengan 50% keluaran MH II mengalir masuk ke dalam sisi B MH I. Keluaran daripada B MH II

masih banyak mengandung wap air. Tujuan kitar semula 50% adalah untuk mengawal wap air yang mengalir masuk B MH I kelembapan relatifnya tetap. Sebelum bergabung kedua aliran tersebut di panaskan di alat penukar haba sampai suhu 368 K. Pada MH I berlaku pelembapan hidrogen. Hidrogen lembap mengalir keluar dari sisi A MH I dan mengalir masuk ke dalam sisi anod PEMFC pada suhu 363 K. Wap air bersama oksigen dan nitrogen mengalir keluar dari B MH I dan masuk B MH II pada suhu 365.5 K yang berfungsi untuk melembapkan udara. Udara kering yang mengalir masuk ke dalam sisi A MH II pada suhu 303 K dan mengalir keluar dari A MH II dan selanjutnya mengalir masuk ke dalam sisi katod pada suhu 363 K. Wap air, oksigen dan nitrogen mengalir keluar B MH II pada suhu 353.5 K. Sebanyak 50% keluaran B MH II disuapkan lagi ke B MH I, sebelumnya dipanaskan hingga suhu 368 K. Air penyejuk digunakan pada PEMFC untuk menjaga suhu tetap berlangsung 363 K.

8.2.2 Reka bentuk Teknologi Jepitan

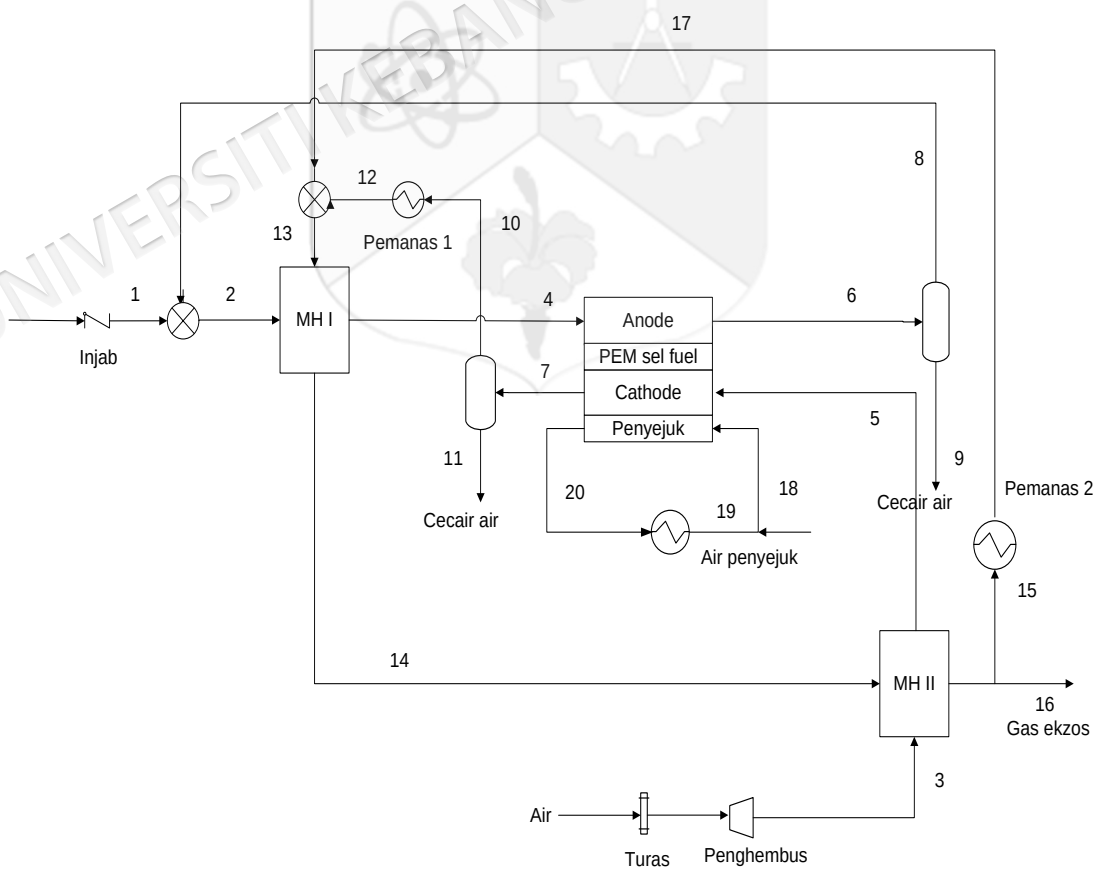
Analisis jepitan memerlukan aturan dalam langkah pengerjaan yang berterusan. Profil lengkung komposit menggambarkan haba yang ada di dalam proses Q_H, dan panas yang diperlukan pada proses Q_C. Daripada lengkung diperoleh suhu jepitan yang menunjukkan tidak adanya perpindahan haba.

Secara amnya, terdapat beberapa tahapan melakukan analisis jepitan yang terdiri daripada (Duncan 2004; Varbanov et al. 2012) : mengenal pasti aliran proses yang meliputi aliran panas, aliran sejuk dan aliran utiliti. Menentukan suhu jepitan panas dan sejuk serta menentukan tenaga sasaran pada aliran proses. Mengolah data-data termodinamik dan yang paling penting pada teknologi jepitan ialah suhu aliran (T) dan entalpi (H). Melakukan pemilihan beza suhu penukar haba minimum (ΔT_{min}) antara aliran panas dan aliran sejuk. Pembuatan gambarajah *Cascade,* adalah lengkung yang ada menunjukkan penggunaan entalpi pada setiap aliran sehingga mengetahui keperluan utiliti panas dan utiliti sejuk yang terdapat pada proses reka bentuk sistem PEMFC. Selanjutnya adalah pembuatan lengkung komposit dan lengkung komposit besar.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Lengkung komposit adalah lengkung antara suhu dengan entalpi. Lengkung ini terdiri daripada suhu aliran panas dan aliran sejuk. Melalui lengkung ini diperoleh suhu jepitan yang menunjukkan tidak terdapatnya perpindahan haba dari aliran panas ke aliran sejuk. Lengkung komposit besar menunjukkan variasi suapan dan keperluan haba yang terdapat pada proses reka bentuk sistem PEMFC. Gamba rajah ini juga berguna untuk memilih jenis utiliti yang diperlukan untuk proses. Penggunaan lengkung komposit besar bertujuan untuk memaksimumkan tingkat utiliti sehingga lebih murah kos operasinya.

Lengkung komposit besar dibentuk berdasarkan penggunaan data-data aliran pada lengkung komposit. Lengkung ini menghasilkan data tentang kapasiti sumber utiliti dan sasaran utiliti mesti dipenuhi oleh proses. Langkah awal dalam pembuatan lengkung komposit besar ialah pembuatan lengkung komposit. Nilai ΔT_{min} merupakan selisih suhu minimal yang diperlukan untuk menyelesaikan masalah pemulihan haba. ΔT_{min} yang diperlukan merupakan titik pendekatan paling dekat yang disebut dengan jepitan (Ghandehariun et al. 2012).

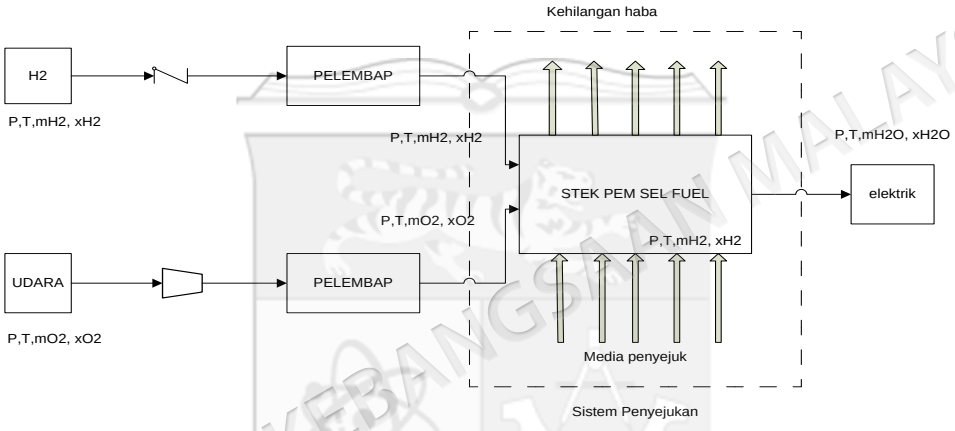


Rajah 8.1 Imbangan haba pada proses reka bentuk sistem PEMFC

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

8.3 IMBANGAN HABA PADA PROSES SISTEM PEMFC

Total imbangan tenaga pada PEMFC didasarkan kepada kuasa yang dihasilkan, tindak balas yang berlaku pada sel, haba yang dihasilkan dan kehilangan haba pada sistem PEMFC. Besarnya nilai imbangan tenaga merupakan entalpi tindak balas yang mengalir masuk ke dalam sel yang nilainya sama dengan entalpi produk yang mengalir meninggalkan PEMFC ditambah haba yang di hasilkan oleh kuasa yang dihasilkan dan laju haba yang hilang ke alam sekitar. Gambaran imbangan haba untuk reka bentuk sistem PEMFC boleh dilihat pada Rajah 8.2 berikut



Rajah 8.2 Proses sistem PEMFC

8.3.1 Jenis perubahan entalpi (haba)

Pada sistem PEMFC terdapat beberapa bentuk haba iaitu:

a. Haba deria (*sensible)*

Haba deria ialah haba yang boleh dirasakan perubahan suhunya, nilainya ialah:

$$q = m\, C_p\, dT \tag{8-1}$$

Muatan haba C_p ialah banyaknya haba yang diperlukan untuk menaikkan suhu setiap satuan jisim dan suhu. Untuk gas nilai C_p merupakan fungsi suhu.

b. Haba pendam (*latent*):

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Haba pendam ialah haba kerana berlakunya perubahan fasa dengan suhu tetap. Jenis haba yang termasuk haba pendam pada sistem PEMFC adalah:

- Haba pemeluwapan (*condensation*), ialah haba yang dihasilkan akibat berlakunya perubahan fasa gas menjadi fasa cecair
- Haba pengewapan (*vaporization*), ialah haba yang dihasilkan akibat berlaku perubahan fasa cecair menjadi fasa gas

c. Haba tindak balas

Haba tindak balas merupakan haba yang dihasilkan atau diperlukan pada proses yang melibatkan tindak balas .

8.3.2 Imbangan Tenaga PEMFC

Imbangan tenaga yang berlaku pada sistem PEMFC dinyatakan bahawa seluruh tenaga yang masuk nilainya mesti sama dengan seluruh tenaga yang keluar daripada PEMFC. Keseimbangan tenaga pada sistem PEMFC (Barbir 2005) ialah:

$$\sum H_{(x)masuk} = W_{elektrik} + \sum H_{(x)keluar} + Q \quad (8\text{-}2)$$

Entalpi masuk ialah entalpi seluruh aliran bahan tindak balas yang mengalir masuk ke dalam PEMFC. Komponennya terdiri dari entalpi hidrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi anod , entalpi oksigen dan nitrogen yang mengalir masuk ke dalam sisi katod, dan ditambah entalpi wap air yang terdapat dan mengalir bersama gas bahan tindak balas. Entalpi keluar ialah entalpi seluruh komponen yang mengalir keluar dari PEMFC. Entalpi tersebut bersumber daripada bahan tidak mengalami tindak balas di dalam sistem PEMFC. Komponennya ialah hidrogen yang mengalir keluar dari sisi anod, oksigen dan nitrogen yang mengalir keluar dari sisi katod, selanjutnya ditambah entalpi air dalam fasa gas atau cecair yang mengalir keluar dari PEMFC. Fluks haba yang keluar dari PEMFC boleh dikawal oleh media penyejuk atau tanpa dikawal kerana merupakan haba pelepasan dari permukaan sel ke sekitar.Gas yang mudah terbakar mempunyai nilai pemanas, yang mana nilai entalpi ialah:

$$H = \dot{m}\left(C_p\, T + H^0_{HHV}\right) \quad (8\text{-}3)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Secara amnya nilai haba dilaporkan pada 25°C. Maka untuk hidrogen nilai haba ialah:

$$H_{HHV}^{0} = \left[H_{HHV}^{25} - C_{p,H_2} + \frac{1}{2}\frac{M_{O2}}{M_{H_2}} C_{p,O_2} - \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} C_{p,H_2O(l)}\right] \times 25 \quad (8\text{-}4)$$

Nilai entalpi wap air ialah:

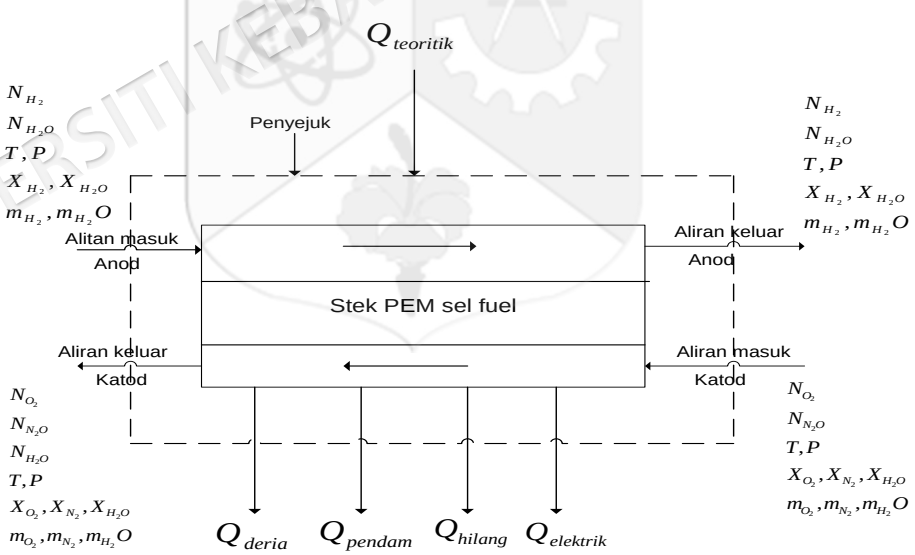
$$H = \dot{m}_{H_2O(g)}\left(C_{p,H_2O(g)}T + H_v\right) \quad (8\text{-}5)$$

Nilai entalpi cecair air ialah:

$$H = \dot{m}_{H_2O(l)}\left(C_{p,H_2O(l)}T\right) \quad (8\text{-}6)$$

8.3.3 Imbangan Haba pada PEMFC

Model rencana imbangan haba untuk reka bentuk sistem PEMFC boleh dilihat pada Rajah 8.3 berikut:



Rajah 8.3 Model imbangan haba sistem PEMFC

Imbangan haba pada sistem PEMFC ini adalah:

$$\sum Q_{masuk} - \sum Q_{keluar} = Q_{elektrik} + Q_{hilang} + Q_{penyejuk} \quad (8\text{-}7)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Dimana:

Q_{masuk} ialah haba gas tindak balas mengalir masuk PEMFC

Q_{keluar} ialah haba gas yang tidak bertindak balas dan hasil tindak balas yang mengalir keluar dari PEMFC.

$Q_{elektrik}$ ialah yang berpunca daripada tenaga elektrik yang dihasilkan

Q_{hilang} ialah haba hilang ke sekitar.

$Q_{penyejuk}$ ialah haba yang berasal dari PEMFC oleh penyejukan aktif.

Tenaga bahan api yang ditukar menjadi tenaga elektrik dan haba boleh dinyatakan sebagai tenaga bahan api bertindak balas ialah haba terjana ditambah dengan tenaga yang dibangkitkan.

$$\frac{1}{2F} H_{HHV} n_{cell} = Q_{terjana} + IV_{cell} n_{cell} \quad (8\text{-}8)$$

Jika air mengalir keluar dari PEMFC adalah dalam fasa cecair pada suhu bilik, maka;

$$Q_{terjana} = (1.482 - V_{cell}) In_{cell} \quad (8\text{-}9)$$

Jika air mengalir keluar dari PEMFC berada dalam fasa wap dan suhu bilik, maka:

$$Q_{terjana} = (1.254 - V_{cell}) In_{cell} \quad (8\text{-}10)$$

Jumlah nilai haba deria yang dihasilkan sistem ialah:

$$Q_{deria} = \mathcal{N}_{(x)} \mathrm{C_{p,(x)}} \mathrm{dT} \quad (8\text{-}11)$$

Nilai haba deria pada sisi anod dan sisi katod ialah:

$$Q_{,deria\ a,k} = Q_{a,k,masuk} - Q_{a,k,keluar} \quad (8\text{-}12)$$

Nilai haba pendam yang dihasilkan oleh sistem ialah:

$$Q_{pendam} = m\, H \quad (8\text{-}13)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Atau:

$$Q_{pendam} = m\left(H_v - H_f\right) \tag{8-14}$$

Nilai haba pendam untuk pemeluapan wap air atau penyejatan air cecair pada saluran anod dan katod ((Zong et al. 2006) adalah:

$$Q_{pendam\ ,A,K} = \left[H_{A,K\ wap} + H_{A,K\ cecair}\right]dN_{A,K} \tag{8-15}$$

Dimana:

$$\left(H_{A,K\ wap} - H_{A,K\ cecair}\right) = 45070 - 41.9\left(T_{A,K} - 273\right) + 3.44 \times 10^{-3}\left(T_{A,k} - 273\right)^2 + 2.54 \times 10^{-6}\left(T_{A,K} - 273\right)^3 - 8.98 \times 10^{-10}\left(T_{A,K} - 273\right)^4 \tag{8-16}$$

Pada sistem ini diandaikan bahawa pada sisi anod berlaku keseimbangan antara pemeluapan wap cecair dengan penyejatan cecair air. Menurut (Yu et al. 2005) jika pemeluapan wap air lebih besar atau sama dengan penyejatan air cecair maka jumlah tersebut cukup untuk mengalami perubahan fasa.

Menurut (Chu et al. 2007) bahawa kadar perpindahan haba antara titisan air dengan MEA lebih besar dari titisan air dengan gas. Juga dengan andaian bahawa suhu cecair air dan MEA adalah sama maka terdapat perubahan fasa di permukaan saluran dan imbangan haba pada PEMFC.

8.3.4 Haba Pada Lapisan Pemangkin (CL)

Secara teoretis, haba yang dihasilkan pada lapisan pemangkin (Q_{teo}) ialah (Shan & Choe 2005; Falcão et al. 2009; Ramousse et al. 2009):

$$Q_{teo} = -\Delta G \tag{8-17}$$

Jika upaya (*potential*) sel sebagai fungsi (T,P), maka

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$Q_{teo} = \frac{\Delta G_{tot\,(T,P)}}{nF} = \left(\frac{\Delta H_{tot\,(T,P)}}{nF} - \frac{T\,\Delta S_{rev,tot\,(T,P)}}{nF}\right) \quad (8\text{-}18)$$

Berdasarkan tindak balas yang berlaku, iaitu:

$$H_{2(wap\,)} + \frac{1}{2}O_{2(wap\,)} \rightarrow H_2O_{cecair\,)} + haba + elektrik \quad (8\text{-}19)$$

Jumlah haba yang dihasilkan pada elektrod PEMFC ialah:

$$Q_{elektrik} = E_{elektrik} = nV_{sel}IA \quad (8\text{-}20)$$

Nilai voltan dinyatakan dalam bentuk gabungan daripada potential termodinamik, kelebihan keupayaan pengaktifan dan ohmic (Shan & Choe 2005). Maka jumlah haba pada elektrod ialah:

$$Q = I(V_0 + \eta_{act} + \eta_{ohm}) \quad (8\text{-}21)$$

Menurut (Ni et al. 2008) nilai keupayaan lebih ialah:

$$\mathfrak{y} = 2F\left(\eta_{act,A} + \eta_{act,K} + \eta_{ohm}\right) \quad (8\text{-}22)$$

Berdasarkan persamaan dasar tenaga yang ditukar dalam bentuk haba iaitu:

$$E = \frac{\Delta G}{nF} - \frac{\Delta H}{nF} = \frac{-T\,\Delta S}{nF} \quad (8\text{-}23)$$

Maka nilai haba pada PEMFC ialah:

$$Q = I\left(\frac{-\Delta S\,dT}{nF} + \mathfrak{y}\right) \quad (8\text{-}24)$$

$P_{O_2}^{ref}$ ialah tekanan separa rujukan untuk oksigen

Berdasarkan persamaan 8-7, maka model imbangan haba pada PEMFC boleh dikembangkan lagi oleh (Yu et al. 2005) menjadi persamaan berikut:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$Q_{teori} = Q_{elekrik} + Q_{deria} + Q_{pendam} + Q_{hilang} + Q_{air\ penyejuk} \quad (8\text{-}25)$$

Panas yang dihasilkan oleh PEMFC ialah (Koh et al. 2005):

$$Q_{cell} = Q_{teori} - Q_{elect} \quad (8\text{-}26)$$

Dimana nila haba secara teori ialah:

$$Q_{theo} = (-\Delta H)_{H_2O}\, r_{H_2} \quad (8\text{-}27)$$

Persamaan 8.28 boleh dikembangkan lagi menjadi:

$$Q_{theo} = \left[\sum_{H_2O} n_e\left(h_f^0 + \Delta\bar{h}\right) - \sum_{r_i} n_i\left(h_f^0 + \Delta\bar{h}\right)\right]\frac{i}{2F} \quad (8\text{-}28)$$

Sedangkan tenaga elektrik yang dihasilkan PEMFC ialah:

$$Q_{elect} = iA_{cell} \sum V_{cell} \quad (8\text{-}29)$$

Berdasarkan persamaan 8-29 dan 8-30 maka haba yang dihasilkan oleh PEMFC secara teori adalah sebagai berikut:

$$Q_{cell} = \left[\sum_{H_2O} n_e\left(h_f^0 + \Delta\bar{h}\right) - \sum_{r_i} n_i\left(h_f^0 + \Delta\bar{h}\right)\right]\frac{i}{2F} - iA_{cell} \sum V_{cell} \quad (8\text{-}30)$$

Besarnya nilai entalpi wap air menurut (Koh et al. 2005) ditunjukan oleh Jadual 8.1 :

Jadual 8.1 Hubungan linier (A+BT) dan purata nilai termodinamik untuk air

Parameter	**A**	**B**	**Avg (300 – 400 K)**
$(-\Delta H)_{H_2O}$	238870.3	9.92008	242346 J mol^{-1}

Sumber: Koh et al 2005

Entalpi tindak balas pada keadaan piawai adalah (Ramousse et al. 2009):

$$\Delta H_{react} = \Delta H^f_{H_2O} - \Delta H^f_{H_2} - \frac{1}{2}\Delta H^f_{O_2} \quad (8\text{-}31)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Menurut (Flückiger et al. 2007), nilai entalpi untuk air cecair ialah:

$$\Delta H_{f,l} = -285.8\ 10^3\ Jmol^{-1} \tag{8-32}$$

Dan nilai entalpi untuk wap air adalah :

$$\Delta H_{f,g} = -241.8\ 10^3\ Jmol^{-1} \tag{8-33}$$

q_{deria} ialah jumlah haba yang terdapat pada aliran bendalir PEMFC, terdiri daripada: sisi anod, sisi katod dan pada air penyejuk.

q_{pendam} ialah jumlah haba yang terdapat pada perubahan fasa bendalir (pengewapan atau pemeluapan).

$q_{elektrik}$ ialah jumlah tenaga elektrik yang dihasilkan.

q_{hilang} ialah jumlah haba yang hilang dari permukaan sel.

$q_{tindak\ balas}$ ialah jumlah haba yang dihasilkan pada tindak balas elektrokimia.

8.3.5 Total Imbangan Haba pada PEMFC

a. Nilai haba pada sisi anod

Nilai haba deria pada sisi anod PEMFC ($q_{,deria\ a}$) ialah:

$$q_{,deria\ a} = \left[\mathcal{N}_{H_2,a,keluar}\ C_{p,H_2}\left(T_{a,keluar} - T_{ref}\right) - \mathcal{N}_{H_2,a,masuk}\ C_{p,H_2}\left(T_{a,masukr} - T_{ref}\right)\right] + \left[\mathcal{N}_{H_2O(g),a,keluar}\ C_{p,H_2O}\left(T_{a,keluar} - T_{ref}\right) - \mathcal{N}_{H_2O\ (g),a,masuk}\ C_{p,H_2O}\left(T_{a,masuk} - T_{ref}\right)\right] \tag{8-34}$$

Persamaan 8-35 boleh disederhanakan menjadi:

$$q_{,deria\ a} = \left[\left(\mathcal{N}_{H_2,a,keluar}\ C_{p,H_2} + \mathcal{N}_{H_2O(g),a,keluar}\ C_{p,H_2O}\right)\right] - \left[\left(\mathcal{N}_{H_2,a,masuk}\ C_{p,H_2} + \mathcal{N}_{H_2O\ (g),a,masuk}\ C_{p,H_2O}\right)\right]\left(T_{a,masuk} - T_{ref}\right) \tag{8-35}$$

Nilai haba pendam sisi anod PEMFC $\left(Q_{pendam,a}\right)$ ialah:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$Q_{pendam\ ,a} = \left(H_{,wap} - H_{,cecair\ ,a}\right)\mathrm{d}\mathcal{N}_{air\ ,a} \quad (8\text{-}36)$$

atau:

$$Q_{pendam\ ,a} = \left(H_{,wap\ ,a} - H_{,cecair\ ,a}\right)\left(\mathcal{N}_{\text{air (g)/H2,a,masuk}} + \mathcal{N}_{\text{air (g)diffusi}} - \mathcal{N}_{\text{air (g)eod}}\right) \quad (8\text{-}37)$$

b. nilai haba pada sisi katod

Nilai haba deria $q_{,deria\ K}$ pada sisi katod PEMFC ialah :

$$q_{,deria\ K} = \left[\mathcal{N}_{O_2,k,kel}\ C_{p,O_2}\left(T_{K,kel} - T_{ref}\right) - \mathcal{N}_{O_2,masuk}\ C_{p,O_2}\left(T_{K,masuk} - T_{ref}\right)\right] + \left[\mathcal{N}_{N_2,k,kel}\ C_{p,N_2}\left(T_{K,kel} - T_{ref}\right) - \mathcal{N}_{N_2,masuk}\ C_{p,N_2}\left(T_{K,masuk} - T_{ref}\right)\right] + \left[\mathcal{N}_{H_{2O(g)},a,kel}\ C_{p,H_2O}\left(T_{a,kel} - T_{ref}\right) - \mathcal{N}_{H_2O\ (g),a,masuk}\ C_{p,H_2O}\left(T_{a,masuk} - T_{ref}\right)\right] \quad (8\text{-}38)$$

Persamaan 8-38 boleh disederhanakan menjadi:

$$q_{,deria\ K} = \left[\left(\mathcal{N}_{O_2,k,kel}\,C_{p,O_2} + \mathcal{N}_{N_2,k,kel}\ C_{p,N_2} + \mathcal{N}_{H_{2O(g)},a,kel}\ C_{p,H_2O}\right)\left(T_{K,kel} - T_{ref}\right)\right] - \left[\left(\mathcal{N}_{O_2,masuk}\ C_{p,O_2} + \mathcal{N}_{N_2,masuk}\ C_{p,N_2} + \mathcal{N}_{H_2O\ (g),a,masuk}\ C_{p,H_2O}\right)\left(T_{K,masuk} - T_{ref}\right)\right] \quad (8\text{-}39)$$

Nilai haba pendam pada sisi katod $\left(Q_{pendam\ ,k}\right)$ PEMFC ialah:

$$Q_{pendam\ ,k} = \left(H_{,wap\ ,k} - H_{,cecair\ ,k}\right)\mathrm{d}\mathcal{N}_{air\ ,k} \quad (8\text{-}40)$$

atau:

$$Q_{pendam\ ,a} = \left(H_{,wap\ ,k} - H_{,cecair\ ,k}\right)\left(\mathcal{N}_{\text{air (g)/udara ,k,masuk}} + \mathcal{N}_{\text{air (g)tindak balas}} + \mathcal{N}_{\text{air (g)eod}} - \mathcal{N}_{\text{air (g)diffusi}}\right) \quad (8\text{-}41)$$

c. Nilai haba air penyejuk

Nilai haba deria air penyejuk $q_{,deria\ air\ penyejuk}$ yang digunakan pada sistem PEMFC ialah:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$q_{,deria\ \ air\ \ penyejuk} = \mathcal{N}_{air\ ,kel}\, C_{p,H_2O}\left(T_{kel} - T_{ref}\right) - \mathcal{N}_{air\ ,masuk}\, C_{p,H_2O}\left(T_{masuk} - T_{ref}\right) \quad (8\text{-}42)$$

Berdasarkan nilai haba yang dibuat di atas, maka total imbangan haba yang terdapat pada PEMFC ialah :

$$q_{deria} = q_{deria\ ,a} + q_{deria\ ,k} + q_{deria\ ,air\ \ penyejuk} \quad (8\text{-}43)$$

$$q_{pendam} = q_{pendam\ ,a} + q_{pendam\ ,k} \quad (8\text{-}44)$$

8.4 IMBANGAN HABA PADA PELEMBAPAN MEMBRAN

Imbangan haba pada sistem pelembapan membran pada MH I dan MH II secara amnya mempunyai kaedah yang sama, tetapi dibezakan atas komponen yang mengalir pada masing-masing sisi pelembapan membran.

Rajah 8.4 menunjukkan mekanisme haba pada pelembapan membran. Nilai q1 masuk merupakan huraian jumlah haba gas kering dan sejuk yang mengalir masuk ke dalam sisi A pelembap membran. Nilai q1 keluar merupakan jumlah haba gas dilembapkan dan panas yang mengalir keluar dari sisi A pelembapan membran. Nilai q2 masuk merupakan jumlah haba wap air (gas lembap) dan panas yang mengalir masuk ke dalam sisi B pelembapan membran. Nilai q2 keluar merupakan jumlah wap air (gas lembap) dan sejuk yang mengalir keluar dari sisi B pelembapan membran.

Persamaan imbangan haba yang terdapat pada Rajah 8.4 seperti berikut:

$$\left(q_{1,masuk} + q_{2,masuk}\right) - \left(q_{1,keluar} + q_{2,keluar}\right) + q_{diffusi} = 0 \quad (8\text{-}45)$$

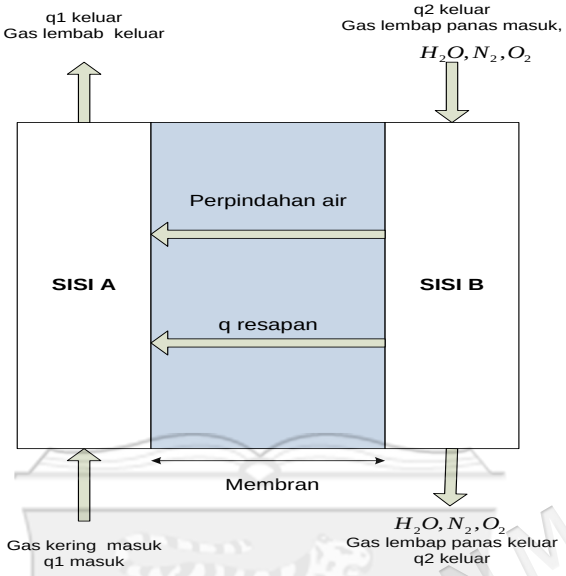
a. Keseimbangan haba pada MH 1

Komponen yang terdapat pada MH I adalah sebagai berikut:

- Komponen 1 masuk: $H_{2(g)}$ dan $H_2O(g)$
- Komponen 1 keluar : $H_2(g)$ dan $H_2O(g)$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

- Komponen 2 masuk: $H_2O(g)$, N_2,(g) dan $O_{2(g)}$
- Komponen 2 keluar: $H_2O(g)$, N_2,(g) dan $O_{2(g)}$



Rajah 8.4 Imbangan haba pada pelembap membran

Jumlah haba pada masing-masing komponen pada MH I adalah sebagai berikut:

$$q_{1,masuk\ \ A\ MHI} = \mathcal{N}_{H_2}\mathrm{Cp}_{H_2}\left(\mathrm{T}_{1,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathcal{N}_{H_2O}\mathrm{Cp}_{H_2O(g)}\left(\mathrm{T}_{1,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right)$$

$$q_{1,masuk\ \ A\ MH\ I} = \left(\mathcal{N}_{H_2}\mathrm{Cp}_{H_2} + \mathcal{N}_{H_2O}\mathrm{Cp}_{H_2O(g)}\right)\left(\mathrm{T}_{1,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) \quad (8\text{-}46)$$

$$q_{2,masuk\ \ B\ MH\ I} = \mathcal{N}_{H_2O}\mathrm{Cp}_{H_2O(g)}\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathcal{N}_{N_2}\mathrm{Cp}_{N_2}\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathcal{N}_{O_2}\mathrm{Cp}_{O_2}\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right)$$

$$q_{2,masuk\ \ B\ MH\ I} = \left(\mathcal{N}_{H_2O}\mathrm{Cp}_{H_2O\ (g)} + \mathcal{N}_{N_2}\mathrm{Cp}_{N_2} + \mathcal{N}_{O_2}\mathrm{Cp}_{O_2}\right)\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{masuk}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) \quad (8\text{-}47)$$

$$q_{1,keluar\ \ A\ MH\ I} = \mathcal{N}_{H_2}\mathrm{Cp}_{H_2}\left(\mathrm{T}_{1,\mathrm{keluar}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathcal{N}_{H_2O(g)}\mathrm{Cp}_{H_2O}\left(\mathrm{T}_{1,\mathrm{keluar}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right)$$

$$q_{1,keluar\ \ A\ MH\ I} = \left(\mathcal{N}_{H_2}\mathrm{Cp}_{H_2} + \mathcal{N}_{H_2O(g)}\mathrm{Cp}_{H_2O}\right)\left(\mathrm{T}_{1,\mathrm{keluar}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) \quad (8\text{-}48)$$

$$q_{2,keluar\ \ B\ MH\ I} = \mathcal{N}_{H_2O}\mathrm{Cp}_{H_2O(g)}\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{keluar}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathcal{N}_{N_2}\mathrm{Cp}_{N_2}\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{keluar}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathcal{N}_{O_2}\mathrm{Cp}_{O_2}\left(\mathrm{T}_{2,\mathrm{keluar}} - \mathrm{T}_{\mathrm{ref}}\right)$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$q_{2,keluar\ \ B\ MH\ I} = \left(\mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O\ (g)} + \mathcal{N}_{N_2}Cp_{N_2} + \mathcal{N}_{O_2}Cp_{O_2}\right)\left(T_{2,keluar} - T_{ref}\right) \quad (8\text{-}49)$$

b. Keseimbangan haba pada MH 1I

Komponen yang terdapat pada MH I adalah sebagai berikut:

- Komponen 1 masuk: udara
- Komponen 1 keluar : udara dan $H_2O(g)$
- Komponen 2 masuk: $H_2O(g)$, N_2,(g) dan $O_{2(g)}$
- Komponen 2 keluar: $H_2O(g)$, N_2,(g) dan $O_{2(g)}$

Jumlah haba pada masing-masing komponen pada MH II adalah sebagai berikut:

$$q_{1,masuk\ \ A\ MH\ II} = \mathcal{N}_{udara}Cp_{udara}\left(T_{1,masuk} - T_{ref}\right) \quad (8\text{-}50)$$

$$q_{1,keluar\ \ A\ MH\ II} = \mathcal{N}_{udara}Cp_{udara}\left(T_{1,keluar} - T_{ref}\right) + \mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O(g)}\left(T_{1,keluar} - T_{ref}\right)$$

$$q_{1,keluar\ \ A\ MH\ II} = \left(\mathcal{N}_{udara}Cp_{udara} + \mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O(g)}\right)\left(T_{1,keluar} - T_{ref}\right) \quad (8\text{-}51)$$

$$q_{2,masuk\ \ B\ MH\ II} = \mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O(g)}\left(T_{2,masuk} - T_{ref}\right) + \mathcal{N}_{N_2}Cp_{N_2}\left(T_{2,masuk} - T_{ref}\right) + \mathcal{N}_{O_2}Cp_{O_2}\left(T_{2,masuk} - T_{ref}\right)$$

$$q_{2,masuk\ \ B\ MH\ II} = \left(\mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O\ (g)} + \mathcal{N}_{N_2}Cp_{N_2} + \mathcal{N}_{O_2}Cp_{O_2}\right)\left(T_{2,masuk} - T_{ref}\right) \quad (8\text{-}52)$$

$$q_{2,keluar\ \ B\ MH\ II} = \mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O(g)}\left(T_{2,keluar} - T_{ref}\right) + \mathcal{N}_{N_2}Cp_{N_2}\left(T_{2,keluar} - T_{ref}\right) + \mathcal{N}_{O_2}Cp_{O_2}\left(T_{2,keluar} - T_{ref}\right)$$

$$q_{2,keluar\ \ B\ MH\ II} = \left(\mathcal{N}_{H_2O}Cp_{H_2O\ (g)} + \mathcal{N}_{N_2}Cp_{N_2} + \mathcal{N}_{O_2}Cp_{O_2}\right)\left(T_{2,keluar} - T_{ref}\right) \quad (8\text{-}53)$$

Resapan air di membran diandaikan dalam fasa wap , maka jumlah haba resapan wap air pada MH I dan MH II ialah:

$$q_{resapan} = UA\Delta T_{lmtd} \quad (8\text{-}54)$$

Laju air masuk diandaikan berlawanan arah (*counter current*), maka nilai ΔT_{lmtd} ialah:

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (8\text{-}55)$$

8.4 TEKNOLOGI JEPITAN

8.5.1 Asas Teknologi Jepitan

Penggunaan tenaga dalam industri proses boleh dikurangi oleh penukar sistematik tenaga antara aliran panas dan sejuk yang menggunakan alat penukar haba yang saling berkaitan, disebut sebagai rangkaian penukar haba. Peranti asas yang digunakan pada teknologi jepitan ialah lengkung komposit (CC) dan lengkung komposit besar (GCC). Kedua asas tersebut menujukan hubungan antara entalpi berbanding suhu. Sedangkan sasaran lengkung komposit dan lengkung komposit besar melibatkan haba dan kuasa (Feng & Zhu 1997).

Teknologi jepitan merupakan suatu kaedah yang menggunakan prinsip termodinamik untuk mengurangi penggunaan tenaga keseluruhan suatu proses. Teknologi jepitan merupakan kaedah yang digunakan untuk meminimumkan penggunaan tenaga pada proses kimia dengan mengira sasaran tenaga berdasarkan prinsip perhitungan termodinamik. Sasaran tenaga ialah penggunaan tenaga minimum dan boleh dicapai dengan cara mengoptimumkan sistem pemulihan haba, kaedah pembekalan tenaga, dan keadaan operasi proses. Teknologi jepitan berguna untuk merancang dan mengembangkan rangkaian alat penukar haba pada loji kimia, dengan menyepadukan aliran haba sebagai sumber haba dengan aliran sejuk sebagai penyerap haba (Staine & Favrat 1996; Salama 2006).

Hasil yang ingin dicapai dengan menggunakan teknologi jepitan ialah penggunaan haba yang maksimum atau penggunaan minimum tenaga di dalam aliran proses. Hasil teknologi jepitan mulai diaplikasikan di dalam industri pada tahun 1980-an oleh Linnhoff. Awal analisis jepitan mengetahui imbangan jisim dan haba pada suatu proses, sehingga boleh ditentukan sasaran untuk penjimatan tenaga reka bentuk pada rangkaian penukar haba (Escobar & Trierweiler 2013). Rangkaian penukar haba merupakan faktor utama dalam melakukan reka bentuk proses kimia. Secara amnya 20

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

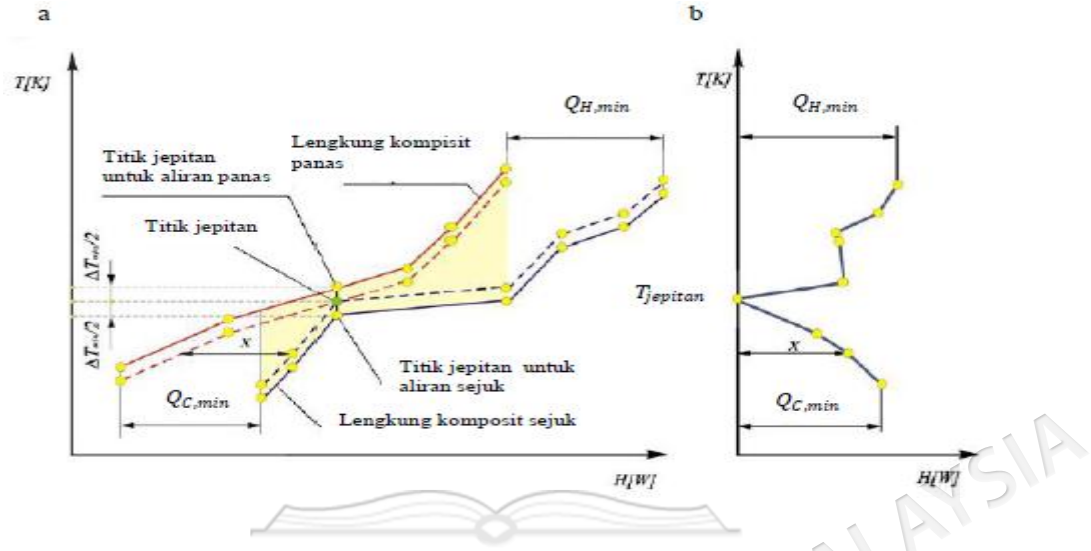
% hingga 30% penyimpanan tenaga yang tergabung dalam hal penjimatan modal boleh diperbaiki dengan melakukan reka bentuk rangkaian penukar haba (Linnhoff 1983).
Reka bentuk menggunakan teknik jepitan ini mampu untuk menentukan sasaran tenaga yang dituju iaitu tenaga minimum yang seharusnya diperlukan pada proses suatu rangkaian alat penukar haba. Alat bantu yang digunakan untuk melakukan perhitungan menggunakan teknologi jepitan ialah grid gambarajah, jadual masalah, lengkung komposit, dan lengkung komposit utiliti besar (GLavict 1996; Ebrahim & Kawari 2000). Teknologi jepitan merupakan kaedah rangkaian penukar haba bergraf berasaskan pada hukum pertama termodinamik dan beberapa kekangan berasal dari hukum kedua termodinamik. Hukum pertama termodinamik adalah berkenaan dengan keseimbangan tenaga dan hukum kedua memastikan perbezaan suhu positif antara aliran panas dan aliran sejuk pada kes penukar haba (Rašković & Stoiljković 2009).

Beberapa penyelidikan menggunakan teknologi jepitan telah dilakukan pada sistem sel fuel. (Oliva et al. 2011) melakukan penyelidikan untuk memaksimumkan pemulihan tenaga dari aliran proses PEMFC pada pelbagai aliran penukar haba sehingga menyebabkan kecekapan maksimum boleh dicapai. (Wallmark & Alvfors 2002) melakukan penyelidikan tentang kecekapan haba dan kuasa sistem PEMFC. Kaedah utama untuk mewujudkan sistem konfigurasi sel fuel adalah teknologi jepitan. Pada kajian ini, teknologi jepitan digunakan secara meluas di dalam sistem sel fuel tetapi hanya sistem yang menggunakan hidrogen sebagai bahan api yang mengkaji tentang rangkaian reka bentuk perpindahan haba terhadap kecekapan sistem.

8.5.1 Prinsip Reka bentuk Jepitan

Untuk menganalisis jepitan pada suatu peralatan sistem PEMFC, terdapat data utama yang boleh menjadi acuan iaitu data daripada carta aliran yang menunjukkan gambaran secara keseluruhan. Samping daripada itu, terdapat juga data yang diperoleh daripada imbangan jisim dan haba proses reka bentuk sistem PEMFC. Hasil yang diperoleh ialah berupa data-data haba yang menunjukkan data rangkaian penukar haba untuk memperoleh sasaran keperluan tenaga minimum yang ditunjukkan oleh lengkung komposit. Pada lengkung komposit terdapat aliran haba dan pada keadaan ini berlaku

pelepasan haba dan juga terdapat aliran sejuk yang memerlukan haba. Huraian tentang lengkung komposit dan lengkung komposit besar ditunjukkan oleh Rajah 8.5 berikut;



Rajah 8.5 Gambarajah (a) Lengkung komposit dan (b) Lengkung komposit besar (Rašković & Stoiljković 2009)

Langkah awal dalam membina gamba rajah jepitan, iaitu memperoleh lengkung komposit yang diwakili oleh lengkung komposit panas dan dingin di dalam sistem tenaga. Tahapan yang dilakukan terdiri daripada: pertama satu set aliran proses panas. Aliran ini didinginkan oleh suhu bekalan kepada suhu sasaran dengan mengenali kadar aliran, kapasiti haba, dan pekali pemindahan haba. Kedua, satu set aliran sejuk. Aliran ini dipanaskan oleh suhu bekalan kepada suhu sasaran dengan mengenali kadar alir, kapasiti haba dan pekali pemindahan haba. Selanjutnya menyediakan utiliti merupakan sumber luaran tenaga haba (Rašković & Stoiljković 2009):

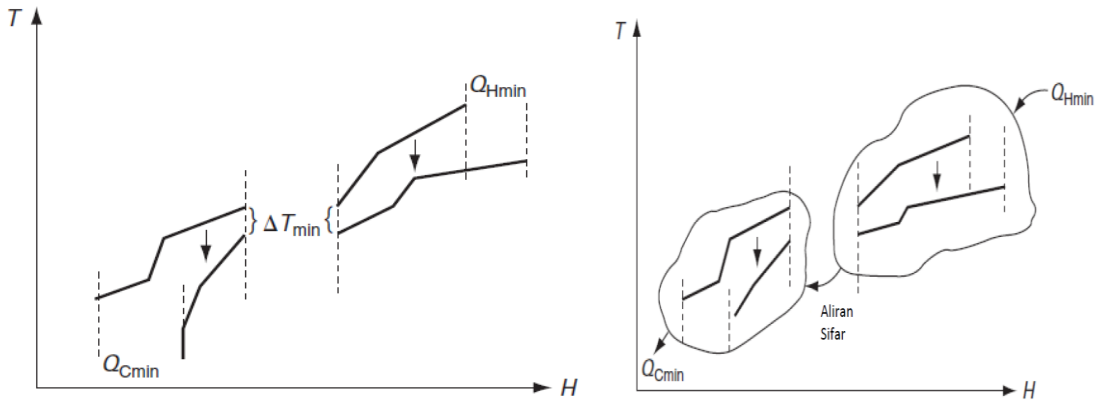
Terdapat beberapa kaedah penting tentang penggunaan teknologi jepitan, seperti berikut (Wallmark & Alvfors 2002):

1. Membuat reka bentuk rangkaian pada titik jepitan, dan membahagi menjadi bahagian atas dan bawah secara terpisah.
2. Pemindahan haba tidak boleh dilakukan merentasi jepitan
3. Tidak menggunakan pendingin luaran pada atas suhu jepitan atau pemanas luaran pada bawah jepitan
4. Mencuba mencocokkan aliran dengan kapasiti haba yang sama.
5. Abaikan aliran dengan kapasiti haba relatif kecil.

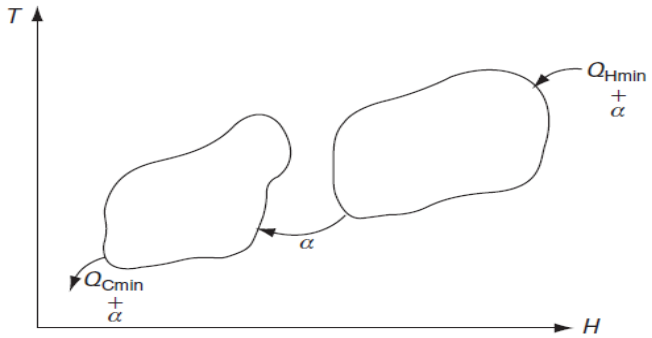
UNIVERSITI PENDIDIKAN SULTAN IDRIS MALAYSIA

Langkah awal dalam membina gambarajah jepitan ialah membentuk lengkung komposit yang terdiri daripada lengkung komposit panas dan dingin. Pembinaan terhadap lengkung komposit oleh (Salama 2006; Rašković & Stoiljković 2009) ditujukan Rajah 8.5. (1) Memplotkan semua aliran panas atau sejuk pada gambarajah T-H. dengan tata tanda paksi T (suhu) adalah mutlak dan paksi H (entalpi) adalah relatif. Pada kes lengkung komposit panas, aliran diplot dalam arah T-positif. Kes lengkung komposit sejuk diplot dalam arah negatif. Aliran yang dipindahkan sepanjang paksi H kedudukannya tidak boleh berlaku pertindihan terhadap perubahan entalpi. (2) Penentuan sempadan selang suhu yang ditandakan sebagai T_k , dimana K = 1,2 ....N.dengan melukis garis mendatar pada suhu bekalan dan sasaran bahagi setiap aliran. Dengan langkah ini, ruang termodinamik dibahagi kepada beberapa suhu selang. (3.) Melukis garisan baru di setiap selang dengan menggunakan linear tindihan perubahan entalpi aliran. Garis baru dibuat dalam setiap selang yang kemudian saling dalam satu garis yang disebut sebagai garis lengkung komposit. (4.) Menghilangkan garis asal proses aliran panas atau sejuk dan hanya terdapat gamba rajah lengkung komposit.

Aturan untuk mencapai sasaran tenaga minimum menggunakan teknologi jepitan (Kemp 2007; Rašković & Stoiljković 2009) adalah pemindahan haba tidak boleh merentasi jepitan, tidak menggunakan utiliti sejuk di atas jepitan dan tidak menggunakan utiliti panas di bawah jepitan. Pada asasnya teknologi jepitan terdiri daripada mengenal pasti sasaran keperluan tenaga minimum dengan menghitung kemungkinan pemulihan haba daripada aliran panas untuk memanaskan aliran sejuk. Selanjutnya melakukan sintesis rangkaian penukar haba yang menggunakan sasaran pemulihan haba. Sistem dibahagi menjadi dua area pada jepitan seperti Rajah 8.6.



(a) (b)



(c)

Rajah 8.6. Gambarajah menunjukkan prinsip jepitan (Kemp 2007)

Rajah 8.6a menunjukkan lengkung komposit untuk pelbagai masalah aliran yang dibedah siasat pada jepitan. Di atas jepitan atau kawasan di sebelah kanan, merupakan sebagai penenggelaman haba (*heat sink*) , yang mana haba akan mengalir ke dalamnya dari utiliti panas, tapi tidak ada haba yang mengalir keluar. Kawasan tersebut melibatkan penukar haba dan utiliti panas, tetapi tiada utiliti sejuk. Sebaliknya di bawah jepitan hanya penyejukan sahaja diperlukan dan kawasan tersebut merupakan sumber haba yang memerlukan penukar haba dan utiliti sejuk tetapi tiada utiliti panas. Rajah 8.6b.menunjukan bahawa haba Q_{Hmin} mengalir masuk merupakan masalah di atas jepitan manakala Q_{Cmin} mengalir keluar merupakan masalah di bawah jepitan. Samping daripada itu, aliran haba merentasi jepitan adalah sifar. Rajah 8.6c menunjukkan bahawa setiap reka bentuk rangkaian perpindahan haba sebesar $\propto$ unit dipindahkan daripada atas jepitan kepada bawah jepitan Untuk sistem di atas jepitan, utiliti panas minimum Q_{Hmin} telah kehilangan haba sebanyak $\propto$ unit ke sistem dibawah jepitan. Oleh itu, utiliti panas sebanyak $\propto$ unit perlu dibekalkan. Di bawah jepitan terdapat kelebihan haba, maka keperluan utiliti sejuk perlu ditambah sebanyak $\propto$ unit. Sebagai rumusan bahawa setiap utiliti sejuk sebesar $\propto$ unit di atas jepitan mesti menanggung utiliti panas tambahan sebesar $\propto$ unit.

Salah satu faktor penting berdasarkan keseluruhan tahapan dalam analisis jepitan dan juga merupakan menjadi kunci utama pada teknologi jepitan ialah lengkung komposit. Lengkung komposit berupa gamba rajah yang menunjukkan hubungan antara suhu (T) dengan entalpi (H). Hubungan ini juga dikenal dengan gamba rajah T-H. Lengkung komposit merupakan profil suatu aliran proses yang menunjukkan jumlah

haba dan penyejuk yang diperlukan suatu proses. Profil tersebut dinyatakan oleh lengkung komposit panas dan lengkung komposit sejuk yang terdapat pada gamba rajah yang sama. Lengkung komposit boleh meramal sasaran utiliti panas dan sejuk, arah perpindahan haba, dan menunjukkan pemulihan haba pada suatu proses (Fraser 2004; Martín & Mato 2008).

Untuk menggambarkan rangkaian penukar haba di dalam tatarajah proses boleh menggunakan tatarajah grid untuk menggambarkan rangkaian penukar haba. Rangkaian penukar haba terdiri daripada dua bahagian iaitu aliran panas dan aliran sejuk. Aliran panas merupakan aliran proses yang memerlukan penyejuk manakala aliran sejuk ialah aliran yang memerlukan haba. Aliran panas yang berada pada bahagian atas mengalir dari sebelah kiri ke sebelah kanan, manakala aliran sejuk mengalir dari sebelah kanan ke sebelah kiri. Tatarajah ini boleh meramalkan kemungkinan merentas cubitan yang memungkinkan berlakunya perpindahan haba daripada area di atas jepitan kepada area di bawah jepitan seperti yang ditunjukkan oleh Rajah 8.5.

Ada banyak bahagian tertentu untuk ekstrak data. Berikut ini adalah pedoman yang paling relevan, iaitu: tidak terdapat campuran suhu yang ekstrem, dan tidak meliputi aliran utiliti. (wap, gas serombong (*flue*), air penyejuk, refrigerant, udara penyejuk dan lainnya) dalam mengolah data kecuali terlibat langsung dalam proses atau tidak boleh diganti (Singh & Crosbie 2011).

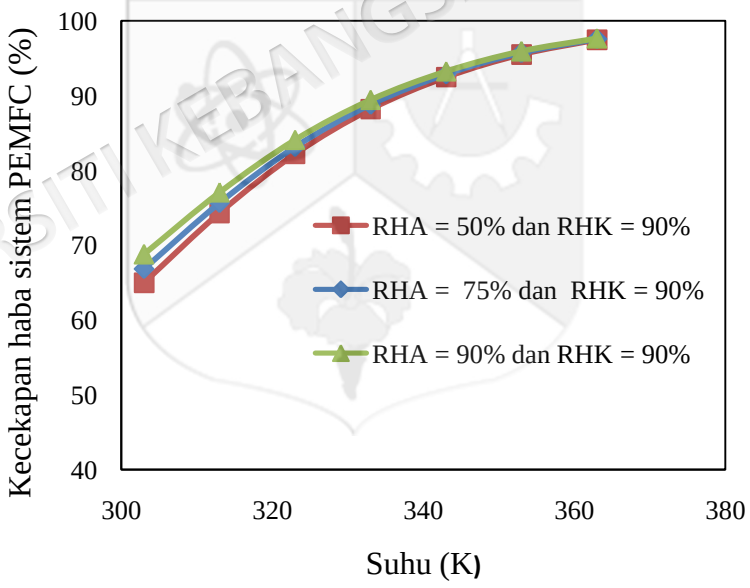
8.5 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

8.5.1 Imbangan Jisim dan Haba

Langkah sebelum melakukan analisis jepitan ialah menghitung imbangan jisim dan haba sistem PEMFC yang ditujukan oleh Rajah 8.1. Sedangkan nilai imbangan jisim yang terdapat pada masing-masing proses ditunjukan oleh Jadual 8.2. Keadaan operasi yang digunakan oleh proses ini berdasarkan prestasi PEMFC yang dihasilkan pada Bab V iaitu nilai RHA adalah 70%, nilai RHK adalah 90% , nisbah stoikiometri untuk hidrogen adalah 1.2 dan untuk oksigen adalah 2, tekanan di anod dan di katod adalah 1 atm, ketumpatan arus ialah 1.18 A cm^{-2} dan suhu operasi yang digunakan 363 K.

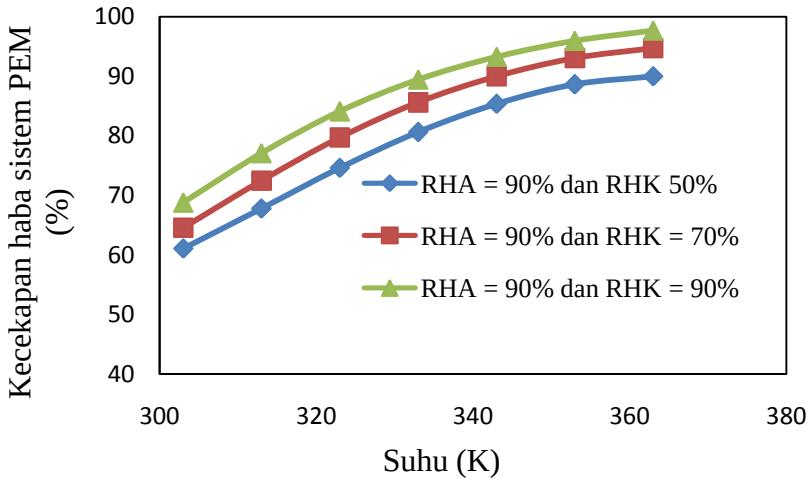
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Berdasarkan proses simulasi menggunakan perisian Simulink Matlab pada lampiran B, pada keadaan suhu ini jumlah wap air yang dihasilkan oleh katod mencukupi untuk digunakan melembapkan bahan tindak balas pada MH I dan MH II. Sedangkan untuk suhu di bawah 363 K wap air yang dihasilkan oleh katod PEMFC tidak mencukupi untuk digunakan pelembap bahan tindak balas di kedua pelembap tersebut. Pada keadaan ini terlihat daripada 100% mol wap air yang mengalir masuk katod , manakala 124% wap air keluar daripada katod (merupakan wap air baki tindak balas, hasil tindak balas dan perpindahan dari anod berbanding wap air masuk katod) untuk digunakan sebagai pelembap di MH I dan MH II. Untuk oksigen, daripada 100% mol masuk katod, manakala 60% dikeluarkan di katod. Pada sisi anod, daripada 100% mol wap air masuk ke dalam anod, manakala 33.4% berada dalam hidrogen untuk disuapkan lagi. Daripada 100% mol hidrogen masuk anod, manakala 33.39 % juga disuapkan lagi ke anod.



(a) RHK tetap 90%

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(b) RHA tetap 90%

Rajah 8.7. Kecekapan haba sistem PEMFC pada berbagai keadaan kelembapan relatif (a) nilai RHK tetap 90% dan (b) nilai RHA tetap 90%.

Rajah 8.7 menunjukkan kecekapan haba pada sistem PEMFC yang dilakukan pada perbezaan nilai kelembapan relatif manakala salah satu kelembapan relatifnya tetap. Rajah 8.7a menunjukkan kecekapan sistem dengan variasi nilai RHA daripada 50% hingga 90% sedangkan nilai RHK tetap 90%. Nilai kecekapan di bawah 323 K terdapat sedikit perbezaan, naiknya nilai RHA menyebabkan naiknya kecekapan. Untuk suhu di atas 323 K, perubahan nilai RHA menyebabkan berlakunya perbezaan nilai kecekapan sistem yang dihasilkan.

Rajah 8.7b menunjukkan nilai kecekapan pada perbezaan nilai RHK daripada 50% hingga 90%, sedangkan nilai RHA dijaga tetap pada 90%. Kenaikan nilai RHK menyebabkan kenaikan kecekapan sistem. Selanjutnya, kenaikan suhu juga menyebabkan berlakunya kenaikan kecekapan sistem PEMFC. Hasil kedua rajah yang ditunjukkan tersebut, terlihat bahawa kenaikan nilai RHK lebih berkesan daripada kenaikan nilai RHA terhadap kenaikan nilai kecekapan sistem PEMFC. Jadual 8.3 hingga Jadual 8.8 menunjukkan imbangan haba yang digunakan sebagai data untuk melakukan analisis jepitan bahagi pemulihan haba pada reka bentuk proses sistem PEMFC. Pada sistem terdapat dua aliran panas dan empat aliran sejuk, dan tenaga yang dihasilkan dihitung pada jadual masing-masingnya.

UNIVERSITI PENDIDIKAN SULTAN IDRIS MALAYSIA

Jadual 8.2 Imbangan jisim pada proses reka bentuk sistem PEMFC

	Aliran (mol/cm^2 s)								
Komponen	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
H_2	4.91E-06	7.37E-06		7.37E-06		2.46E-06		2.46E-06	
H_2O wap		2.29E-06		6.86E-06	4.77E-05	2.29E-06	5.92E-05	2.29E-06	
H_2O cecair						0	0		0
N_2			2.31E-05		2.31E-05		2.31E-05		
O_2			6.14E-06	1.42E-05	6.14E-06		3.68E-06		
Total	4.91E-06	9.65E-06	2.92E-05		7.69E-05	4.74E-06	8.6E-05	4.74E-06	0

	Aliran (mol/cm^2 s)							
Komponen	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
H_2								
H_2O wap	5.92E-05		5.92E-05	6.62E-05	6.17E-05	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06
H_2O cecair		0						
N_2	2.31E-05		2.31E-05	4.62E-05	4.62E-05	2.31E-05	2.31E-05	2.31E-05
O_2	3.68E-06		3.68E-06	7.37E-06	7.37E-06	3.68E-06	3.68E-06	3.68E-06
Total	8.6E-05	0	8.6E-05	0.00012	0.000115	3.38E-05	3.38E-05	3.379E-05

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.3 Imbangan haba pada aliran 10 (Pemanas I)

Aliran I	Masuk (mol/s)	Keluar (mol/s)	Q masuk	Q keluar	ΔQ (J/cm^2s)
N_2 kel katod	2.31012E-05	2.31012E-05	0.04598	0.04328	0.0027
O_2 kel Katod	3.6845E-06	3.6845E-06	0.007538	0.007097	0.000441
H_2O kel katod	5.92395E-05	5.92395E-05	1.39E-01	1.31E-01	8.10E-03
Total	8.60253E-05	8.60253E-05	1.92E-01	1.81E-01	1.1241E-02

Jadual 8.4 Imbangan haba pada aliran 2 (Penyejuk di MH 1)

Aliran II	Masuk (mol/s)	Keluar (mol/s)	Q masuk	Q keluar	ΔQ (J/cm^2s)
O_2 di B MH1	7.369E-06	7.369E-06	0.01508	0.01463	0.00045
N_2 di B MH1	4.62024E-05	4.62E-05	0.09195	0.08925	0.0027
H_2O di B MH1	6.62436E-05	6.16716E-05	1.55E-01	1.40E-01	0.0149
Total	0.000119815	0.000115243	2.62E-01	2.44E-01	0.01805

Jadual 8.5 Imbangan haba pada aliran 13 (Pemanas di MH 1)

Aliran III	Masuk (mol/s)	Keluar (mol/s)	Q masuk	Q keluar	ΔQ (J/cm^2s)
H_2 di A MH1	7.369E-06	7.369E-06	0.007349	0.01392	0.006571
H_2O di A MH1	2.28599E-06	6.86E-06	0.002662	0.01511	0.012448
Total	9.65499E-06	1.4227E-05	1.00E-02	2.90E-02	0.019019

Jadual 8.6 Imbangan haba pada aliran 3 (Penyejuk di MH 2)

Aliran IV	Masuk (mol/s)	Keluar (mol/s)	Q masuk	Q keluar	ΔQ (J/cm^2s)
O_2 di B MH2	7.369E-06	7.369E-06	0.01463	0.009471	0.005159
N_2 di B MH2	4.62024E-05	4.62E-05	0.08925	0.05757	0.03168
H_2O di B MH2	6.16716E-05	1.40081E-05	1.40E-01	2.06E-02	0.11949
Total	0.000115243	6.75796E-05	2.44E-01	8.77E-02	0.156329

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.7 Imbangan haba pada aliran 14 (Pemanas di MH 2)

Aliran V	Masuk (mol/s)	Keluar (mol/s)	Q masuk	Q keluar	ΔQ (J/cm^2s)
O_2 di A MH2	6.14E-06	6.14E-06	0.0009026	0.01183	0.0109274
N_2 di A MH2	2.31E-05	2.31E-05	0.002838	0.04328	0.040442
H_2O diA MH2		4.77E-05		0.105	0.105
Total	2.92E-05	7.69E-05	3.74E-03	0.16011	0.1563694

Jadual 8.8 Imbangan haba pada aliran 15 (Pemanas 2)

Aliran VI	masuk (mol/s)	Keluar (mol/s)	Q masuk	Q keluar	ΔQ (J/cm^2s)
O_2 kitar	0.000003684	0.000003684	0.004736	0.007538	0.002802
N2 kitar	0.0000231	2.31E-05	0.02878	0.04598	0.0172
H2O kitar	0.000007004	0.000007004	1.03E-02	1.64E-02	0.00609
Total	0.000033788	0.000033788	4.38E-02	6.99E-02	0.026092

8.6.2 Pengekstrakan Data

Kajian ini menggunakan data operasi seperti yang terdapat pada reka bentuk proses sistem PEMFC seperti yang ditunjukkan oleh Rajah 8.1. Langkah pertama sebelum dilakukan pengekstrakan data ialah menetapkan imbangan jisim dan imbangan haba terhadap proses. Pada kajian ini data tentang jisim dan haba dilakukan dengan menggunakan perisian Simulink Matlab.

Selepas haba dan imbangan jisim ditubuhkan, sasaran untuk penjimatan tenaga boleh ditetapkan sebelum reka bentuk rangkaian penukar haba. Pengekstrakan data berkaitan dengan pengekstrakan maklumat yang diperlukan untuk analisis jepitan dari imbangan jisim dan haba yang diberikan proses seperti ditunjukkan jadual 8.9 hingga 8.13. Aliran panas dan sejuk di dalam sistem dikenal pasti dengan suhu punca dan suhu

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

sasaran, yang mana masing-masing telah diketahui. Beban haba untuk masing-masing aliran boleh dikira berdasarkan persamaan berikut:

$$Q = F\ Cp\ \Delta T \tag{8-59}$$

Q ialah beban haba aliran (J/cm^{-2})
F ialah kadar alir (mol/s)
Cp ialah muatan haba tentu bagi setiap aliran (J/mol K)
ΔT ialah selisih suhu (K).

Pada Jadual 8.9 selisih suhu merupakan perbezaan suhu masuk dengan suhu keluar

$$\Delta T = T_{masuk} - T_{keluar} \tag{8-60}$$

dan pada Jadual 8.10 ialah beza suhu suapan dan suhu sasar.

$$\Delta T = T_S - T_T \tag{8-61}$$

Keperluan tenaga minimum dikira dengan menyelesaikan gamba rajah haba *cascade*. Model yang digunakan adalah berdasarkan takrif pembetulan suhu yang diperoleh dengan mengurangkan suhu awal dengan suhu sasaran aliran panas dengan $\frac{\Delta T_{min}}{2}$, dan peningkatan suhu aliran sejuk dengan $\frac{\Delta T_{min}}{2}$. Hubungan tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

Aliran panas, $T_{int,p} = T_{act} - \frac{\Delta T_{min}}{2}$ (8-62)

Aliran sejuk, $T_{int,s} = T_{act} + \frac{\Delta T_{min}}{2}$ (8-63)

T_{int} ialah suhu perantara dan T_{act} ialah suhu sebenarnya.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.9 Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 1

Proses	Aliran	Keadaan	Suhu masuk (K)	Suhu keluar (K)	FCP (J/ cm^2 s K)	ΔQ (J/cm^2 s)
Pemanas 1	Aliran I	Sejuk	363	367	0.00281025	0.011241
B MH1	Aliran II	panas	367	365	0.009025	0.01805
A MH1	Aliran III	Sejuk	331	363	0.000603778	0.019019
B MH2	Aliran IV	Panas	365	341.5	0.006652298	0.156329
A MH2	Aliran V	sejuk	303	363	0.002606157	0.1563694
Pemanas 2	Aliran VI	Sejuk	341.5	367	0.001023216	0.026092

Jadual 8.10 Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 2

Proses	Aliran	Keadaan	Suhu masuk (K)	Suhu keluar(K)	FCP (J/ cm^2 s K)	ΔQ (J/cm^2 s)
Pemanas 1	Aliran I	Sejuk	363	367	0.00281025	0.011241
B MH1	Aliran II	panas	367	364.5	0.006252	0.01563
A MH1	Aliran III	Sejuk	329	363	0.000426824	0.014512
B MH2	Aliran IV	Panas	364.5	342	0.006958622	0.156569
A MH2	Aliran V	sejuk	303	363	0.002606157	0.1563694
Pemanas 2	Aliran VI	Sejuk	342	367	0.00113428	0.028357

Jadual 8.11 Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 3

Proses	Aliran	Keadaan	Suhu masuk (K)	Suhu keluar (K)	FCP (J/ cm^2 s K)	ΔQ (J/ cm^2 s)
pemanas 1	Aliran I	Sejuk	363	367	0.00281025	0.011241
B MH1	Aliran II	panas	367	366	0.01047	0.01047
A MH1	Aliran III	Sejuk	329	363	0.000426441	0.014499
B MH2	Aliran IV	Panas	366	352	0.007934286	0.11108
A MH2	Aliran V	sejuk	303	363	0.001855657	0.1113394
Pemanas 2	Aliran VI	Sejuk	352.5	367	0.001789379	0.025946

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.12 Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 4

Proses	Aliran	Keadaan	Suhu masuk (K)	Suhu keluar (K)	FCP (J/ cm^2 s K)	ΔQ (J/ cm^2 s)
pemanas 1	Aliran I	Sejuk	363	367	0.00281025	0.011241
B MH1	Aliran II	panas	367	365	0.007625	0.01525
A MH1	Aliran III	Sejuk	330	363	0.000422182	0.013932
B MH2	Aliran IV	Panas	365	354	0.007577273	0.08335
A MH2	Aliran V	sejuk	303	363	0.001420157	0.0852094
Pemanas 3	Aliran VI	Sejuk	354	367	0.002203923	0.028651

Jadual 8.13 Data haba yang diperlukan untuk analisis jepitan untuk keadaan 5

Proses	Aliran	Keadaan	Suhu masuk(K)	Suhu keluar (K)	FCP (J/ cm^2 s K)	ΔQ (J/ cm^2 s)
pemanas 1	Aliran I	Sejuk	353	360	0.00158	0.01106
B MH1	Aliran II	panas	360	357	0.00338	0.01014
A MH1	Aliran III	Sejuk	322.7	353	0.00031077	0.0094163
B MH2	Aliran IV	Panas	357	332.5	0.003553	0.087057
A MH2	Aliran V	sejuk	303	353	0.001639	0.0819644
Pemanas 3	Aliran VI	Sejuk	332.5	360	0.00081	0.016255

Keterangan:

Keadaan 1: 70% RHA, 90% RHK dan suhu 363 K

Keadaan 2 50% RHA, 90% RHK dan suhu 363 K

Keadaan 3: 50% RHA, 70% RHK dan suhu 363 K

Keadaan 4: 50% RHA dan RHK dan suhu 363 K

Keadaan 5: 70% RHA, 90% RHK dan suhu 353 K

Langkah selanjutnya membuat membuat lengkung komposit untuk menetukan nilai suhu jepitan, jumlah haba untuk penyejukan dan haba untuk pemanasan

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

mengunakan perisian teknik jepitan atas talian yang dibuat oleh Jeffrey S. Umbach. Hasil yang diperoleh iaitu ditujukan oleh jadual 8.14.

Jadual 8.14 Hasil analisis jepitan pada berbagai keadaan operasi

Parameter	**Keadaan 1**	**Keadaan 2**	**Keadaan 3**	**Keadaan 4**	**Keadaan 5**
ΔT min	10	10	10	10	10
Suhu Jepitan (K)	367	367	367	367	313
Penyejuk minimum ($J/ cm^2 s$)	0.0023341	0.00250164	0.00153234	0.0039312	0
Pemanas minimum ($J/ cm^2 s$)	0.040677	0.04078264	0.04280834	0.0443352	0.02738

Jadual 8.14 menunjukan bahawa beza suhu yang digunakan untuk semua keadaan ialah 10. Keadaan 1 hingga 4 titik jepitan yang diperoleh ialah 367 K, sedangkan pada keadaan 5 titik jepitan yang diperoleh ialah 360 K. Pada keadaan operasi yang sama tetapi bebeza suhu operasi menunjukan bahawa turunnya suhu operasi mengakibatkan turunnya suhu jepitan yang diperoleh. Sedangkan turunnya suhu operasi mengakibatkan turunnya jumlah haba minimum yang diperlukan oleh pemanas dan penyejuk. Hal ini ditunjukan oleh keadaan 1 berbanding keadaan 5. Selain itu, pada keadaan suhu operasi dan nilai RHK ialah sama , tetapi RHA berbeza menunjukan bahawa suhu jepitan yang diperoleh iaitu sama 367 K. Sedangkan keperluan jumlah haba minimum penyejuk dan pemanas menunjukan berlakunya peningkatan dengan berlakunya penurunan nilai RHA. Hal ini ditunjukan oleh keadaan 1 berbanding keadaan 2. Pada keadaana suhu operasi dan RHA ialah sama, tetapi berbeza nilai RHK menunjukan nilai jepitan yang diperoleh iaitu sama 367 K. Keperluan jumlah minimum haba pemanas menjadi naik dengan turunnya nilai RHK dan ditunjukan oleh keadaan 2 dan 3.Keperluan jumlah haba penyejuk turunnya dengan turunnya nilai RHK dari 90% kepada70%. Tetapi turunnya RHK dari 70% kepada 50% mengakibatkan berlakunya kenaikan nilai haba penyejuk minimum dan ditunjukan oleh keadaan 3 dan 4. Hal ini berlaku kerana jumlah penyejuk yang terdapat pada sistem

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

reka bentuk proses PEMFC yang dihasilkan memakin sedikit dengan turunnya RHK dari 70 ke 50% Akibatnya sistem pada RHK 50% memerlukan peningkatan jumlah haba utiliti sejuk minimum untuk menurunkan suhu aliran panas.

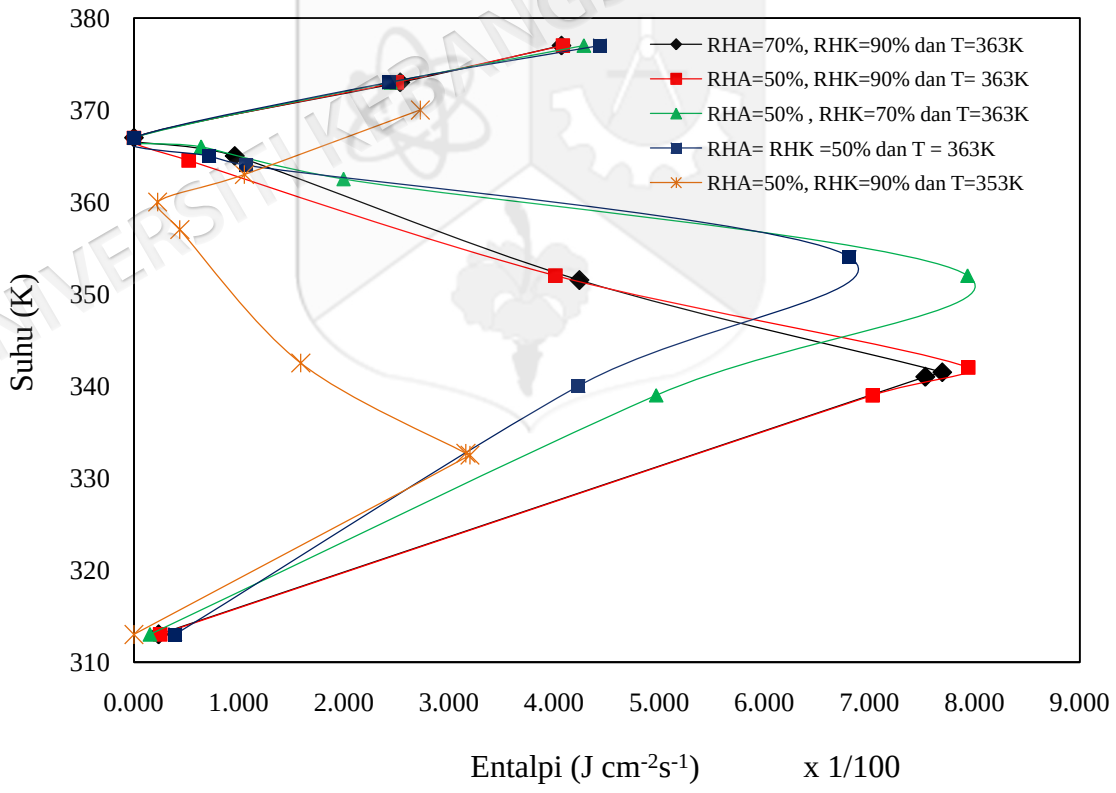
Penentuan jumlah haba pada aliran panas dan sejuk iaitu berupa sasaran utiliti dilakukan dengan membuat lengkung komposit besar yang ditunjukkan oleh Rajah 8.9. Pembentukan lengkung komposit besar dilakukan pelarasan terhadap suhu yang meliputi peningkatan suhu komposit sejuk sebesar $\frac{\Delta T_{min}}{2}$ dan mengurangkan suhu komposit sebesar $\frac{\Delta T_{min}}{2}$. Sistem proses ini menggunakan perbezaan suhu antara aliran panas dan aliran sejuk iaitu 10 K. Pada reka bentuk proses sistem PEMFC, perbezaan suhu minimum ΔT_{min} dikekalkan terhadap aliran proses. Sebagai data data lengkung komposit besar yang diperoleh iaitu berupa nilai suhu terhadap entalpi yang diubahsuai pada berbagai keadaan operasi ditunjukkan oleh Jadual 8.15. Proses dianggap tidak mengalami perubahan fasa dalam julat suhu yang dipertimbangkan untuk setiap aliran dan juga kapasiti haba ialah malar.

Jadual 8.15 Data lengkung komposit besar pada berbagai keadaan operasi terhadap nilai suhu dan entalpi yang diubahsuai

Keadaan 1		**Keadaan 2**		**Keadaan 3**		**Keadaan 4**		**Keadaan 5**	
Suhu (K)	**Entalpi J/ cm^{2}s**	**Suhu (K)**	**Entalpi J/ cm^{2}s**	**Suhu (K)**	**Entalpi J/ cm^{2}s**	**Suhu (K)**	**Entalpi J/ cm^{2}s**	**Suhu (K)**	**Entalpi J/ cm^{2}s**
313	0.00233	313	0.00250	313	0.00152	313	0.00393	313	0.0000
341	0.07531	339	0.07026	339	0.04970	340	0.04228	332.5	0.03197
341.5	0.07691	342	0.07936	352	0.07932	354	0.06807	332.7	0.03158
351.5	0.04239	352	0.04104	362.5	0.01993	364	0.01691	342.5	0.01587
365	0.00960	364.5	0.00522	366	0.00640	365	0.00715	357	0.00438
367	0.00000	367	0.00000	367	0.00000	367	0.00000	360	0.00224
373	0.0253	373	0.02500	373	0.02441	373	0.02428	363	0.01051
377	0.04068	377	0.04078	377	0.04281	377	0.04434	370	0.02724

Lengkung komposit besar diplot dengan menggunakan suhu perantara dan entalpi yang telah diubahsuai. Pada Jadual 8.15 juga menunjukkan nilai haba pada suhu yang tertinggi dan merupakan haba minimum yang dibekalkan ke utiliti panas, manakala nilai haba pada suhu terendah merupakan haba minimum yang disingkirkan daripada oleh utiliti sejuk.

Selanjutnya suhu yang menunjukkan haba mempunyai nilai sifar ialah merupakan suhu jepitan. Suhu yang dihasilkan untuk proses ini ialah 367 K untuk keadaan 1 hingga 4, sedangkan untuk keadaan 5 iaitu 313 K. Data suhu dan nilai haba yang diubahsuai tersebut digunakan untuk membuat gambarajah lengkung komposit besar. Lengkung komposit besar dibuat dengan memplot antara haba terhadap suhu yang ditunjukkan oleh Rajah 8.8. Rajah juga menunjukkan garis perantara yang bergerak ke bawah ke arah kiri, yang merupakan sebagai penenggelaman haba manakala garis ke bawah ke sebelah kanan merupakan garisan perantara yang bertindak sebagai haba sumber.



Rajah 8.8 Lengkung Komposit Besar.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

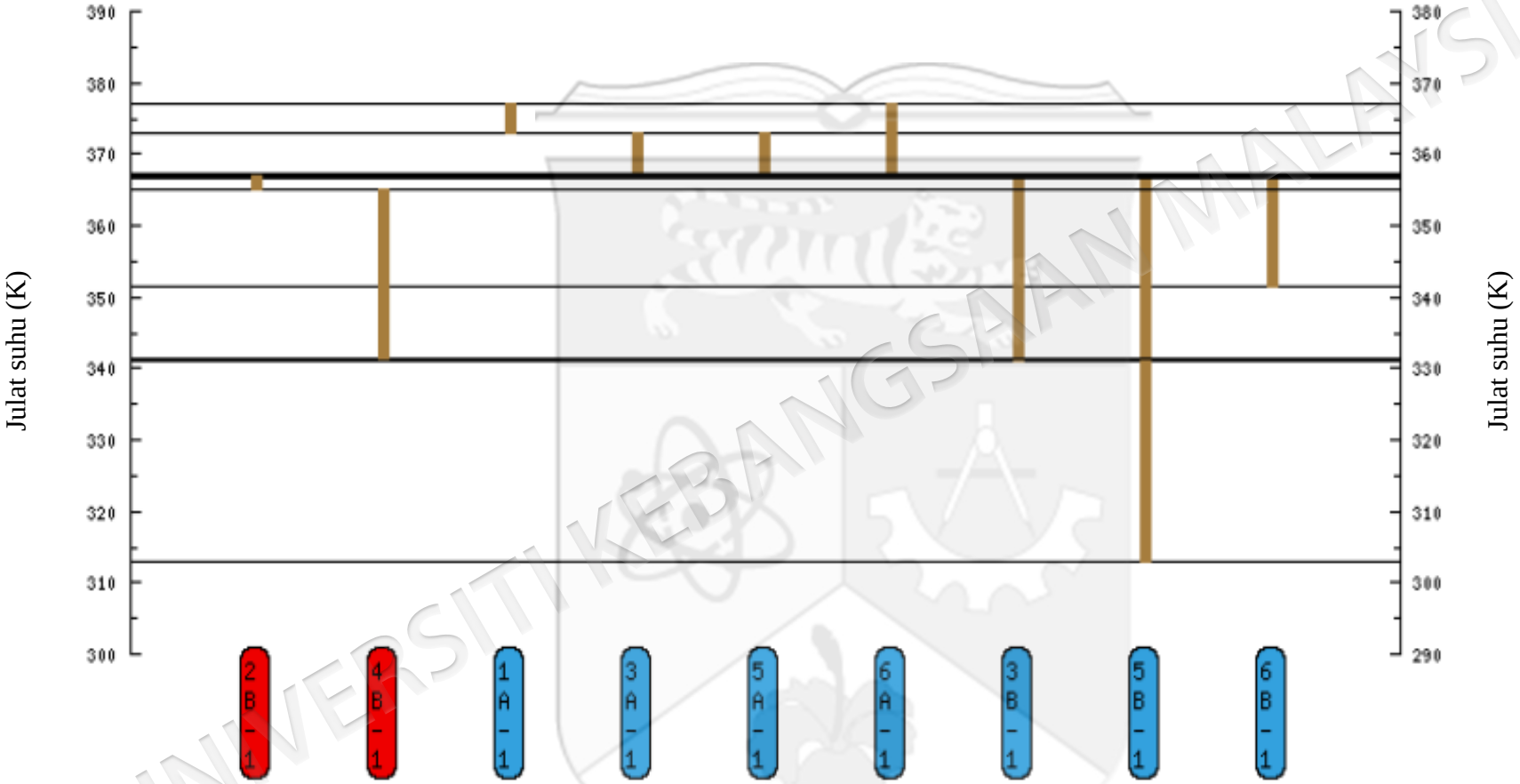
8.6.3 Rangkaian Penukar Haba pada Proses Reka bentuk PEMFC

Rangkaian penukar haba pada proses reka bentuk sistem PEMFC ini dibahagi menjadi dua bahagian iaitu keadaan di atas suhu jepitan dan di bawah suhu jepitan. Masalah yang terdapat pada aliran proses ini melibatkan 2 aliran panas dan 4 aliran sejuk seperti yang ditunjukkan oleh Rajah 8.9. Aliran panas menunjukkan bahawa suhu jepitan ialah 367 K, manakala aliran sejuk suhu jepitan ialah 357 K. Diantara dua aliran ini terdapat perbezaan suhu minimal sebesar 10 K.

Keadaan 1 hingga 4 menunjukan bahawa di atas jepitan tidak terdapat aliran pemanas tetapi terdapat sebanyak 4 aliran penyejuk iaitu pada aliran 1, 3,5 dan 6. Aliran 3,5 dan 6 merupakan aliran yang dijepit sedangkan aliran 1 bukan merupakan aliran jepitan. Di bawah jepitan terlihat bahawa aliran pemanas dan penyejuk. Aliran pemanas sebanyak 2 aliran, yang terdiri daripada aliran 2 yang merupakan aliran jepitan dan aliran 4 bukan aliran jepitan. Aliran penyejuk yang terdapat dibawah titik jepitan sebanyak 4 aliran, yang terdiri tiga aliran jepitan yang bersumber daripada aliran 3, 5 dan 6. Keadaan 5 memiliki 6 aliran diatas suhu jepitanyang terdiri daripada 2 aliran panas iaitu aliran 2 dan 4, 2 4 aliran penyejuk iaitu 1.3,5 dan 6. Aliran 5 merupakan aliran jepitan.

Jadual 8.16 hingga 8.25 menunjukkan jumlah beban haba masing-masing aliran pada setiap keadaan operasi. Samping itu, juga menunjukkan total keperluan jumlah utiliti panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu aliran sejuk dan total keperluan jumlah utiliti sejuk yang digunakan untuk menurunkan suhu aliran panas.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(a)

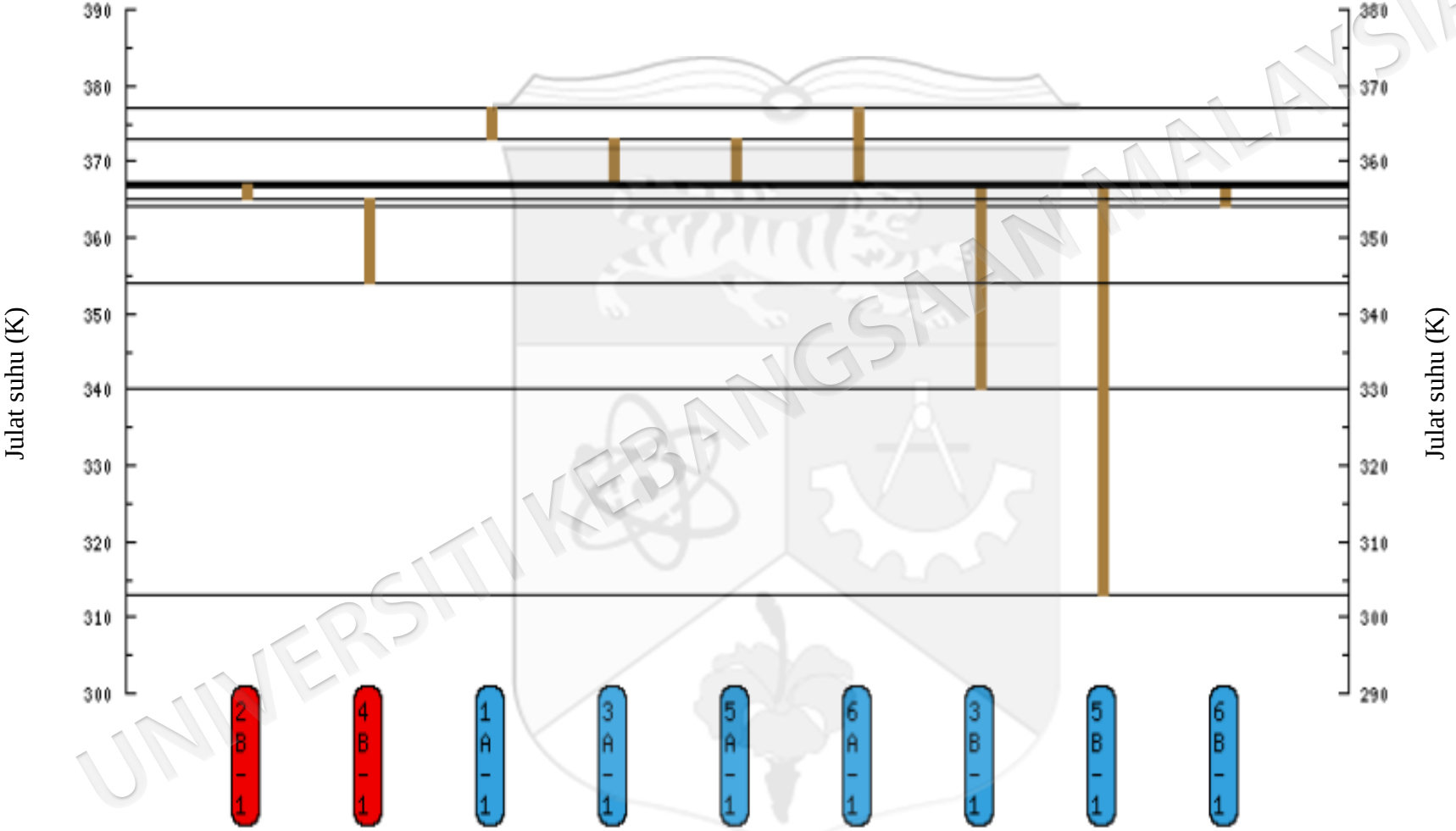
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

(b)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

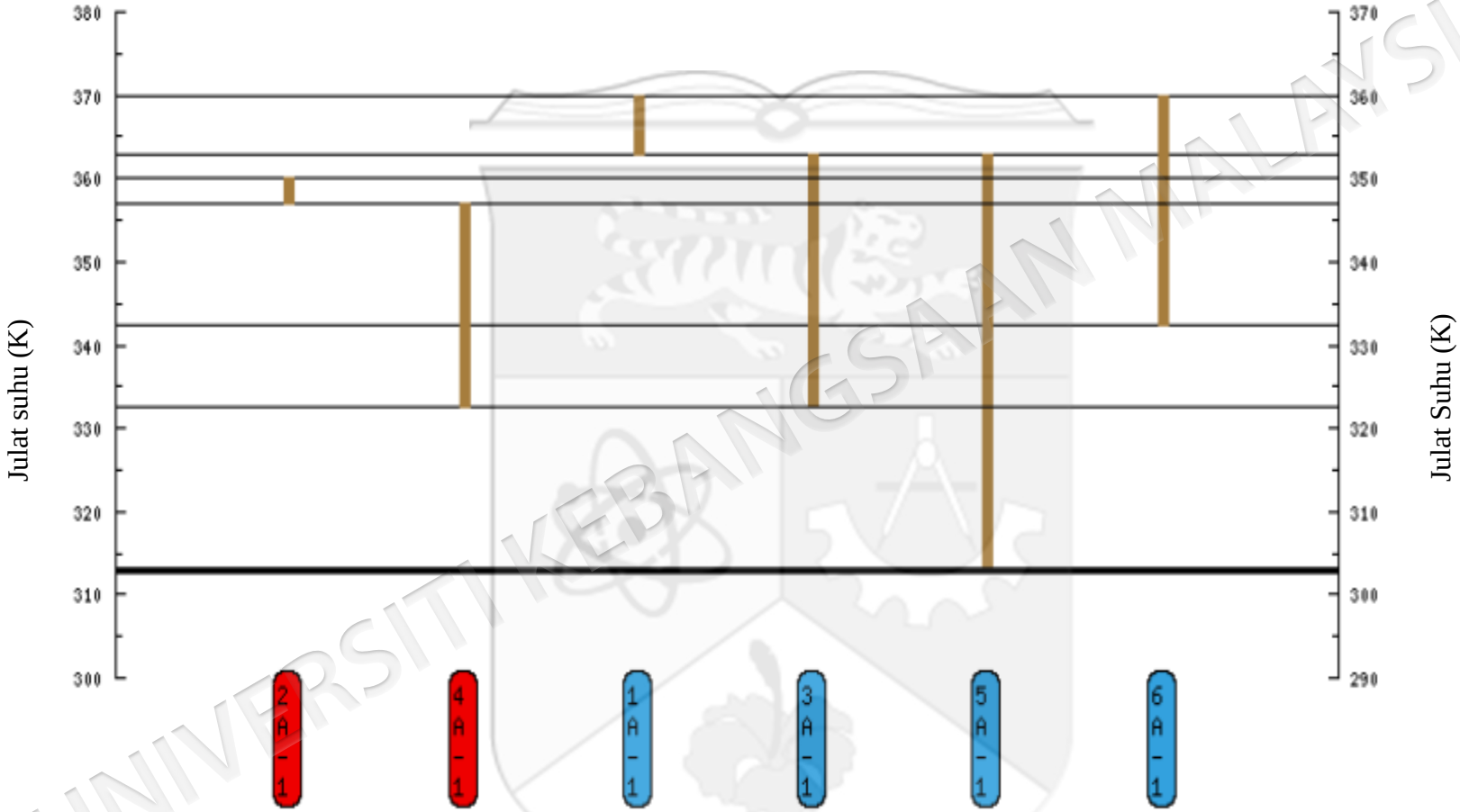
(c)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(d)

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



(e)

Rajah 8.9 Rangkaian penukar haba pada reka bentuk proses sistem PEMFC (a) Keadaan 1 (b) Keadaan 2 (c) Keadaan 3 (d) Keadaan 4 dan(e)Keadaan 5

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.16 Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 1

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
2B1	365	367	0.009025	0.018050
4B1	341.5	365	0.006652	0.156329
	Total utiliti sejuk yang diperlukan			0.174379
	Utiliti sejuk ideal yang diperlukan			0.174379

Jadual 8.17 Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 1

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
1A-1	363	367	0.002811	0.011242
3A-1	357	363	0.000594	0.003566
5A-1	357	363	0.002606	0.015637
6A-1	357	367	0.001023	0.0123216
3B-1	331	357	0.000594	0.015453
5B-1	303	357	0.002606	0.140732
6B-1	341.5	357	0.0010232	0.015860
	Total utiliti panas yang diperlukan			0.212722
	Utiliti panas ideal yang diperlukan			0.212772

Jadual 8.18 Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 2

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
2B1	364.5	367	0.006252	0.015630
4B1	342	364.5	0.006929	0.156569
	Total utiliti sejuk yang diperlukan			0.172199
	Utiliti sejuk ideal yang diperlukan			0.172199

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.19 Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 2

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
1A-1	363	367	0.002811	0.011242
3A-1	357	363	0.000427	0.002561
5A-1	357	363	0.002606	0.015637
6A-1	357	367	0.001134	0.011343
3B-1	329	357	0.000427	0.011951
5B-1	303	357	0.002606	0.140732
6B-1	342	357	0.001134	0.017014
	Total utiliti panas yang diperlukan			0.210480
	Utiliti panas ideal yang diperlukan			0.210480

Jadual 8.20 Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 3

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
1A-1	363	367	0.002811	0.011242
3A-1	357	363	0.000426	0.002559
5A-1	357	363	0.001852	0.011114
6A-1	357	367	0.001789	0.017894
3B-1	329	357	0.000426	0.011940
5B-1	303	357	0.001852	0.100025
6B-1	352.5	357	0.001789	0.008052
	Total utiliti panas yang diperlukan			0.162826
	Utiliti panas ideal yang diperlukan			0.162826

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.21 Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 3

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
2B1	366	367	0.010470	0.010470
4B1	352	366	0.007934	0.111080
	Total utiliti sejuk yang diperlukan			0.121550
	Utiliti sejuk ideal yang diperlukan			0.121550

Jadual 8.22 Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 4

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
2B1	365	367	0.007625	0.015250
4B1	354	365	0.007580	0.083380
	Total utiliti sejuk yang diperlukan			0.098630
	Utiliti sejuk ideal yang diperlukan			0.098630

Jadual 8.23 Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 4

Aliran	Suhu Min (K)	Suhu Maks (K)	Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)	Beban Haba (J/ cm^2 s)
1A-1	363	367	0.002811	0.011242
3A-1	357	363	0.000422	0.002533
5A-1	357	363	0.001420	0.008521
6A-1	357	367	0.002204	0.022039
3B-1	330	357	0.000422	0.011399
5B-1	303	357	0.001420	0.076688
6B-1	354	357	0.0022039	0.006118
	Total utiliti panas yang diperlukan			0.139034
	Utiliti panas ideal yang diperlukan			0.139034

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Jadual 8.24 Utiliti sejuk yang diperlukan pada keadaan 5

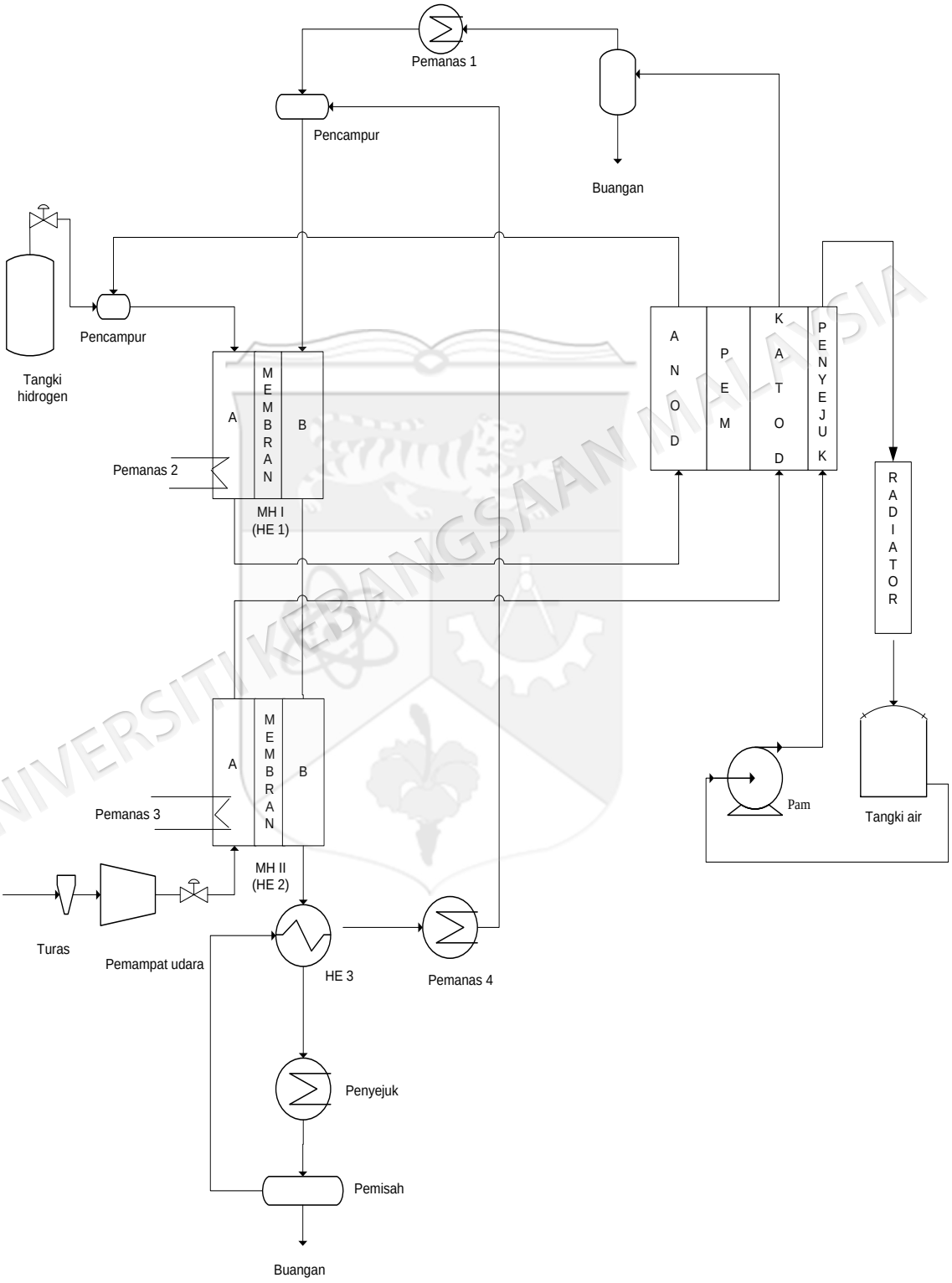
Aliran	**Suhu Min (K)**	**Suhu Maks (K)**	**Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)**	**Beban Haba (J/ cm^2 s)**
2A1	357	360	0.003467	0.010400
4A1	332.5	357	0.003553	0.087057
	Total utiliti sejuk yang diperlukan			0.097457
	Utiliti sejuk ideal yang diperlukan			0.097457

Jadual 8.25 Utiliti panas yang diperlukan pada keadaan 5

Aliran	**Suhu Min (K)**	**Suhu Maks (K)**	**Kapasiti Haba (J/ cm^2 s K)**	**Beban Haba (J/ cm^2 s)**
1A-1	353	360	0.001580	0.011060
3A-1	332.7	353	0.000311	0.009416
5A-1	303	353	0.001639	0.081964
6A-1	332.5	360	0.000809	0.022255
	Total utiliti panas yang diperlukan			0.124695
	Utiliti panas ideal yang diperlukan			0.124695

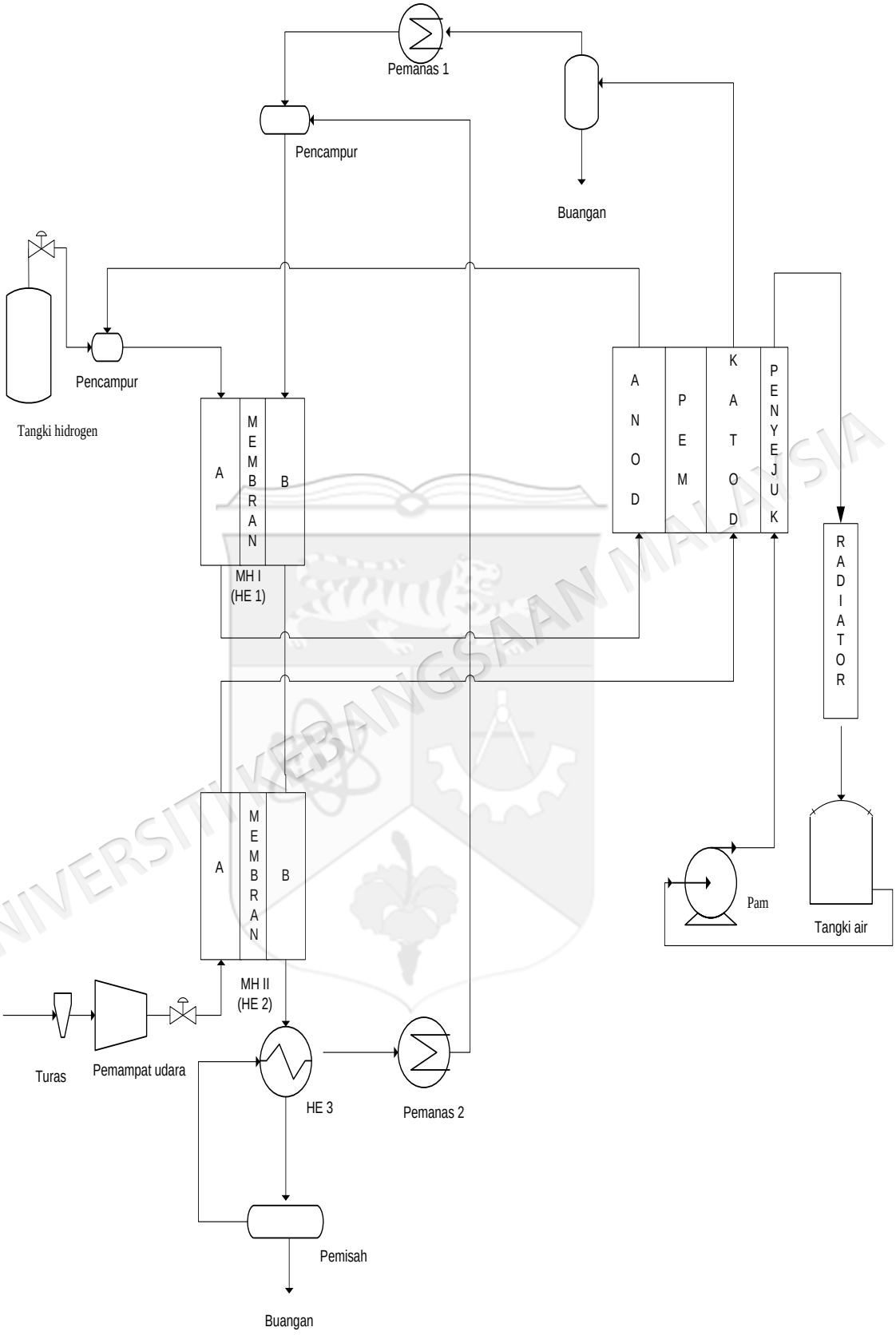
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Rangkaian penukar haba pada sistem reka bentuk proses PEMFC selepas penyepaduan haba ditunjukan oleh Rajah 8.10 berikut ini.



a. Keadaan 1 hingga 4

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



b. Keadaan 5

Rajah 8.10 Sistem reka bentuk proses PEMFC selepas penyepaduan haba

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Reka bentuk rangkaian penukar haba selepas penyepaduan haba boleh menunjukan jumlah penukar haba yang diperlukan untuk masing-masing keadaan proses yang digunakan. Perbandingan jumlah dan anggaran kos penukar haba untuk berbagai keadaan masing-masingnya dilihat pada Jadual 8.26.

Jadual 8.26 Jumlah penggunaan haba pada reka bentuk PEMFC

Nama alat	**Keadaan 1 hingga 4**		**Keadaan 5**	
	Jumlah	**Harga (RM)**	**Jumlah**	**Harga (RM)**
Penukar haba (HE) 1 dan 2 (cm^2)	2	2x2.24 = 4.48	2	2x2.24 = 4.48
Penukar haba (HE) 3 (cm^2)	1	14.2	1	14.2
Pemanas (watt)	4	4x3.24.=12.96	2	2x3.24=6.48
Penyejuk (watt)	1	1.4	0	0
Total	8	33.04	5	25.16

Jadual 8.26 menunjukan bahawa rangkaian penukar haba setelah penyepaduan haba untuk keadaan 1 hingga 4 adalah sama, dan berbeza dengan keadaan 5. Total alat penukar haba yang diperlukan untuk keadaan 1 hingga 4 sebanyak 8 buah sedangkan untuk keadaan 5 sebanyak 4 buah. Perbezaan tersebut terlihat bahawa keadaan 1 dan 4 memerlukan 3 buah pemanas sedangkan keadaan 5 memerlukan 1 pemanas. Berdasarkan Rajah 8.8 bahawa keadaan 5 memerlukan jumlah pemanas minimum lebih kecil berbanding keadaan 1 hingga 4. Akibatnya , sumber haba untuk keadaan 5 hanya pada satu alat pemanas sedangkan keadaan 1 hingga 4 bersumber daripada tiga alat pemanas. Perbezaan lainya adalah keadaan 1 hingga 4 meggunakan 1 penyejuk sedangkan keadaan 5 tidak memerlukan penyejuk. Rangkaian penukar haba setelah penyepaduan juga menunjukan kos pembelian alat penukar haba keadaan 1 hingga 4 lebih besar berbanding keadaan 5.

Perhitungan kos alat berdasar perbezaan saiz alat dan juga mengikuti pembelian mengikuti inflasi yang berlaku (Silva 2003). Kos alat berdasarkan perbezaan saiz peralatan dirumuskan sebagai berikut:

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^n \tag{8-64}$$

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

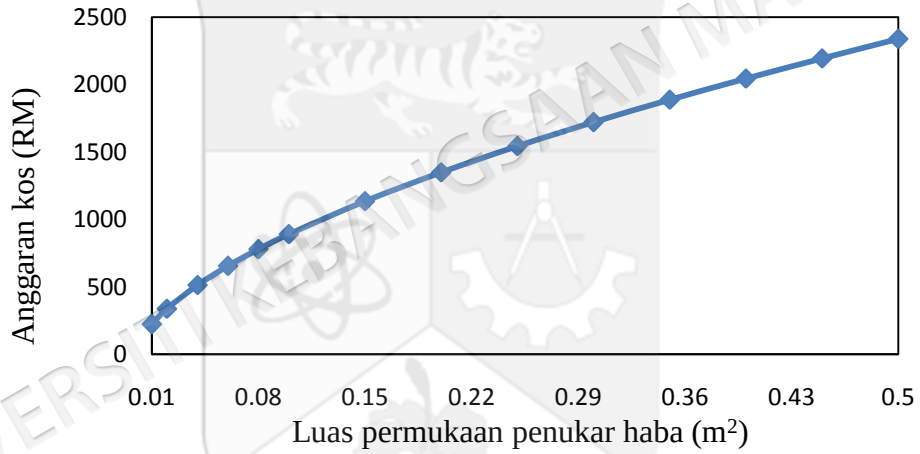
C_2 adalah utuk kos alat untuk saiz alat 2, C_1sebagai kos alat untuk saiz alat 1, Q_2 sebagai saiz alat 2, Q_1 sebagai saiz alat 1 dan n sebagai saiz eksponent (.Randal 2012).

Kos belian alat mengikuti perubahan inflasi adalah sebagai berikt:

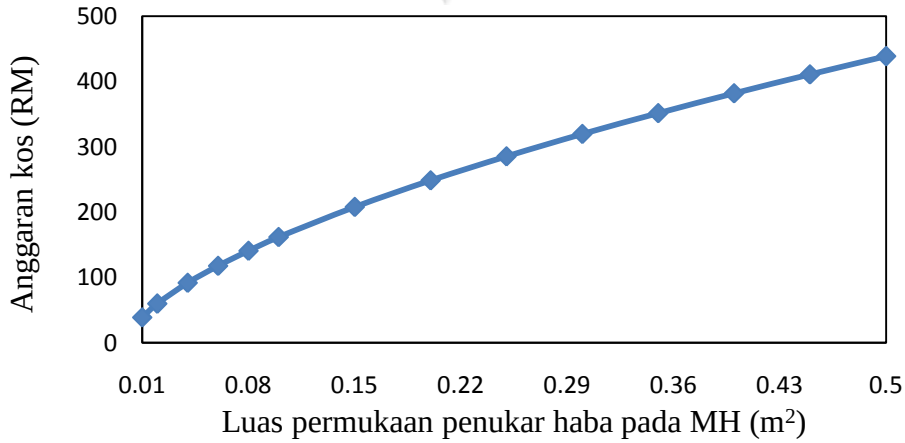
$$C_2 = C_1 \left(\frac{I_2}{I_1}\right) \tag{8-65}$$

I_2 adalah sebagai indeks kos pada masa 2 dan I_1 sebagai indeks kos pada masa 1. Penentuan kos alat berikut menggunakan indeks kos menurut indeks Marsal dan Swiff (Silva 2003)

Anggaran kos alat penukar haba untuk berbagai perbezaan kapasiti tahun 2013 ditunjukan oleh Rajah 8.11 hingga 8.14.

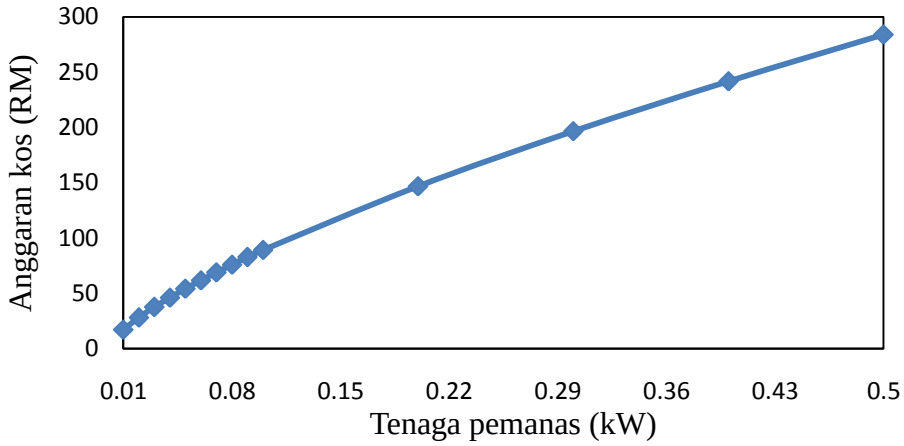


Gambar 811. Anggaran kos penukar haba

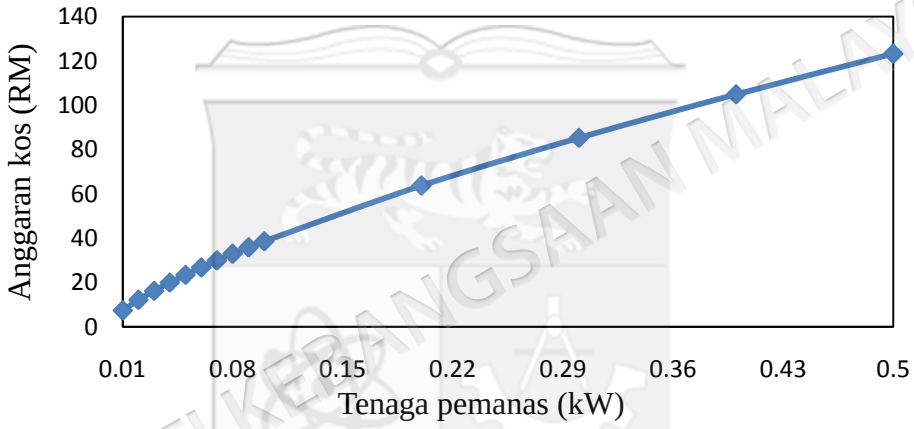


Gambar 812. Anggaran kos penukar haba pada MH

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA



Gambar 813. Anggaran kos penukar haba pada tenaga pemanas



Rajah 8.14. Anggaran kos penyejuk

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Selain itu juga menunjukkan peratus total pemulihan haba untuk tujuan pemanasan dan penyejukan pada aliran proses reka bentuk sistem PEMFC. Sebagai bandingan hasil kajian ini adalah dengan kajian (Cao & Guo 2002), Hwang et al. (2010) dan Neto et al. (2012) yang menunjukkan hasil yang setara. Total peratus pemulihan haba terdapat pada Jadual 8.27 yang menunjukan bahwa total pemulihan haba mempunyai nilai yang relatif sama pada keadaan operasi sama tetapi berbeza suhu operasi . Hal ini ditunjukan oleh keadaan 1 dengan 5. Jika keadaan operasi berbeza terhadap nilai RHA, hasil yang diperoleh menunjukan terjadinya penurunan total pemulihan haba jika berlaku penurunan RHA. Hal ini ditunjukan oleh keadaan 1 dan 2. Pada keadaan berbeza pada RHK, hasil yang didapat juga menunjukan berlakunya penurunan total pemulihan haba dengan turunya nilai RHK. Hal ini ditunjukan oleh keadaan 2,3 dan 4.

Jadual 8.27 Perbandingan total pemulihan haba dengan kajian lain

Penyelidikan	Sistem	Total Pemulihan Haba (%)
Kajian ini	Sistem PEMFC (hidrogen)	
	Keadaan 1	90%
	Keadaan 2	87%
	Keadaan 3	84%
	Keadaan 4	80%
	Keadaan 5	78%
Cao & Guo (2002)	Sistem PEMFC (methanol)	88%
Hwang et al.(2010)	Sistem PEMFC (hidrogen)	82%
Neto et al. (2013)	Sistem PEMFC (hidrogen)	84%

8.7 KESIMPULAN

1. Nilai kelembapan udara di katod (RHK) lebih mempunyai kesan berbanding nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) terhadap kenaikan kecekapan haba proses reka bentuk sistem PEMFC.
2. Nilai suhu jepitan pada proses pemulihan haba adalah 367 K untuk keadaan 1,2,3 dan 4. Sedangkan untuk keadaan 5 adalah 313 K
3. Total pemulihan haba pada keadaan sama tetapi berbeza suhu operasi ialah relatif sama. Samping itu, jika suhu yang sama dan berlaku perubahan nilai RHA dan RHK menunjukan penurunan nilai total pemulihan haba jika berlaku penurunan nilai RHA dan RHK.
4. Pemulihan haba maksimum untuk tujuan pemanasan dan penyejukan pada aliran proses reka bentuk sistem PEMFC dianggarkan pada keadaan RHA 70% ,RHK 90% dan suhu 353 K dengan total pemulihan haba adalah 89%.
5. Keperluan minimal haba proses utiliti panas Q_{Hmin} pada 70% RHA dan 90% RHK masing-masing adalah 0.02738 J cm^{-2}s.dan proses utiliti sejuk Q_{Cmin} adalah 0 J cm^{-2}s

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

BAB IX

RUMUSAN DAN PENUTUP

9.1 RUMUSAN DAN PENEMUAN KAJIAN

Pengembangan metodologi proses reka bentuk sistem PEMFC menggunakan hidrogen tulen sebagai bahan api salah satunya boleh menggunakan pemodelan matematik. Pemodelan boleh membantu untuk melakukan reka bentuk awal dan pengujian sistem secara cepat. Selain daripada itu pemodelan juga boleh memperbaiki reka bentuk sistem yang suda ada.

Objektif utama pada kajian ini berguna untuk membantu dan menyelesaikan proses reka bentuk sistem PEM sel fuel menggunakan hidrogen tulen sebagai bahan api. Penggunaan model ini boleh mengatasi masalah yang terdapat pada sistem PEMFC berupa keseimbangan air sistem, masalah suapan bahan tindak balas, pengelolaan haba, pembentukan cecair air dan mengetahui keadaan operasi untuk pencapaian prestasi sistem yang optimum. Proses reka bentuk sistem PEM sel fuel di bangun sebagai bentuk linier pada keadaan mantap dan pemodelan matematik diselesaikan dengan menggunakan perisian Simulink Matlab.

Samping daripada itu, kajian ini juga telah menghasilkan berbagai perkara yang terdiri daripada:

1. Kaedah reka bentuk terhadap unit utama proses sistem PEMFC, seperti stek PEMFC dan pelembapan membran menggunakan hidrogen tulen sebagai salah satu bahan tindak balas.
2. Konsep reka bentuk terhadap unit proses sistem PEMFC dan menghasilkan lengkung pencirian untuk masing –masing unit proses.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

3. Pemodelan matematik terhadap konsep reka bentuk proses sistem PEMFC
4. Pemodelan matematik yang melibatkan persamaan linier pada keadaan mantap dengan menggunakan perisian Simulink Maltab.
5. Keadaan operasi yang optimum dengan menggunakan kajian parameter penyokong proses sistem PEMFC.
6. Mengenal pasti terhadap aliran utiliti optimum proses sistem PEMFC, serta melakukan analisis jepitan untuk melakukan pemulihan haba sistem.
7. Hasil pemodelan matematik reka bentuk proses sistem PEMFC pada penyelidikan ini dilakukan pengesahannya dengan membandingkan dengan peyelidikan lainnya yang telah dilakukan.

Berdasarkan perkara-perkara yang dilakukan pada reka bentuk proses pada sistem PEMFC, berikut ini merupakan kesimpulan beberapa keputusan akhir yang diperoleh iaitu :

7. Kepekatan wap air yang mengalir masuk pada kedua sisi PEMFC iaitu sisi anod dan sisi katod meningkat apabila suhu operasi dan kelembapan relatif juga meningkat. Peningkatan nilai kelembapan relatif pada aliran gas yang mengalir masuk ke dalam sisi anod dan sisi katod PEMFC menyebabkan berlakunya peningkatan nilai kepekatan air pada peristiwa EOD dan juga berlakunya peningkatan kepekatan uap air di dalam gas hidrogen pada sisi anod.

8. Kepekatan air pada sisi anod dan katod adalah sama ketika nilai RHK adalah 20% dan nilai RHA adalah 58%. Pada keadaan ini, tidak ada resapan air yang berlaku dalam sistem PEMFC.Kepekatan minimum cecair air pada aliran gas yang mengalir keluar dari sisi katod berlaku pada nilai RHK daripada 45% hingga 89% dan suhu operasi sistem PEMFC daripada 343 K hingga 363 K. Peningkatan kepekatan cecair air yang tinggi berlaku pada nilai RHK ialah 90% dan suhu operasi ialah 363 K. Oleh kerana itu, pengurusan air pada keadaan ini ialah sukar untuk d**i**kawal. Pada aliran keluar pada gas sisi anod, pembentukan cecair air terjadi pada suhu operasi 353 K dan 363 K. Sehingga peningkatan nilai RHK menyebabkan berlakunya pembentukan cecair air yang minimum.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

9. Kajian tentang prestasi sel tunggal PEMFC menunjukan bahawa peningkatan suhu daripada 333 K kepada 353 K menyebabkan peningkatan prestasi yang kentara, purata untuk 0.6 V berlaku kenaikan ketumpatan arus dari 0.6154 Acm^{-2} hingga 1.0684 Acm^{-2}. Sedangkan peningkatan suhu sel daripada 353 K kepada 363K menyebabkan sedikit peningkatan prestasi, purata untuk 0.6 V berlaku kenaikan ketumpatan arus dari 1.0684 Acm^{-2} hingga 1.082 Acm^{-2}

10. Pada keadaan nilai kelembapan relatif yang sama pada salah satu sisi PEMFC, Peningkatan prestasi sel tunggal lebih besar dipengaruhi oleh kenaikan nilai RHK berbanding kenaikan nilai RHA. Kenaikan nilai tekanan pada sisi katod menyebabkan peningkatan prestasi sel fuel lebih ketara daripada peningkatan nilai tekanan pada sisi anod. Kenaikan jisim beban Pt daripada 0.2 mg kepada 0.6 mg mengakibatkan berlakunya peningkatan prestasi sel tunggal, tetapi kenaikan daripada 0.6 mg kepada 1 mg tidak menjejaskan prestasi ketara.

11. Kenaikan nilai RHA menyebabkan peningkatan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan sisi katod, sedangkankenaikan nilai RHK menyebabkan penurunan jumlah cecair air mengalir keluar dari sisi anod dan kenaikan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi katod. Pembentukan cecair air pada sisi anod PEMFC berlaku dalam julat suhu 353 K hingga 363 K. Pada suhu di bawah 353 K, air yang mengalir keluar dari sisi anod berada dalam fasa wap. Cecair air pada suhu 353 K berlaku dalam julat nilai RHK daripada 10 % kepada 30% dan nilai RHA daripada 61% hingga 100%. Pada 363 K, cecair air berlaku pada nilai RHK pada julat 10 % hingga 70% RHC dan nilai RHA pada julat 35 % hingga 55% .

12. Kenaikan nilai RHK menyebabkan berlakunya peningkatan nilai voltan. Sedangkan kenaikan nilai RHA tidak menyebabkan peningkatan yang ketara terhadap prestasi PEMFC.Jika suhu operasi PEMFC mengalami penurunan daripada 363 K kepada 323 K maka cecair air berlaku pada nilai RHK yang lebih rendah. Pada keadaan nilai RHK dan RHA 90% dan suhu operasi 303 K hingga 333 K menunjukkan berlakunya kenaikan prestasi PEMFC dan jumlah cecair air mengalir keluar dari sisi katod. Kenaikan suhu di atas 333 K

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

kesannya tidak ketara terhadap kenaikan prestasi atau pembentukan cecair air, bahkan pada keadaaan tersebut jumlahnya cenderung sama.

13. Peningkatan nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) tidak memberi kesan terhadap peningkatan jumlah aliran wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B pelembapan membran I (B MH I) berbanding peningkatan nilai kelembapan udara di katod (RHK). Suhu di atas 303 K dan nilai kelembapan udara di katod (RHK) turun daripada 90% kepada 50%, memberi kesan terhadap peningkatan jumlah wap air yang mengalir masuk ke dalam sisi B pelembapan membran I (MH I). Peningkatan nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) akan menyebabkan berlakunya kenaikan jumlah resapan wap air di pelembapan membran I (MH I). Di bawah suhu 353 K, tidak terdapat perbezaan jumlah resapan wap air di pelembapan membran I (MH I) pada nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) tetap dan kelembapan udara di katod (RHK) berbeza, tetapi terlihat berbeza jika suhu operasi di atas 353 K.

14. Jumlah sel pada pelembapan membran I (MH I) paling sedikit diperlukan berlaku pada suhu tinggi iaitu 363 K. Semakin rendah suhu operasi semakin banyak sel yang diperlukan kerana resapan wap air juga semakin kecil. Kenaikan jumlah resapan wap air pada pelembapan membran II (MH II) dipengaruhi oleh kenaikan suhu dan nilai kelembapan udara di katod (RHK). Keadaan suhu di bawah 363 K wap air mengalir masuk sisi B pada pelembapan membran II (B MH II) tidak mencukupi untuk melembapkan udara. Nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) 50% dan kelembapan udara di katod (RHK) tetap 90% wap air mencukupi untuk melembapkan udara dan berlangsung di atas suhu 353 K.

15. Nilai kelembapan udara di katod (RHK) lebih mempunyai kesan berbanding nilai kelembapan hidrogen di anod (RHA) terhadap kenaikan kecekapan haba proses reka bentuk sistem PEMFC.Nilai suhu jepitan pada proses pemulihan haba adalah 362 K. Keperluan minimal haba proses utiliti panas Q_{Hmin} pada konsidi 1,2,3 dan 4 masing-masing adalah 0.0407, 0.0408, 0.0428 dan 0.0443 J cm^{-2}s.dan proses utiliti sejuk Q_{Cmin} adalah 0.002, 0.0025, 0.0014 dan 0.0039 J

$cm^{-2}s$. Pemulihan tenaga untuk tujuan pemanasan dan penyejukan pada aliran proses reka bentuk sistem PEMFC dianggarkan pada keadaan 1,2 3 dan 4 masing-masing di dalam julat 90 hingga 99%, 86 hingga 98%, 74 hingga 98% dan 68 hingga 96%

9.2 SUMBANGAN KAJIAN

Daripada hasil kajian yang diperoleh, beberapa sumbangan kajian yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

1. Kandungan wap air maksimum yang mengalir masuk ke dalam sisi anod dan katod boleh diketahui jumlahnya terhadap perubahan nilai kelembapan relatif yang diinginkan.
2. Pembangunan pemodelan matematik pada reka bentuk sistem PEMFC mampu mengetahui faktor yang mempengaruhi keadaan imbangan jisim air yang terdapat pada sistem dengan mengamati kandungan wap air yang mengalir masuk ke dalam PEMFC, wap air yang berpindah bersama-sama proton dari sisi anod ke sisi katod pada peristiwa EOD dan resapan wap air dari sisi katod ke sisi anod.
3. Mengira pembentukan cecair air yang berlaku di dalam sisi anod dan sisi katod dengan melakukan perubahan keadaan operasi penyokong sistem. Samping daripada itu, boleh menentukan keadaan operasi pembentukan cecair air yang sukar untuk di kawal.
4. Daripada kajian ini di dapati keadaan operasi yang sesuai untuk mencapai prestasi optimum sel tunggal PEMFC, dengan melakukan perubahan terhadap kelembapan relatif bahan tindak balas, suhu dan tekanan operasi, nisbah stoikiometri bahan tindak balas dan jisim pemangkin yang digunakan
5. Mengetahui perubahan prestasi sistem PEMFC yang dihasilkan terhadap jumlah cecair air yang mengalir keluar dari sisi anod dan sisi katod.
6. Kesan perubahan nilai kelembapan relatif yang mengalir masuk PEMFC terhadap kenaikan atau penurunan jumlah cecair air yang mengalir keluar dari PEMFC. samping daripada itu juga mengetahui kesannya terhadap kecekapan sistem yang dihasilkan.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

7. Reka bentuk proses yang menyeluruh pada sistem PEMFC memberikan keadaan operasi tentang jumlah wap air yang cukup melakukan kitar semula untuk melembapkan hidrogen dan udara sebelum mengalir masuk ke dalam PEMFC.
8. Melakukan reka bentuk terhadap perbandingan luas area PEMFC berbanding pelembapan membran yang berguna untuk meminimumkan penggunaan jumlah sel pada pelembap membran.

9.3 CADANGAN KAJIAN LANJUTAN

Proses reka bentuk sistem PEM sel fuel menggunakan hidrogen tulen sebagai salah satu bahan tindak balas telah menunjukkan beberapa hasil kajian. Selanjutnya untuk memantapkan lagi kajian tentang perolehan prestasi optimum PEM sel fuel untuk boleh diaplikasikan pada berbagai kegunaan terdapat beberapa cadangan penyelidikan yang terdiri daripada:

1. Mengembangkan proses reka bentuk sistem PEMFC yang linier menggunakan bahan api daripada sumber lainnya seperti metanol dan metan
2. Mengkaji imbangan jisim yang berlaku di dalam proses sistem PEMFC tersebut dengan mengetahui kesan parameter penyokong .
3. Mengkaji pembentukan cecair air pada keseimbangan air yang terdapat pada proses sistem keseluruhan
4. Menghitung penyepaduan sistem haba yang terdapat pada reka bentuk proses sistem PEMFC menggunakan bahan api daripada sumber lain tersebut.
5. Membandingkan hasil yang diperoleh dengan menggunakan bahan tindak balas berbanding menggunakan methanol dan metana.
6. Menguji hasil yang diperoleh dengan mewujudkan ke dalam sistem yang bentuk real.

9.4 PENUTUP

Kajian ini merupakan pengembangan metodologi reka bentuk proses sistem PEMFC untuk mencapai prestasi sistem yang optimum. Pencapaian sistem yang optimal telah

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

dilakukan berdasarkan objektif kajian yang telah dilakukan. Samping daripada itu, hasil-hasil yang diperoleh berdasarkan kajian yang dilakukan pada penyelidikan ini juga boleh membantu untuk mengatasi permasalahan yang dihadapi oleh sistem PEMFC. Masalah tersebut meliputi sistem stek PEMFC, bahan suapan bahan tindak balas, pengurusan haba dan jisim dan keadaan operasi pemprosesan sistem PEMFC. Akibatnya keseimbangan jisim air dan pencapaian sistem PEMFC yang optimum boleh dicapai. Untuk lebih meningkatkan prestasi sistem yang optimal telah juga dijabarkan beberapa cadang penyelidikan yang dilakukan. Akibatnya PEMFC menjadi salah satu sumber tenaga yang boleh diandaikan dan bernilai ekonomis.



UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

RUJUKAN

Boudghene, A S. 2011 Fuel cells: The expectations for an environmental-friendly and sustainable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(9) 4507-4520

Abdellah, B. 2012. Modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cell systems. *Journal of Power Sources* 205: 335-339.

Abedini, A., B. Dabir & M. Kalbasi. 2012. Experimental verification for simulation study of Pt/CNT nanostructured cathode catalyst layer for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(10): 8439-8450.

Amirinejad, M., S. Rowshanzamir & M. H. Eikani. 2006. Effects of operating parameters on performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 161(2): 872-875.

Barbir, F., H. Gorgun & X. Wang. 2005. Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 141(1): 96-101.

Baschuk, J. J. & X. Li. 2000. Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding. *Journal of Power Sources* 86(1-2): 181-196.

Baschuk, J. J. & X. Li. 2005. A general formulation for a mathematical PEM fuel cell model. *Journal of Power Sources* 142(1-2): 134-153.

Baschuk, J. J. & X. Li. 2009. A comprehensive, consistent and systematic mathematical model of PEM fuel cells. *Applied Energy* 86(2): 181-193.

Bayrakçeken, A., S. Erkan, L. Türker & I. Eroglu. 2008. Effects of membrane electrode assembly components on proton exchange membrane fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(1): 165-170.

Beicha, A. 2012. Modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cell systems. *Journal of Power Sources* 205(0): 335-339.

Berning, T. 2011. On water transport in polymer electrolyte membranes during the passage of current. *International Journal of Hydrogen Energy* 36(15): 9341-9344.

Bi, W. & T. F. Fuller. 2008. Modeling of PEM fuel cell Pt/C catalyst degradation. *Journal of Power Sources* 178(1): 188-196.

Bi, W., Q. Sun, Y. Deng & T. F. Fuller. 2009. The effect of humidity and oxygen partial pressure on degradation of Pt/C catalyst in PEM fuel cell. *Electrochimica Acta* 54(6): 1826-1833.

BiyIkoglu, A. 2005. Review of proton exchange membrane fuel cell models. *International Journal of Hydrogen Energy* 30(11): 1181-1212.

Bonnet, C. 2008. Design of an 80 kWe PEM fuel cell system: Scale up effect investigation. *Journal of Power Sources* 182 441–448

Boudghene Stambouli, A. & Traversa, E 2002. Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6(3): 295-304.

Briguglio, N., M. Ferraro, G. Brunaccini & V. Antonucci. 2011. Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP. *International Journal of Hydrogen Energy* 36(13): 8023-8029.

Brian.C. 2002. An introduction to Fuel cells and hydrogen Technology. *IEEE Proc*: 16.

C. Spiegel. 2008. *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*. Elsevier Inc.

Cai, Y., J. Hu, H. Ma, B. Yi & H. Zhang. 2006. Effect of water transport properties on a PEM fuel cell operating with dry hydrogen. *Electrochimica Acta* 51(28): 6361-6366.

Cao, Y. & Guo, Z. 2002. Performance evaluation of an energy recovery system for fuel reforming of PEM fuel cell power plants. *Journal of Power Sources* 109(2): 287-293.

Ceraolo, M., C. Miulli & Pozio, A 2003. Modelling static and dynamic behaviour of proton exchange membrane fuel cells on the basis of electro-chemical description. *Journal of Power Sources* 113(1): 131-144.

Chang, H., J. R. Kim, J. H. Cho, H. K. Kim & K. H. Choi. 2002. Materials and processes for small fuel cells. *Solid State Ionics* 148(3-4): 601-606.

Chang, W. R., J. J. Hwang, F. B. Weng & S. H. Chan. 2007. Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 166(1): 149-154.

Cheddie, S. I. a. D. 2009 Model-based estimation of PEM fuel-cell systems *EEE International Symposium on Intelligent Control, Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg,2009*

Chen, C.-H., S.-P. Jung & S.-C. Yen 2007. Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack. *Journal of Power Sources* 173(1): 249-263.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Chen, D., W. Li & H. Peng. 2008. An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control. *Journal of Power Sources* 180(1): 461-467.

Chen , P. & H. Peng. 2005. A Thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification Control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 127(9): 424-413

Chen, Y.-S. & H. Peng. 2008. A segmented model for studying water transport in a PEMFC. *Journal of Power Sources* 185(2): 1179-1192.

Cho, Y.-H., H.-S. Park, Y.-H. Cho, D.-S. Jung, H.-Y. Park & Y.-E. Sung. 2007. Effect of platinum amount in carbon supported platinum catalyst on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 172(1): 89-93.

Choi, K. H., D. J. Park, Y. W. Rho, Y. T. Kho & T. H. Lee. 1998. A study of the internal humidification of an integrated PEMFC stack. *Journal of Power Sources* 74(1): 146-150.

Chu, D. & R. Jiang. 1999. Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks: Part I. Evaluation and simulation of an air-breathing PEMFC stack. *Journal of Power Sources* 83(1–2): 128-133.

Chu, K., J. Ryu & M. Sunwoo. 2007. A lumped parameter model of the polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources* 171(2): 412-423.

Cleghorn, S. J. C., D. K. Mayfield, D. A. Moore, J. C. Moore, G. Rusch, T. W. Sherman, N. T. Sisofo & U. Beuscher. 2006. A polymer electrolyte fuel cell life test: 3 years of continuous operation. *Journal of Power Sources* 158(1): 446-454.

Curtin, D. E., R. D. Lousenberg, T. J. Henry, P. C. Tangeman & M. E. Tisack. 2004. Advanced materials for improved PEMFC performance and life. *Journal of Power Sources* 131(1-2): 41-48.

Das, P. K., X. Li & Z.-S. Liu. 2010. Analysis of liquid water transport in cathode catalyst layer of PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(6): 2403-2416.

Del Real, A. J., A. Arce & C. Bordons. 2007. Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model. *Journal of Power Sources* 173(1): 310-324.

Duncan, M. F. 2004. Process Synthesis: Design For Improved Effectiveness. *Chemical Engineering Science* 4(1): 42-50.

E.Afshari & S. A. JazayeriI. 2008. Heat and Water Management in a PEM Fuel Cell. *WSEAS Transactuons on Fluid mechanics* 3(2): 137-142.

Ebrahim, M. & A. Kawari. 2000. Pinch technology: an efficient tool for chemical-plant energy and capital-cost saving. *Applied Energy* 65(1–4): 45-49.

Escobar, M. & J. O. Trierweiler. 2013. Optimal heat exchanger network synthesis: A case study comparison. *Applied Thermal Engineering* 51(1–2): 801-826.

Falcão, D. S., V. B. Oliveira, C. M. Rangel, C. Pinho & A. M. F. R. Pinto. 2009. Water transport through a PEM fuel cell: A one-dimensional model with heat transfer effects. *Chemical Engineering Science* 64(9): 2216-2225.

Feng, X. & X. X. Zhu. 1997. Combining pinch and exergy analysis for process modifications. *Applied Thermal Engineering* 17(3): 249-261.

Fernandes, A. C. & E. A. Ticianelli. 2009. A performance and degradation study of Nafion 212 membrane for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 193(2): 547-554.

Flückiger, R., A. Tiefenauer, M. Ruge, C. Aebi, A. Wokaun & F. N. Büchi. 2007. Thermal analysis and optimization of a portable, edge-air-cooled PEFC stack. *Journal of Power Sources* 172(1): 324-333.

Frangopoulos, C. A. & L. G. Nakos. 2006. Development of a model for thermoeconomic design and operation optimization of a PEM fuel cell system. *Energy* 31(10-11): 1501-1519.

Frano, B. 2005. *PEM Fuel Cells Theory and Practice*. 279.Elsivier

Fraser, D. M. 2004. Process Synthesis: Design for Improved effectiveness. *American Journal Chemical Engineering* 4(1): 42-50.

Friedl, A., S. D. Fraser, W. R. Baumgartner & V. Hacker. 2008. Experimental analysis of internal gas flow configurations for a polymer electrolyte membrane fuel cell stack. *Journal of Power Sources* 185(1): 248-260.

Gao, F., B. Blunier, A. Miraoui & A. El-Moudni 2010. Proton exchange membrane fuel cell multi-physical dynamics and stack spatial non-homogeneity analyses. *Journal of Power Sources* 195(22): 7609-7626.

Ghandehariun, S., M. A. Rosen, G. F. Naterer & Z. Wang. 2012. Pinch analysis for recycling thermal energy in the Cu–Cl cycle. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(21): 16535-16541.

Glavict, M. H. a. P. 1996. Pressure Exchangers in Pinch Technology. *Computers & Chemical Engineering* 20(6/7): 593-608.

Glises, R., D. Hissel, F. Harel & M. C. Péra. 2005. New design of a PEM fuel cell air automatic climate control unit. *Journal of Power Sources* 150(0): 78-85.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Görgün, H., M. Arcak & F. 2006. An algorithm for estimation of membrane water content in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 157(1): 389-394.

Grujicic, K. M. C. 2004. Design and optimization of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells. *Applied Surface Science* 227.56-72

Guvelioglu, G. H. & H. G. Stenger. 2007. Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation. *Journal of Power Sources* 163(2): 882-891.

Haji, S. 2011. Analytical modeling of PEM fuel cell i–V curve. *Renewable Energy* 36(2): 451-458.

Hassan, N. S. M., W. R. W. Daud, K. Sopian & J. Sahari .2009. Water management in a single cell proton exchange membrane fuel cells with a serpentine flow field. *Journal of Power Sources* 193(1): 249-257.

Haraldsson, K. & K. Wipke. 2004. Evaluating PEM fuel cell system models. *Journal of Power Sources* 126(1-2): 88-97.

Hassan, N. S. M., W. R. W. Daud, K. Sopian & J. Sahari. 2009. Water management in a single cell proton exchange membrane fuel cells with a serpentine flow field. *Journal of Power Sources* 193(1): 249-257.

He, G., P. Ming, Z. Zhao, A. Abudula & Y. Xiao. 2007. A two-fluid model for two-phase flow in PEMFCs. *Journal of Power Sources* 163(2): 864-873.

Heinzel, A., J. Roes & H. Brandt. 2005. Increasing the electric efficiency of a fuel cell system by recirculating the anodic offgas. *Journal of Power Sources* 145(2): 312-318.

Hentall, P. L., J. B. Lakeman, G. O. Mepsted, P. L. Adcock & J. M. Moore.1999. New materials for polymer electrolyte membrane fuel cell current collectors. *Journal of Power Sources* 80(1-2): 235-241.

Hu, M., S. Sui, X. Zhu, Q. Yu, G. Cao, X. Hong & H. Tu. 2006. A 10 kW class PEM fuel cell stack based on the catalyst-coated membrane (CCM) method. *International Journal of Hydrogen Energy* 31(8): 1010-1018.

Huisseune, H., A. Willockx & M. De Paepe. 2008. Semi-empirical along-the-channel model for a proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(21): 6270-6280.

Hwang, J. J. 2007. A complete two-phase model of a porous cathode of a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 164(1): 174-181.

Hwang, J. J., M. L. Zou, W. R. Chang, A. Su, F. B. Weng & W. Wu. 2010. Implementation of a heat recovery unit in a proton exchange membrane fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(16): 8644-8653.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Hwang, J. J., W. R. Chang, R. G. Peng, P. Y. Chen & A. Su. 2008. Experimental and numerical studies of local current mapping on a PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(20): 5718-5727.

Hyun, D. & J. Kim. 2004. Study of external humidification method in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 126(1–2): 98-103.

Ibrir, S. & D. Cheddie. 2009. Model-based estimation of PEM fuel-cell systems, hlm. 1397-1402.

Inoue, G., Y. Matsukuma & M. Minemoto. 2006. Evaluation of the optimal separator shape with reaction and flow analysis of polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources* 154(1): 18-34.

Jamekhorshid, A., G. Karimi & I. Noshadi. 2011. Current distribution and cathode flooding prediction in a PEM fuel cell. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 42(4): 622-631.

Jang, J.-H., H.-C. Chiu, W.-M. Yan & W.-L. Sun. 2008. Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 180(1): 476-483.

Janssen, G. J. M. & M. L. J. Overvelde. 2001. Water transport in the proton-exchange-membrane fuel cell: measurements of the effective drag coefficient. *Journal of Power Sources* 101(1): 117-125.

Jiao, K. & X. Li. 2011. Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Progress in Energy and Combustion Science* 37(3): 221-291.

Ju, H., H. Meng & C.-Y. Wang. 2005. A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48(7): 1303-1315.

Jung S. Yi & T. V. Nguyen. 1998. An along-the-channel model for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of The Electrochemical Society* 145 (4): 10.

Jung, S. H., S. L. Kim, M. S. Kim, Y. Park & T. W. Lim. 2007. Experimental study of gas humidification with injectors for automotive PEM fuel cell systems. *Journal of Power Sources* 170(2): 324-333.

Kadylak, D., P. Cave & W. Mérida. 2009. Effectiveness correlations for heat and mass transfer in membrane humidifiers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52(5–6): 1504-1509.

Kadylak, D. & W. Mérida. 2010. Experimental verification of a membrane humidifier model based on the effectiveness method. *Journal of Power Sources* 195(10): 3166-3175.

Kamarudin, S. K., W. R. W. Daud, A. M. Som, M. S. Takriff, A. W. Mohammad & Y. K. Loke. 2004. Design of a fuel processor unit for PEM fuel cell via shortcut design method. *Chemical Engineering Journal* 104(1-3): 7-17.

Kang, S., K. Min & S. Yu. 2010. Two dimensional dynamic modeling of a shell-and-tube water-to-gas membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(4): 1727-1741.

Karmik, A.,Y. Stefanopoulou , A.,G. Sun, J. 2007. Water equilibria and management using a two-volume model of a polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources* 164 (2007) 590–605

Kaytakoglu, S. & L. AkyalçIn. 2007. Optimization of parametric performance of a PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy* 32(17): 4418-4423.

Kemp, I. C. 2007. Pinch Analysis and Process Integration A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. *Elsevier Ltd. All rights reserved*.

Kirubakaran, A., S. Jain & R. K. Nema. 2009. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9): 2430-2440.

Koh, J.-H., A. T. Hsu, H. U. Akay & M.-F. Liou. 2005. Analysis of overall heat balance in self-heated proton-exchange-membrane fuel cells for temperature predictions. *Journal of Power Sources* 144(1): 122-128.

Kraytsberg, A. & Y. Ein-Eli. 2006. PEM FC with improved water management. *Journal of Power Sources* 160(1): 194-201.

Kumar, A. & R. G. Reddy. 2003. Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the flow-field of the bipolar/end plates. *Journal of Power Sources* 114(1): 54-62.

Kunusch, C., P. F. Puleston, M. A. Mayosky & J. J. Moré. 2010. Characterization and experimental results in PEM fuel cell electrical behaviour. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(11): 5876-5881.

Le, A. D. & B. Zhou. 2008. A general model of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 182(1): 197-222.

Lee, J. H. & T. R. Lalk. 1998. Modeling fuel cell stack systems. *Journal of Power Sources* 73(2): 229-241.

Lee, S., T. Kim & H. Park. 2011. Comparison of multi-inlet and serpentine channel design on water production of PEMFCs. *Chemical Engineering Science* 66(8): 1748-1758

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Lee, Y., B. Kim & Y. Kim. 2009. An experimental study on water transport through the membrane of a PEFC operating in the dead-end mode. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(18): 7768-7779.

Li, H., Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Fatih, J. Zhang, H. Wang, Z. Liu, R. Abouatallah & A. Mazza. 2008. A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 178(1): 103-117.

Li, X. & I. Sabir. 2005. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy* 30(4): 359-371.

Lin, J.-H., W.-H. Chen, Y.-J. Su & T.-H. Ko. 2008. Effect of gas diffusion layer compression on the performance in a proton exchange membrane fuel cell. *Fuel* 87(12): 2420-2424.

Linnhoff, B. 1983. The Pinch Design Method For Heat Exchanger Netwarks. *Chemical Engineering Science* 38: (19) 729-750.

Liu, F., G. Lu & C.-Y. Wang. 2007. Water transport coefficient distribution through the membrane in a polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Membrane Science* 287(1): 126-131.

Liu, J. & M. Eikerling. 2008. Model of cathode catalyst layers for polymer electrolyte fuel cells: The role of porous structure and water accumulation. *Electrochimica Acta* 53(13): 4435-4446.

Liu, X., H. Guo & C. Ma. 2006. Water flooding and two-phase flow in cathode channels of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 156(2): 267-280.

Liu, Z., Z. Mao & C. Wang. 2006. A two dimensional partial flooding model for PEMFC. *Journal of Power Sources* 158(2): 1229-1239.

Ma, H. P., H. M. Zhang, J. Hu, Y. H. Cai & B. L. Yi. 2006. Diagnostic tool to detect liquid water removal in the cathode channels of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 162(1): 469-473.

Mann, R. F., J. C. Amphlett, B. A. Peppley & C. P. Thurgood. 2006. Application of Butler–Volmer equations in the modelling of activation polarization for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 161(2): 775-781.

Martín, Á. & F. A. Mato. 2008. Hint: An educational software for heat exchanger network design with the pinch method. *Education for Chemical Engineers* 3(1): e6-e14.

Mench, M. M., Q. L. Dong & C. Y. Wang. 2003. In situ water distribution measurements in a polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources* 124(1): 90-98.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Mert, S. O., I. Dincer & Z. Ozcelik. 2012. Performance investigation of a transportation PEM fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(1): 623-633.

Miachon, S. & P. Aldebert. 1995. Internal hydration H2/O2 100 cm2 polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 56(1): 31-36.

Na, W. & B. Gou. 2007. The efficient and economic design of PEM fuel cell systems by multi-objective optimization. *Journal of Power Sources* 166(2): 411-418.

Neto, R. C., J. C. Teixeira & J. L. T. Azevedo. 2013. Thermal and electrical experimental characterisation of a 1 kW PEM fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy* 38(13): 5348-5356

Nguyen, P. T., T. Berning & N. Djilali. 2004. Computational model of a PEM fuel cell with serpentine gas flow channels. *Journal of Power Sources* 130(1-2): 149-157.

Ni, M., M. K. H. Leung & D. Y. C. Leung. 2008. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy Conversion and Management* 49(10): 2748-2756.

O. Shamardina , A. C., A.A. Kulikovsky , A.R. Khokhlov. 2010. A simple model of a high temperature PEM fuel cell. *journal o f hydrogen energy* 35(2010): 8.

Okada, T. 1999. Theory for water management in membranes for polymer electrolyte fuel cells: Part 1. The effect of impurity ions at the anode side on the membrane performances. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 465(1): 1-17.

Oliva, D. G., J. A. Francesconi, M. C. Mussati & P. A. Aguirre. 2011. Modeling, synthesis and optimization of heat exchanger networks. Application to fuel processing systems for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 36(15): 9098-9114.

Owejan, J. P., J. J. Gagliardo, J. M. Sergi, S. G. Kandlikar & T. A. Trabold. 2009. Water management studies in PEM fuel cells, Part I: Fuel cell design and in situ water distributions. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(8): 3436-3444.

Panos, C, Kouramas, M. C. Georgiadis & E. N. Pistikopoulos. 2012. Modelling and explicit model predictive control for PEM fuel cell systems. *Chemical Engineering Science* 67(1): 15-25.

Park, S. K. Cho & Oh. 2005. Characteristics of Membrane Humidifiers for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Korean J. Chem. Eng* 22(6): 877-881.

Park, S. K & I.-H. Oh. 2009. An analytical model of Nafion(TM) membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 188(2): 498-501.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Park, S.-K., S.-Y. Choe & S.-h. Choi. 2008. Dynamic modeling and analysis of a shell-and-tube type gas-to-gas membrane humidifier for PEM fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(9): 2273-2282.

Park, Y. H. & J. A. Caton. 2008. An experimental investigation of electro-osmotic drag coefficients in a polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(24): 7513-7520.

Peighambardoust, S. J., S. Rowshanzamir & M. Amjadi. 2010. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(17): 9349-9384.

Placca, L., R. Kouta, J.-F. Blachot & W. Charon. 2009. Effects of temperature uncertainty on the performance of a degrading PEM fuel cell model. *Journal of Power Sources* 194(1): 313-327.

Qi, Z. & A. Kaufman. 2002. PEM fuel cell stacks operated under dry-reactant conditions. *Journal of Power Sources* 109(2): 469-476.

Rajalakshmi, N. & K. S. Dhathathreyan. 2007. Catalyst layer in PEMFC electrodes--Fabrication, characterisation and analysis. *Chemical Engineering Journal* 129(1-3): 31-40.

Rajalakshmi, N., S. Pandiyan & K. S. Dhathathreyan. 2008. Design and development of modular fuel cell stacks for various applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(1): 449-454.

Rajalakshmi, N., H. Ryu & K. S. Dhathathreyan. 2004. Platinum catalysed membranes for proton exchange membrane fuel cells – higher performance. *Chemical Engineering Journal* 102(3): 241-247.

Rajalakshmi, N., P. Sridhar & K. S. Dhathathreyan. 2002. Identification and characterization of parameters for external humidification used in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 109(2): 452-457.

Ramousse, J., O. Lottin, S. Didierjean & D. Maillet. 2009. Heat sources in proton exchange membrane (PEM) fuel cells. *Journal of Power Sources* 192(2): 435-441.

Rao, R. M., D. Bhattacharyya, R. Rengaswamy & S. R. Choudhury. 2007. A two-dimensional steady state model including the effect of liquid water for a PEM fuel cell cathode. *Journal of Power Sources* 173(1): 375-393.

Rašković, P. & S. Stoiljković. 2009. Pinch design method in the case of a limited number of process streams. *Energy* 34(5): 593-612.

Ronald K.A.M, M. 2003. PEMFC systems: the need for high temperature polymers as a consequence of PEMFC water and heat management. *Journal of Power Sources* 118(1-2): 424-429.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Rottery, K. P. Culvar Geo. 2003. Heat exchanger. *Heat Centre Klamat Fall Oregon*: 97601

Sabharwal, M. Duelk, C. Bhatia, D. 2012. Two-dimensional modeling of a cross flow plate and frame membrane humidifierfor fuel cell applications. *Journal of Membrane Science* 409– 410 (2012) 285– 301

Scott, K. & M. Mamlouk. 2009. A cell voltage equation for an intermediate temperature proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(22): 9195-9202.

Salama, A. I. A. 2006. Determination of the optimal heat energy targets in heat pinch analysis using a geometry-based approach. *Computers & Chemical Engineering* 30(4): 758-764.

Saleh, M. M., T. Okajima, M. Hayase, F. Kitamura & T. Ohsaka. 2007. Exploring the effects of symmetrical and asymmetrical relative humidity on the performance of H2/air PEM fuel cell at different temperatures. *Journal of Power Sources* 164(2): 503-509.

Santarelli, M. G. & M. F. Torchio. 2007. Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. *Energy Conversion and Management* 48(1): 40-51.

Scott, K. & M. Mamlouk. 2009. A cell voltage equation for an intermediate temperature proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(22): 9195-9202.

Shaker, H. 2011. Analytical modeling of PEM fuel cell i–V curve. *Renewable Energy* 36(2): 451-458.

Shamardina, O., A. Chertovich, A. A. Kulikovsky & A. R. Khokhlov. 2010. A simple model of a high temperature PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(18): 9954-9962.

Shan, Y. & S.-Y. Choe.2005. A high dynamic PEM fuel cell model with temperature effects. *Journal of Power Sources* 145(1): 30-39.

Shimpalee, S., U. Beuscher & J. W. Van Zee. 2007. Analysis of GDL flooding effects on PEMFC performance. *Electrochimica Acta* 52(24): 6748-6754.

Siegel, C. 2008. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells. *Energy* 33(9): 1331-1352.

Silva, H. 2003. Chemical process engineering design and economic. *Institute of technology* , Haboker New Jersi, USA.

Singh, K &.Crosbie, R. 2011. Use of Pinch Analysis in Sizing and Integrating a Heat Exchanger into an Existing Exchanger Network at a Gas Processing Plant. *The*

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago 40(2): 6.

Somnerfeld, J.T. 2001. Petrochemical plant cost for the millenium. *Chemical engineering isntitut of technology*, Georgia

Song, D., Q. Wang, Z. Liu, M. Eikerling, Z. Xie, T. Navessin & S. Holdcroft. 2005. A method for optimizing distributions of Nafion and Pt in cathode catalyst layers of PEM fuel cells. *Electrochimica Acta* 50(16–17): 3347-3358.

Song, D., Q. Wang, Z. Liu, T. Navessin, M. Eikerling & S. Holdcroft. 2004. Numerical optimization study of the catalyst layer of PEM fuel cell cathode. *Journal of Power Sources* 126(1–2): 104-111.

Sopian, K. & W. R. Wan Daud. 2006. Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy* 31(5): 719-727.

Spernjak, D., A. K. Prasad & S. G. Advani 2007. Experimental investigation of liquid water formation and transport in a transparent single-serpentine PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 170(2): 334-344.

Sridhar, P., R. Perumal, N. Rajalakshmi, M. Raja & K. S. Dhathathreyan. 2001. Humidification studies on polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 101(1): 72-78.

Staine, F. & D. Favrat. 1996. Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors. *Applied Thermal Engineering* 16(6): 497-507.

Staschewski, D. & Z. Q. Mao. 1999. Hydrogen–air pemfc operation with extraordinarily low gas pressures and internal humidification—conception and experimental prototype stack. *International Journal of Hydrogen Energy* 24(6): 543-548.

Strindehag, O., I. Josefsson & E. Henningson. 1991. Emission of bacteria from air humidifiers. *Environment International* 17(4): 235-241.

Stumper, J., M. Löhr & S. Hamada. 2005. Diagnostic tools for liquid water in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 143(1-2): 150-157.

Sukkee Um, C.-Y. Wang & K. S. Chen 2000. Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of The Electrochemical Society* 147(12): 4485-4493.

Sun, H., G. Zhang, L.-J. Guo, S. Dehua & H. Liu. 2007. Effects of humidification temperatures on local current characteristics in a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 168(2): 400-407.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Tang, H., S. Peikang, S. P. Jiang, F. Wang & M. Pan. 2007. A degradation study of Nafion proton exchange membrane of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 170(1): 85-92.

Tavakoli, B. & Roshandel, R. 2011. The effect of fuel cell operational conditions on the water content distribution in the polymer electrolyte membrane. *Renewable Energy* 36(12): 3319-3331.

Thampan, T., Malhotra, S,. Zhang, J& Datta, R. 2001. PEM fuel cell as a membrane reactor. *Catalysis Today* 67(1–3): 15-32.

Varbanov, P. S., Z. Fodor & Klemeš,J.J. 2012. Total Site targeting with process specific minimum temperature difference (ΔTmin). *Energy* 44(1): 20-28.

Vasu, G., A. K. Tangirala, B. Viswanathan & K. S. Dhathathreyan. 2008. Continuous bubble humidification and control of relative humidity of H2 for a PEMFC system. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(17): 4640-4648.

Vishnyakov. 2006. Proton exchange membrane fuel cells. *Vacuum* 80(10): 1053-1065.

Wallmark, C. & P. Alvfors. 2002. Design of stationary PEFC system configurations to meet heat and power demands. *Journal of Power Sources* 106(1–2): 83-92.

Wang, Z. H., C. Y. Wang & K. S. Chen. 2001. Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 94(1): 40-50.

Wei Sun, B. A. P., Kunal Karan. 2005. An improved two-dimensional agglomerate cathode model to study the influence of catalyst layer structural parameters. *Electrochimica Acta* 50: 15.

Wei Suna, B. A. P., Kunal Karana. 2005. An improved two-dimensional agglomerate cathode model to study the influence of catalyst layer structural parameters *Electrochemica Acta* 50(2005): 16.

Wen, C.-Y., Y.-S. Lin & C.-H. Lu. 2009. Performance of a proton exchange membrane fuel cell stack with thermally conductive pyrolytic graphite sheets for thermal management. *Journal of Power Sources* 189(2): 1100-1105.

Weng, F.-B., A. Su & C.-Y. Hsu. 2007. The study of the effect of gas stoichiometric flow rate on the channel flooding and performance in a transparent fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 32(6): 666-676.

Wood, D. L., J. S. Yi & T. V. Nguyen. 1998. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta* 43(24): 3795-3809.

W. Randal. 2012. Process equipment cost estimation by ratio and propotion. *www PDH centre.com*

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Wu, J., X. Z. Yuan, J. J. Martin, H. Wang, J. Zhang, J. Shen, S. Wu & W. Merida. 2008. A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources* 184(1): 104-119.

Wu, J., X. Zi Yuan, H. Wang, M. Blanco, J. J. Martin & J. Zhang. 2008. Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part II: Physical/chemical methods. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(6): 1747-1757.

Wu, S. H., D. B. Kotak & M. S. Fleetwood. 2005. An integrated system framework for fuel cell-based distributed green energy applications. *Renewable Energy* 30(10): 1525-1540.

Xu, Z., Y. Xiao & Y. Wang. 2007. Experimental and theoretical studies on air humidification by a water spray at elevated pressure. *Applied Thermal Engineering* 27(14-15): 2549-2558.

Xue, D. & Z. Dong. 1998. Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs. *Journal of Power Sources* 76(1): 69-80.

Yan, Q., H. Toghiani & J. Wu. 2006. Investigation of water transport through membrane in a PEM fuel cell by water balance experiments. *Journal of Power Sources* 158(1): 316-325.

Yan, W.-M., C.-Y. Chen, S.-C. Mei, C.-Y. Soong & F. Chen. 2006. Effects of operating conditions on cell performance of PEM fuel cells with conventional or interdigitated flow field. *Journal of Power Sources* 162(2): 1157-1164.

You, L. & H. Liu. 2002. A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45(11): 2277-2287.

You, L. & H. Liu. 2006. A two-phase flow and transport model for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 155(2): 219-230.

Yousfi-Steiner, N., P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A. Hernandez & A. Aslanides. 2008. A review on PEM voltage degradation associated with water management: Impacts, influent factors and characterization. *Journal of Power Sources* 183(1): 260-274.

Yu, L.J., Ren, G.P. Qin M. J & Jiang X. M.2009. Transport mechanisms and performance simulations of a PEM fuel cell with interdigitated flow field. *Renewable Energy* 34(3): 530-543.

Yu, X., B. Zhou & Sobiesiak, A.2005. Water and thermal management for Ballard PEM fuel cell stack. *Journal of Power Sources* 147(1–2): 184-195.

Yuan, W., Y. Tang, M. Pan, Z. Li & B. Tang. 2010. Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance. *Renewable Energy* 35(3): 656-666.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Zamel, N. & X. Li 2013. Effective transport properties for polymer electrolyte membrane fuel cells – With a focus on the gas diffusion layer. *Progress in Energy and Combustion Science* 39(1): 111-146.

Zhang, J., Y. Tang, C. Song, Z. Xia, H. Li, H. Wang & J. Zhang 2008. PEM fuel cell relative humidity (RH) and its effect on performance at high temperatures. *Electrochimica Acta* 53(16): 5315-5321.

Zhang, X., J. Guo & J. Chen. 2010. The parametric optimum analysis of a proton exchange membrane (PEM) fuel cell and its load matching. *Energy* 35(12): 5294-5299.

Zhou, B., Huang, W, Zong Y & Sobiesiak A. 2006. Water and pressure effects on a single PEM fuel cell. *Journal of Power Sources* 155(2): 190-202.

Zong, Y., Zhou, B &. Sobiesiak, A. 2006. Water and thermal management in a single PEM fuel cell with non-uniform stack temperature. *Journal of Power Sources* 161(1): 143-159.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

LAMPIRAN A

SENARAI PENERBITAN, PAMERAN, ANUGERAH DAN PATEN

A. Jurnal

Mulyazmi, W.R.W. Daud, E.H. Majlan, M.I. Rosli. Water balance for the design of a PEM fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy* XXX(2012) 1 - 2.

Mulyazmi, Wan Ramli Wan Daud, Edy Herianto Majlan. 2010. Design models of polymer electrolyte membrane fuel cell system. *Key Engineering Materials*. 447-448: 554-558

B. Persidangan Antarabangsa

Mulyazmi, W.R.W Daud, E.H Majlan. 2011. Simulation of water balance in PEM fuel cell system that uses external humidifier. *The 3rd International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology*. Kuala Lumpur Malaysia. 22 - 23 November 2011

Mulyazmi, W.R.W Daud, E.H Majlan.. 2010. Design models of polymer electrolyte membrane fuel cell system. *International Conference on Precision Engineering* (ICoPE2010 & 13th ICPE)**.** Singapore 28 – 30 July 2010.

Mulyazmi, Wan Ramli Wan Daud, Edy Majlan 2010. Water Management with External Humidifier for Performance PEMFC System: a Review. *International Conference on Process Engineering and Advanced Materials (ICPEAM2010).* Kuala Lumpur Convention Centre 15-17 June 2010

Mulyazmi, W.R.W. Daud, E.H. Majlan. 2009. Operating conditions for the concept design of PEM fuel cell system, A Review. *International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology*. The Agency for Assessment and Application of Technology (BPPT). Jakarta, Indonesia. 28-29 Oktober 2009.

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

C. Persidangan Kebangsaan

Mulyazmi, Wan Ramli Wan Daud, Edy Herianto Majlan. 2009. Tinjauan rekabentuk pada rangkaian sistem sel fuel membran pertukaran proton (PEMFC). Kolokium dan Sanggar Kerja ISF 2009. Hotel Hydro Penang. 18-20 Disember 2009

Mulyazmi, Wan Ramli Wan Daud, Edy Herianto Majlan. 2009. Review of proton exchange membrane (PEM) fuel cell system. *Proceeding of Graduate Publication Workshop 2009*. p87-88. Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, UKM. The Residence Hotel, UNITEN, Serdang. 31 Mac 2009

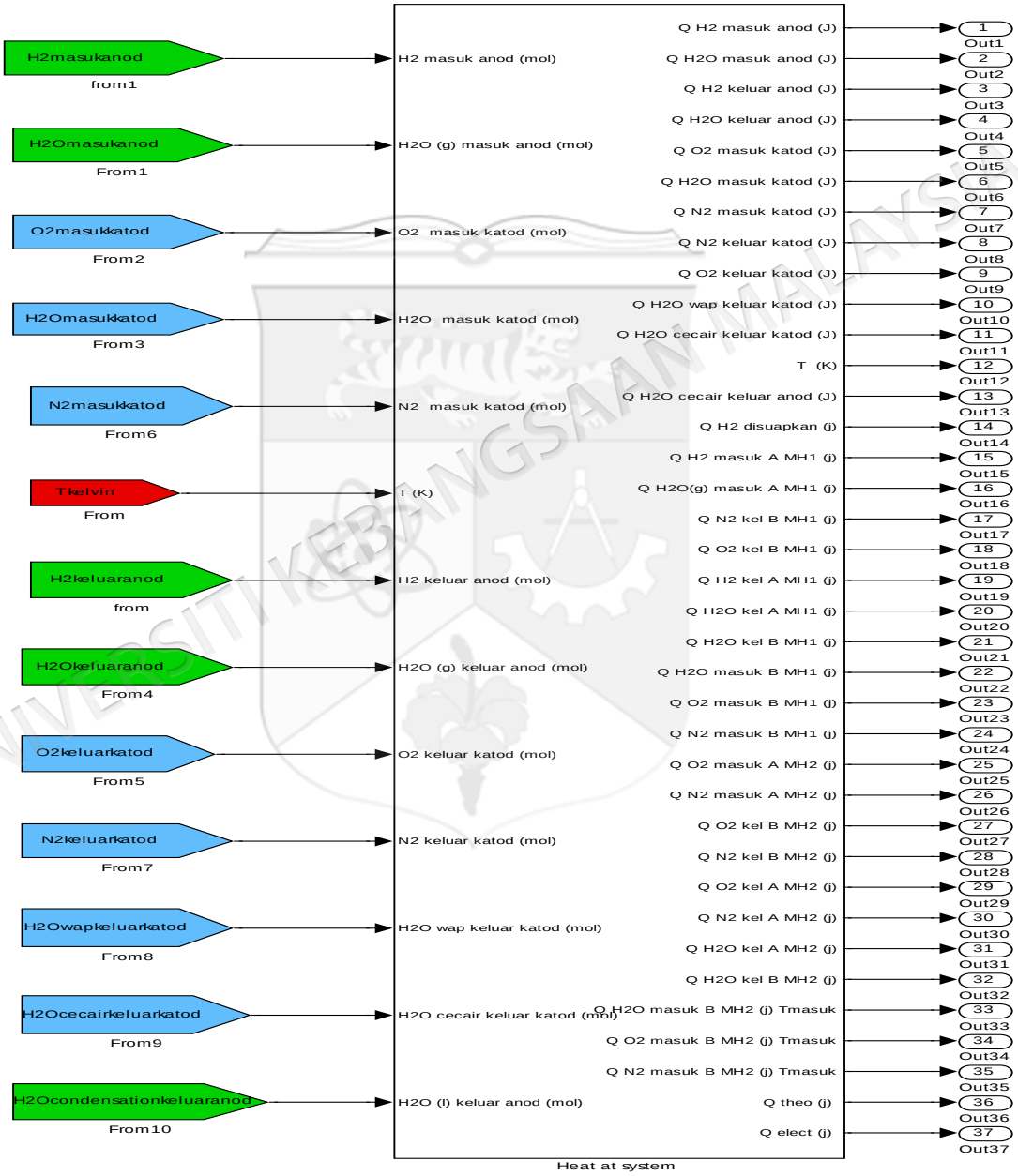
Mulyazmi, Wan Ramli Wan Daud, Edy Herianto Majlan., 2009. Reka bentuk sistem polimer sel bahan api membran elektrolit polimer (PEMFC). *Pascasidang Seminar dan Pameran Sel Fuel 2009 (Jilid II): Peluang, Cabaran dan Perkembangan Penyelidikan Sel Fuel di UKM*. p8-14. Hotel Palace of the Golden Horses, Serdang. 25-26 Mac 2009

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

LAMPIRAN B

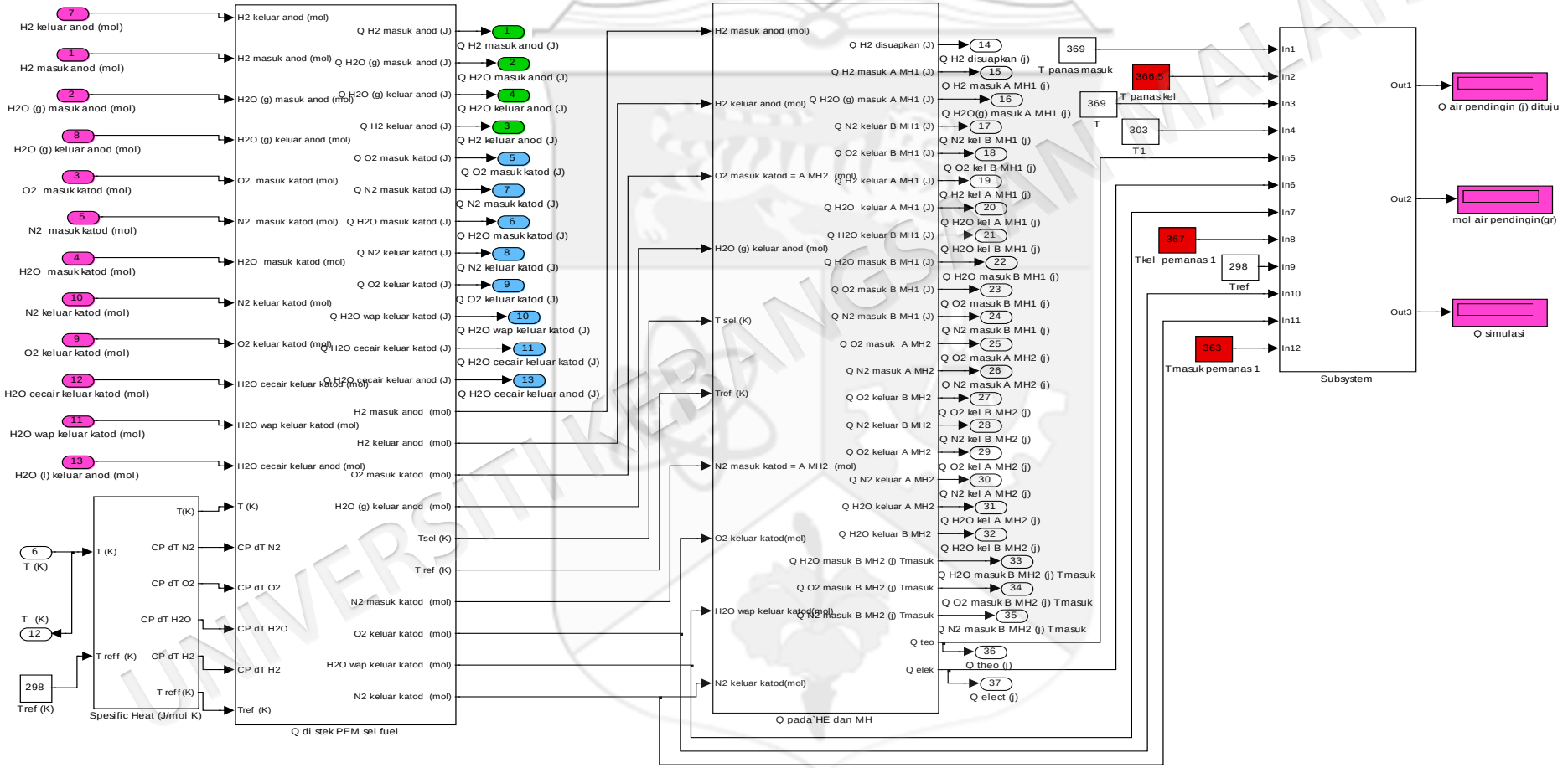
IMBANGAN HABA PADA SISTEM PEMFC

B.1 IMBANGAN HABA KESELURUHAN



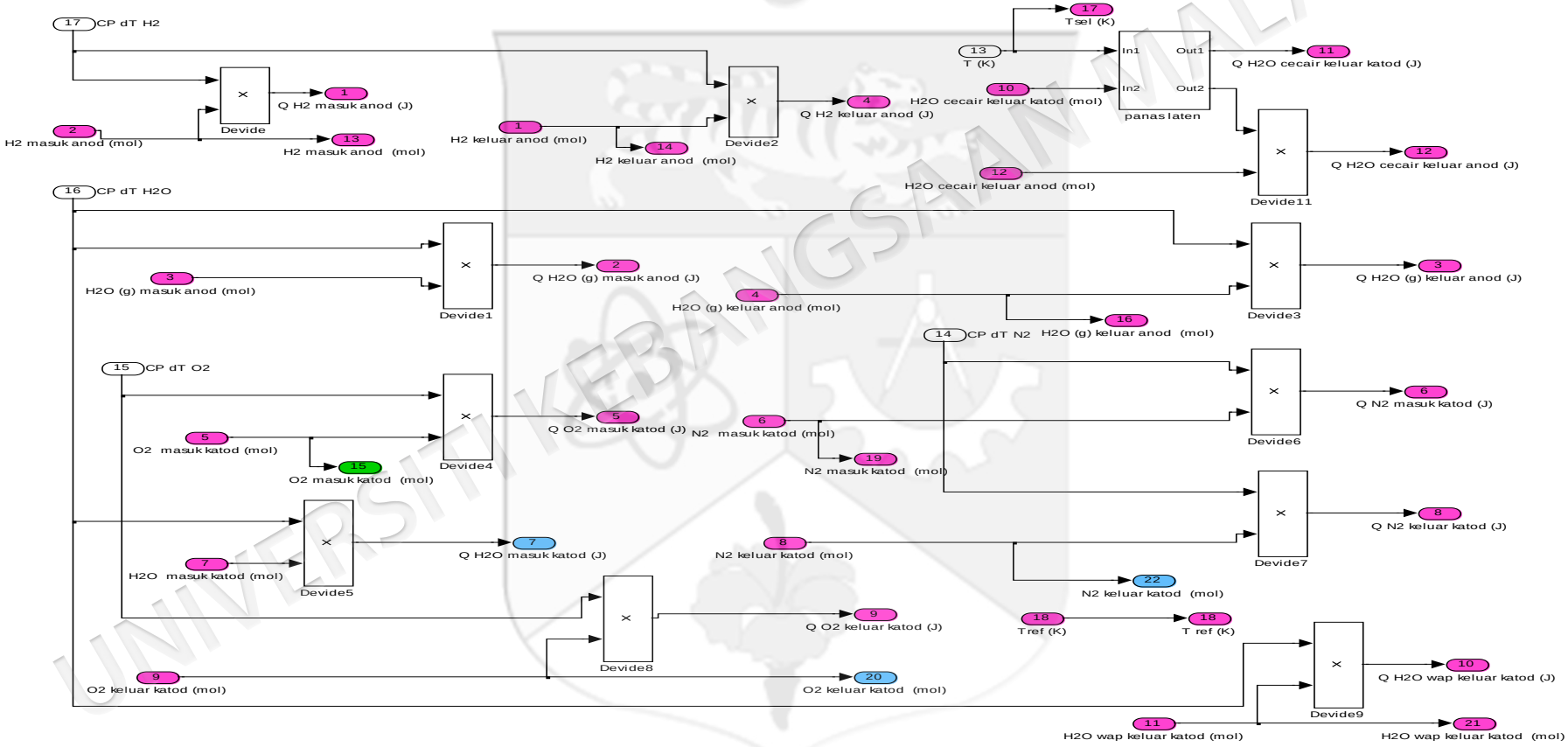
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.2 SISTEM HABA



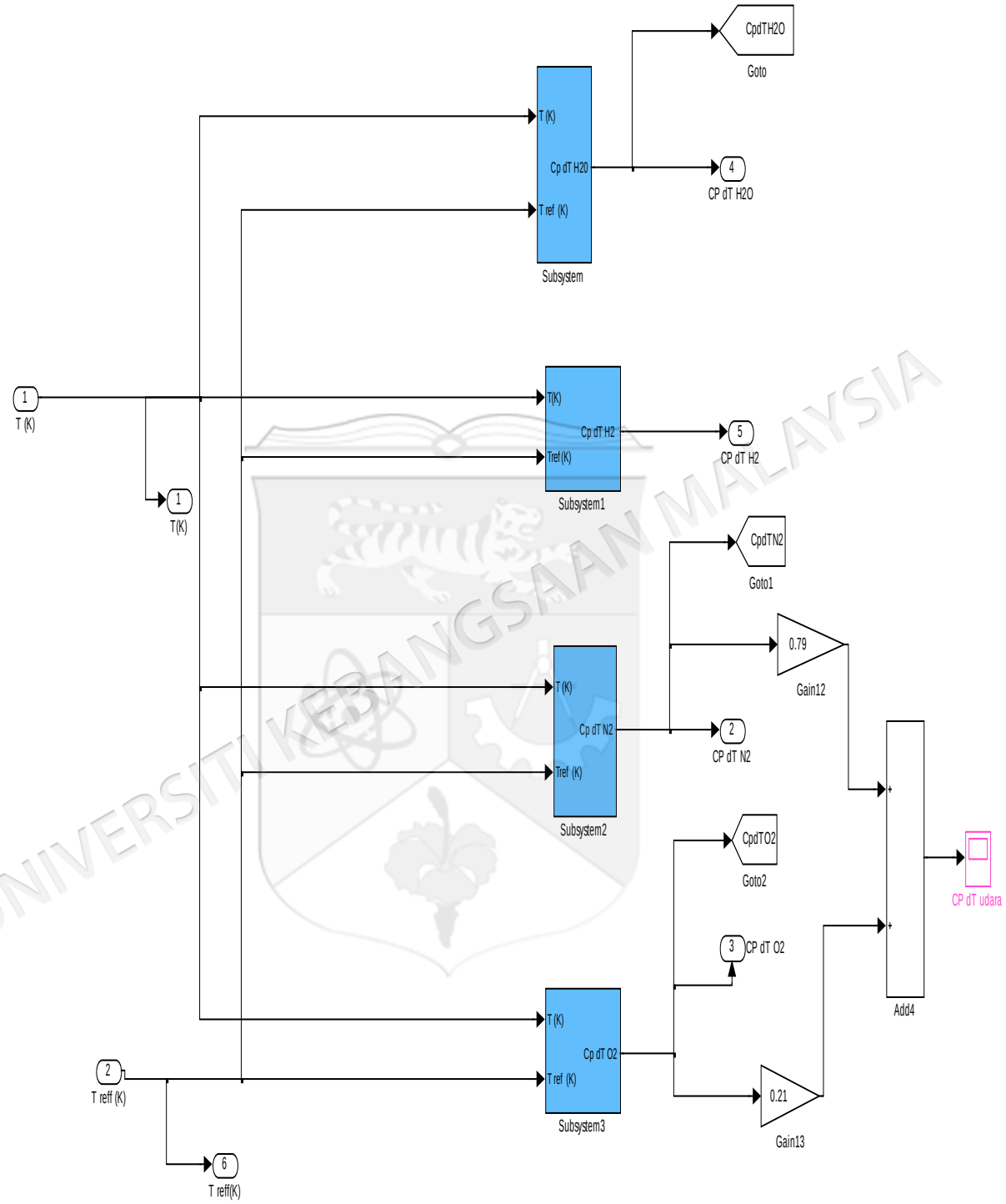
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.3 HABA DI STEK PEMFC



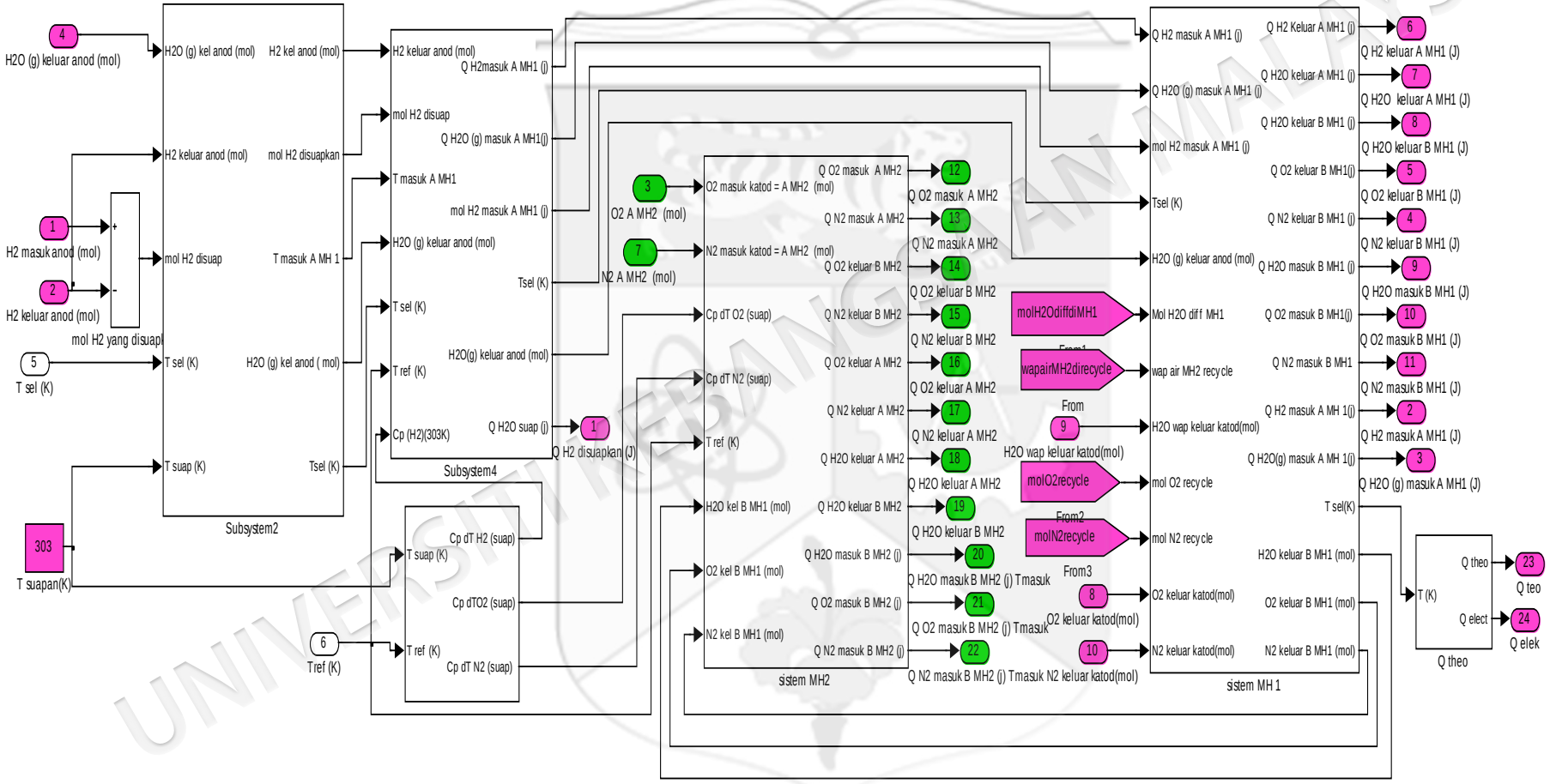
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.4 HABA SPESIFIK



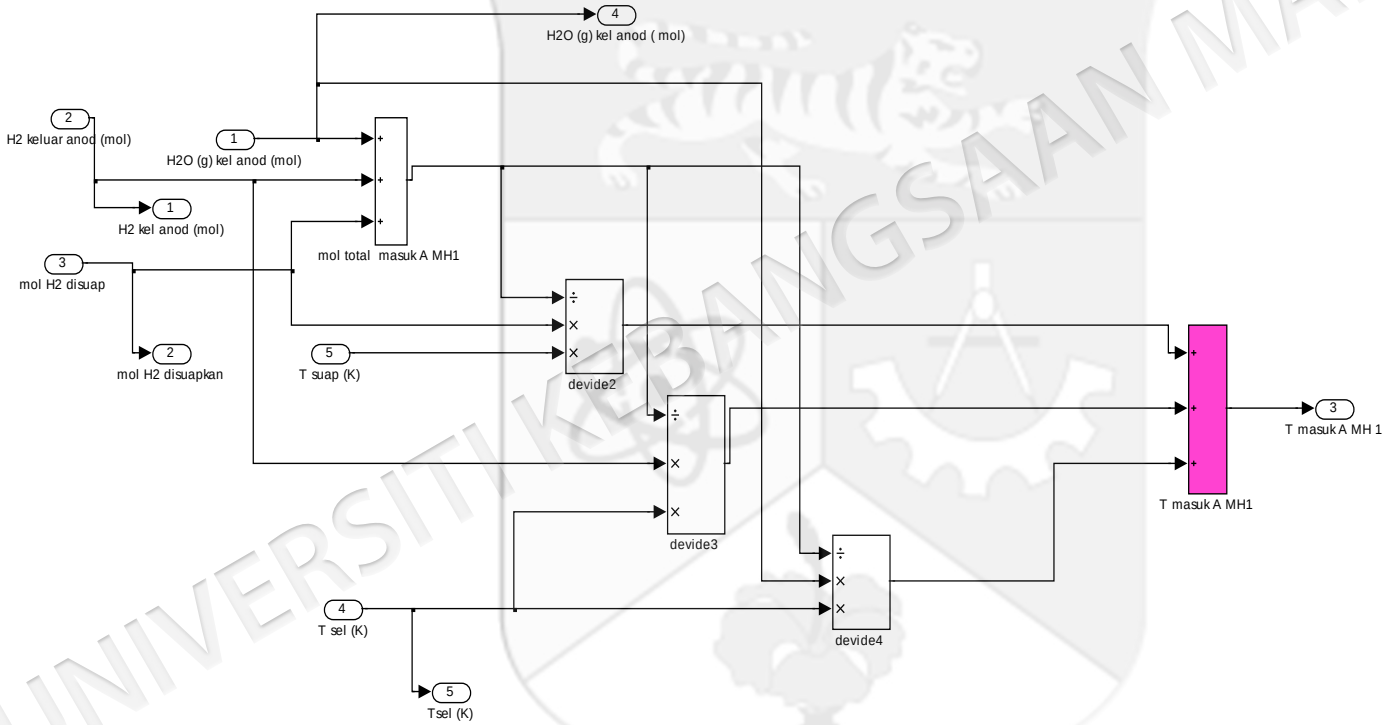
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.5 PERPINDAHAN HABA PADA PELEMBAP



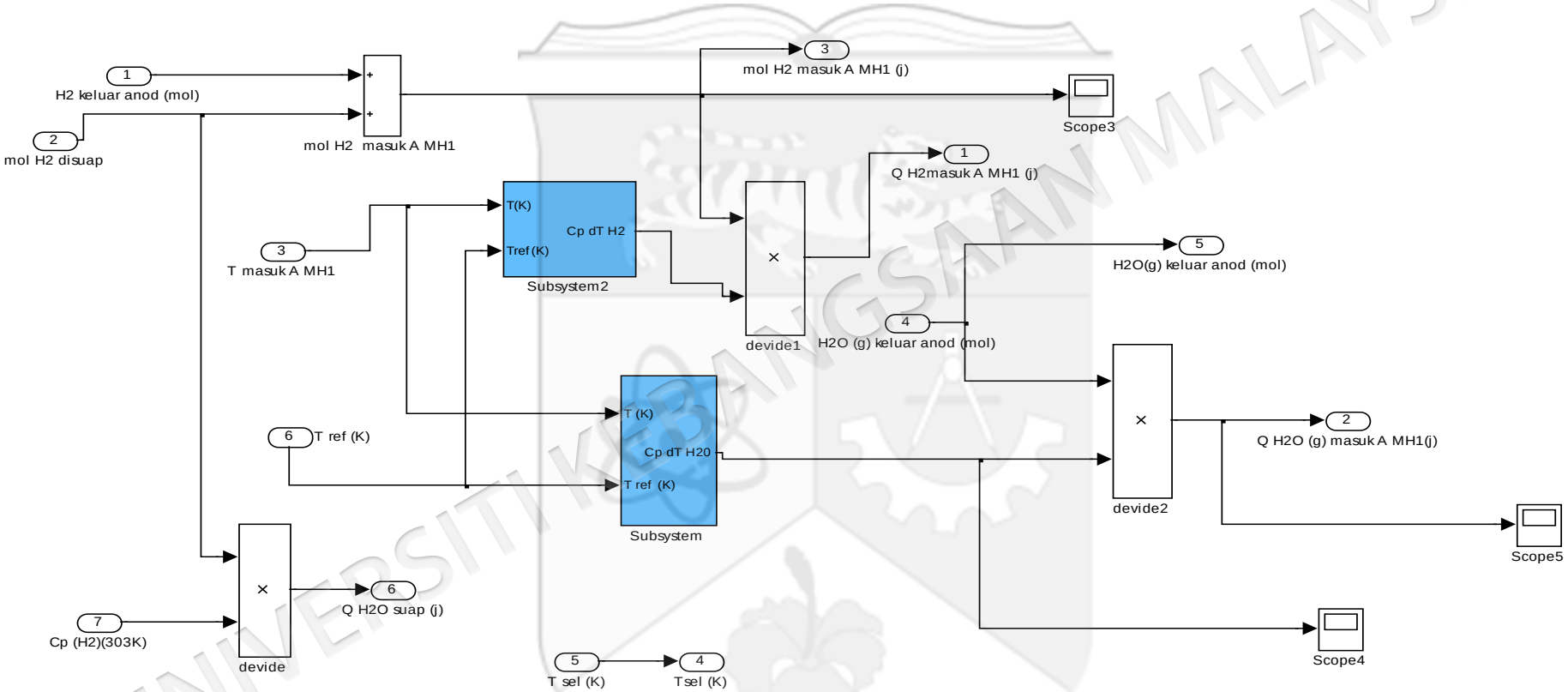
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.6 SUB SISTEM 1



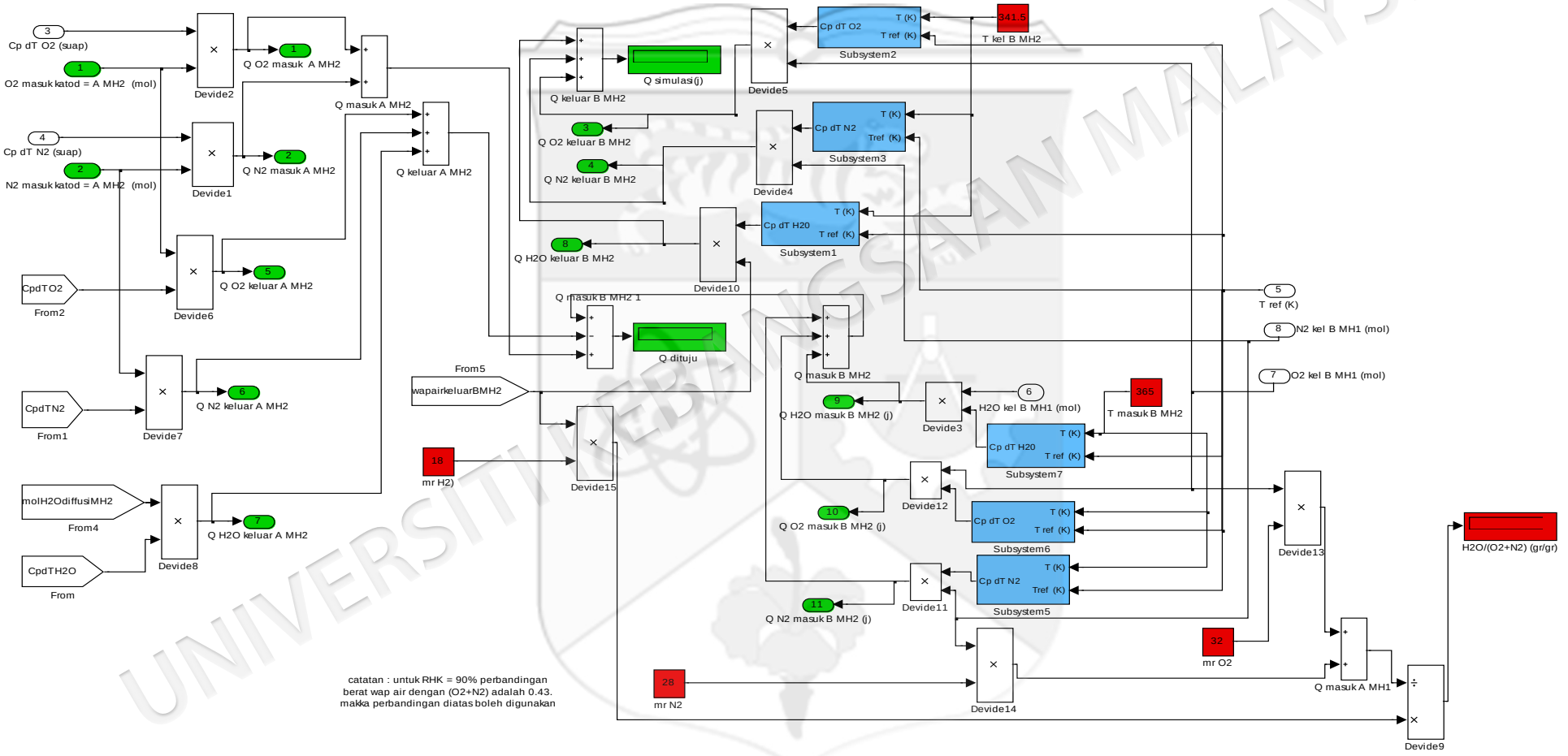
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.7 SUB SISTEM 2



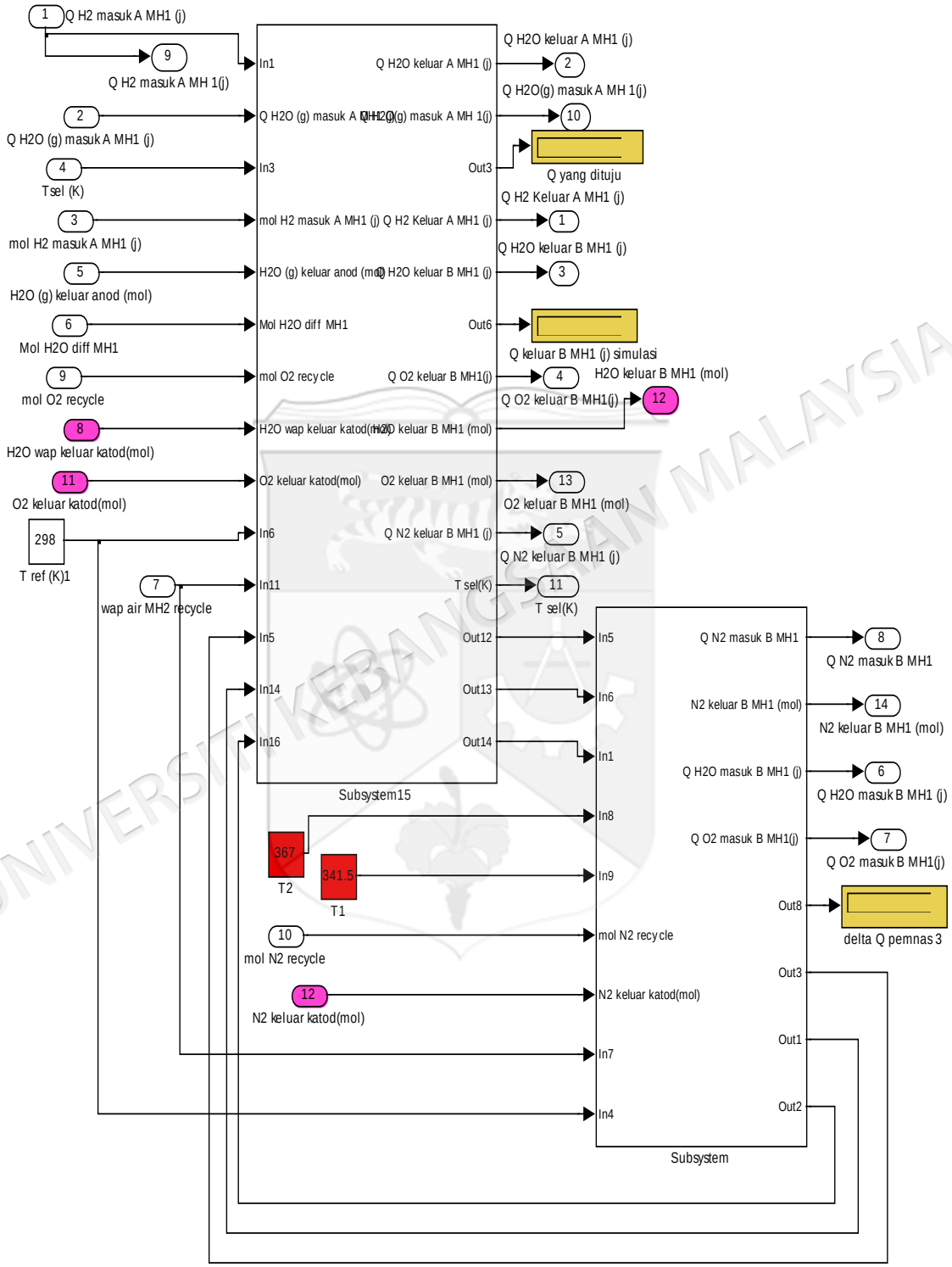
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.8 PERPINDAHAN HABA PADA PELEMBAPAN MEMBRAN 2



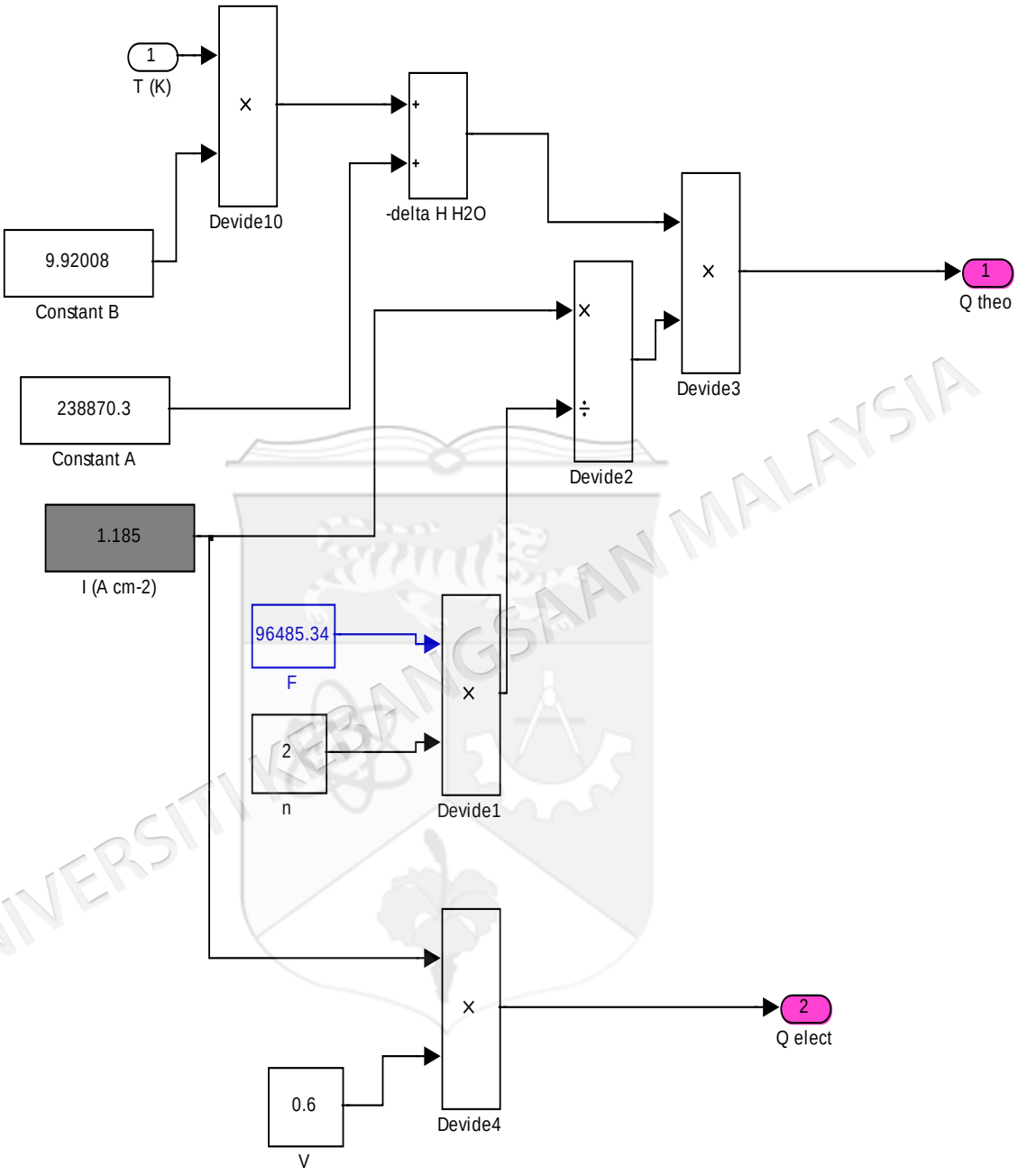
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.9 PERPINDAHAN HABA PADA PELEMBAPAN MEMBRAN 1



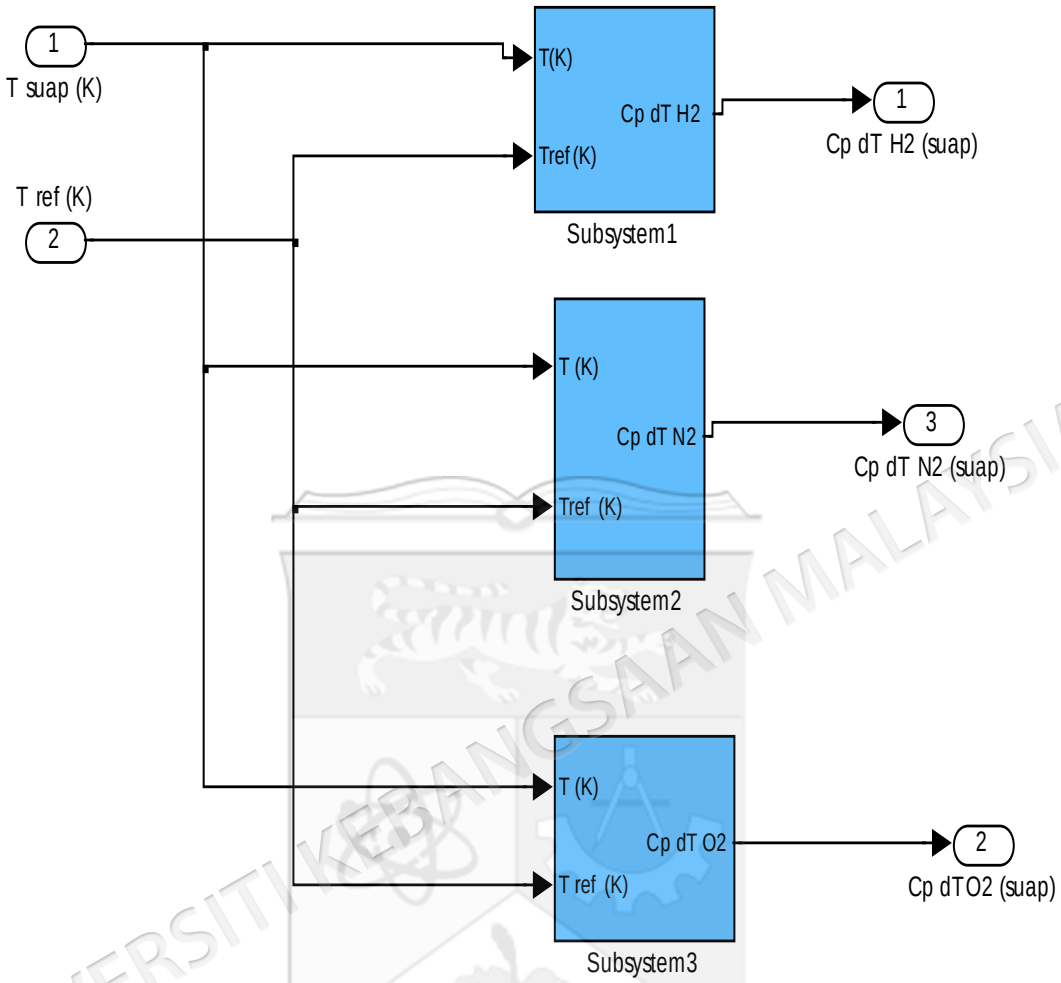
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.10 HABA TEORITIS



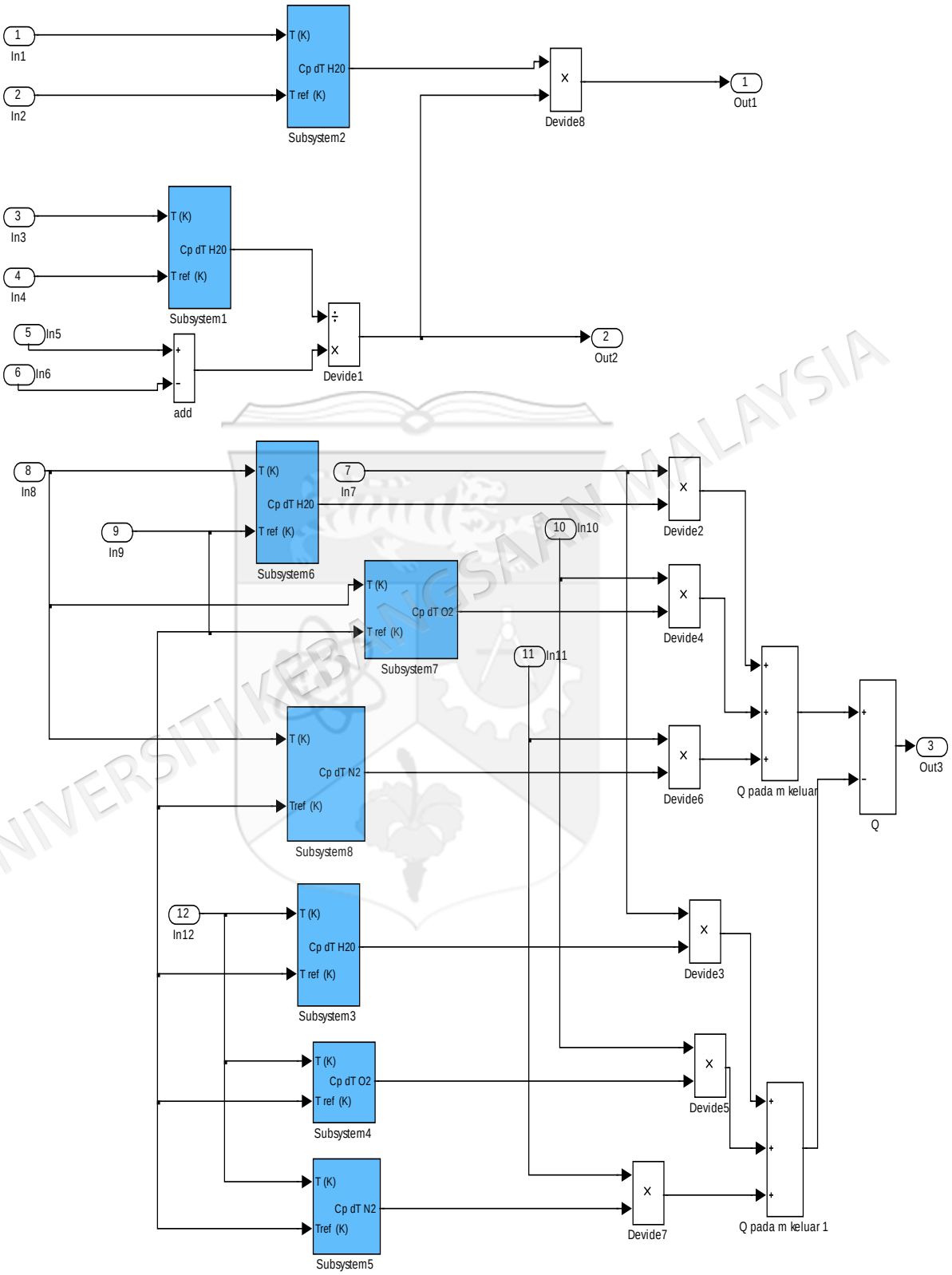
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

B.11 KAPASITAS HABA



UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

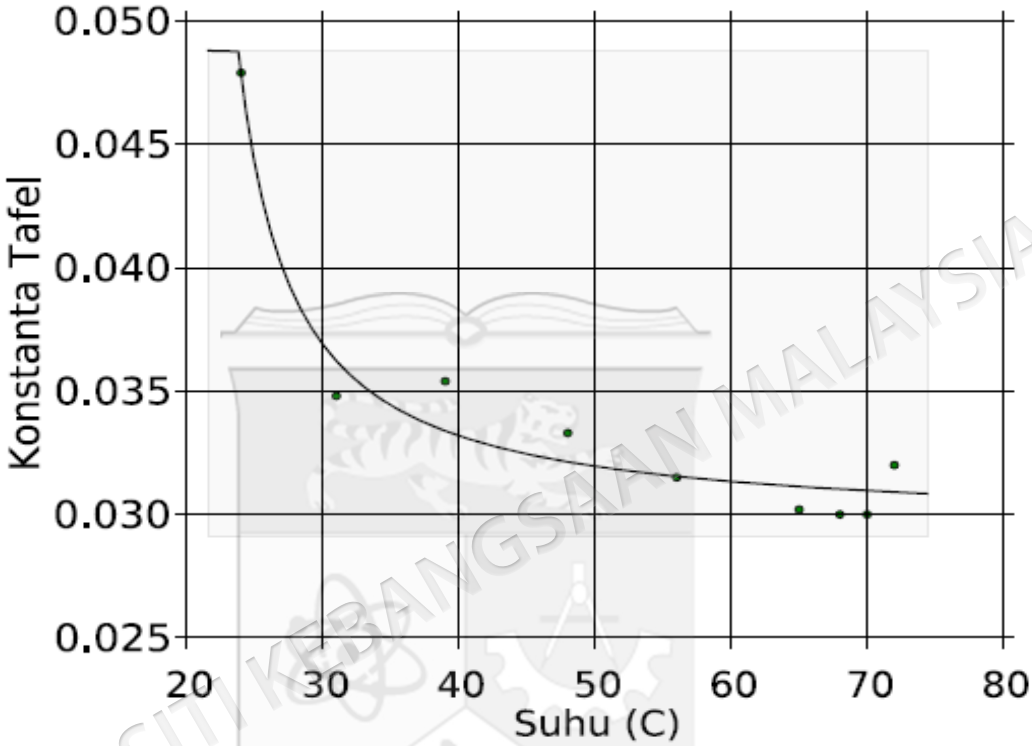
B.12 HABA YANG DIPEROLEH



UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

LAMPIRAN C

PEKALI TAFEL



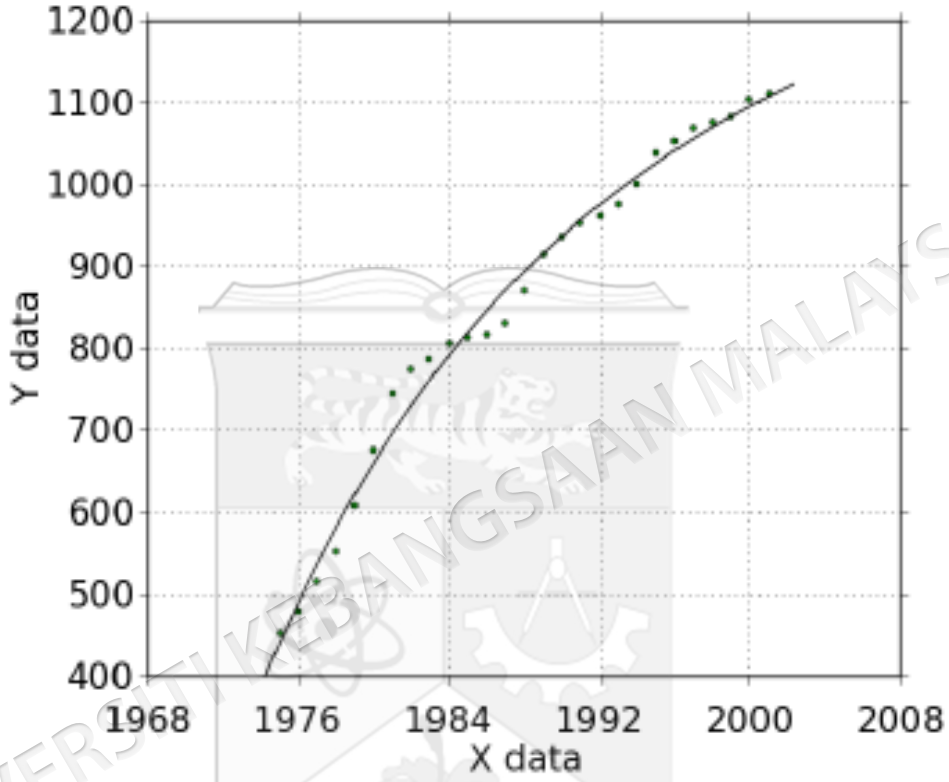
Coefficients

y = a * exp(b/(x+c))
Fitting target of sum of squared absolute error = 1.1501697247885897E-05
a = 2.9479975146468732E-02
b = 2.5117446856572920E+00
c = -1.8804725793183710E+01

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

LAMPIRAN D

INDEKS KOS MARSAL DAN SWIFF



UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

Coefficients

y = a * exp(b/(x+c))

Fitting target of lowest sum of squared absolute error = 1.1285577450543009E+04

a = 1.6542650334329583E+03
b = -1.4972440860305040E+01
c = -1.9637156002623042E+03