

**KESAN SALUTAN MXENE DAN STRUKTUR
MIKRO BIOMIMETIK TERHADAP PRESTASI
PENJANA NANO TRIBOELEKTRIK
TITISAN AIR**

FIRDAUS JAMAL RASHID

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

KESAN SALUTAN MXENE DAN STRUKTUR MIKRO BIOMIMETIK
TERHADAP PRESTASI PENJANA NANO TRIBOELEKTRIK
TITISAN AIR

FIRDAUS JAMAL RASHID

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH
IJAZAH DOKTOR FALSAFAH

INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2026

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 01	Tarikh Kuat Kuasa: 01/04/2024
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS SELEPAS PEMBETULAN <i>Form and Check List of Amended Thesis Submission</i>		

G. PERAKUAN TESIS SARJANA / DOKTOR FALSAFAH (CERTIFICATION OF MASTERS / DOCTORAL THESIS)			
Nama penuh pengarang (Author's Full Name)	FIRDAUS BIN JAMAL RASHID		
No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)	P118428	Sesi Akademik (Academic Session)	Sem 1 Sesi 2025/2026
Tajuk Tesis (Thesis Title)	KESAN SALUTAN MXENE DAN STRUKTUR MIKRO BIOMIMETIK TERHADAP PRESTASI PENJANA NANO TRIBOELEKTRIK TITISAN AIR		

Merujuk kepada Klausa 4.2 Dasar Harta Intelek Pelajar UKM (Tambahan), tesis adalah hak milik pelajar. Saya mengaku tesis ini sebagai (*Tandakan ✓ bagi maklumat yang berkaitan):
 (With regard to Clause 4.2 of the UKM Student Intellectual Property Policy (Supplementary), the thesis is the student's property. I hereby declare this thesis as (*Mark ✓ on relevant information):

- ☐ ***RAHSIA (CONFIDENTIAL)** Mengandungi maklumat rahsia di bawah AKTA RAHSIA RASMI 1972
 (Consisting of classified information under the OFFICIAL SECRETS ACT 1972)
- ☐ ***TERHAD (RESTRICTED)** Mengandungi maklumat TERHAD yang telah ditentukan oleh organisasi/ badan di mana penyelidikan dijalankan
 (Consisting of RESTRICTED information which has been determined by the organization/ body where the research was conducted)
- ☒ ***AKSES TERBUKA/ TIDAK TERHAD (OPEN ACCESS/ NON-RESTRICTED)** Saya membenarkan tesis ini diterbitkan secara akses terbuka, teks penuh atau dibuat salinan untuk tujuan pengajian, pembelajaran, penyelidikan sahaja.
 (I allow this thesis to be published through open access, full text or copied for study, learning and research purposes only)

Bagi kategori Akses Terbuka / Tidak Terhad, saya membenarkan tesis (Sarjana / Doktor Falsafah) ini di simpan di Perpustakaan Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)* dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut:

(For the Open Access / Non-Restricted category, I allow this (Master's / Doctoral) Thesis to be kept in the Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) Library with the following usage conditions:)

- Perpustakaan UKM mempunyai hak untuk membuat salinan untuk tujuan pengajian, pembelajaran, penyelidikan sahaja.
 (UKM Library has the right to reproduce the thesis for study, learning and research purposes only.)
- Perpustakaan Universiti Kebangsaan Malaysia dibenarkan membuat satu (1) salinan tesis ini untuk tujuan pertukaran antara institusi pengajian tinggi dan mana-mana badan/ agensi kerajaan, tertakluk kepada terma dan syarat.
 (UKM Library is allowed to make one (1) copy of this thesis for exchange purposes among higher education institutions and any government body/agency, subject to terms and conditions.)

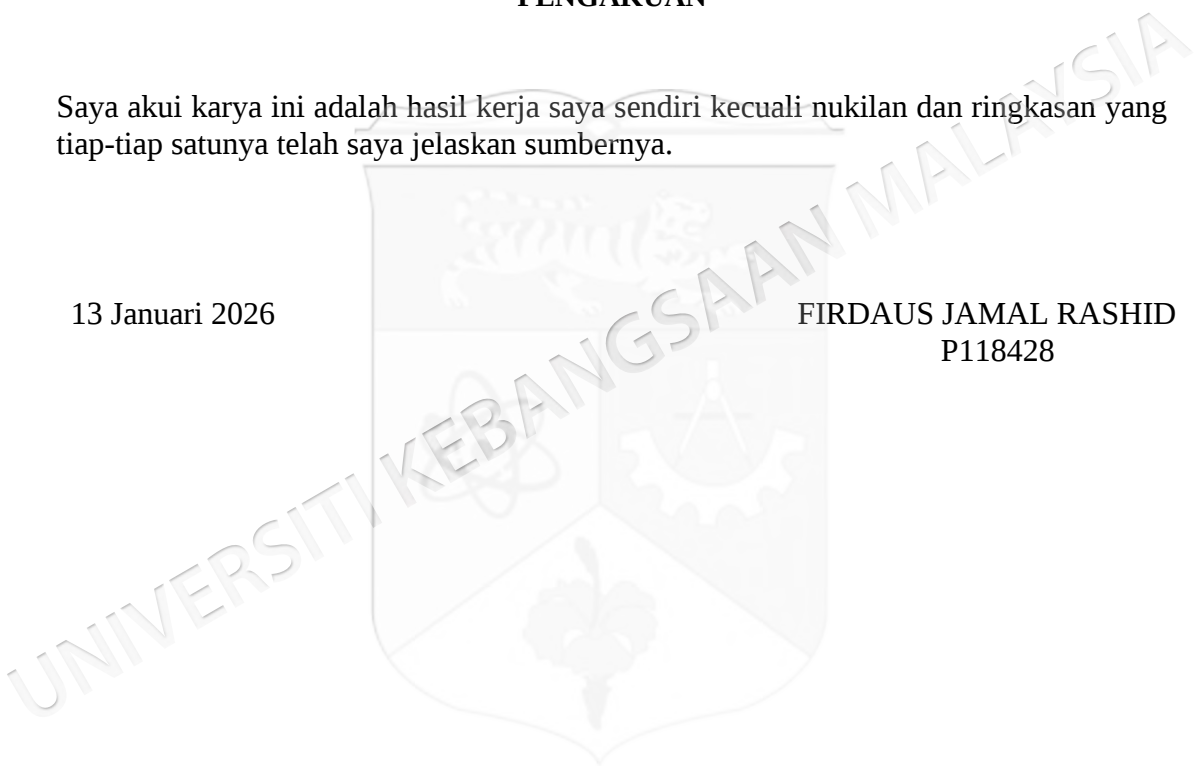
PENGESAHAN PELAJAR (STUDENT VERIFICATION)	PENGESAHAN PENYELIA (SUPERVISOR VERIFICATION)
 TANDATANGAN PELAJAR (STUDENT'S SIGNATURE)	 TANDATANGAN PENYELIA / PENERUSI JK SISWAZAH (SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON SUPERVISION COMMITTEE SIGNATURE)
Kad Pengenalan / : 950829-10-6827 No. Pasport (Identity Card / Passport No.)	Nama Penyelia/ Pengerusi JK Siswazah (Supervisor's / Chairperson Supervision Committee Name)
Tarikh: 19/12/2025 (Date)	Prof. Madya Ir. Dr. Abang Annuar Ehsan Tarikh: 7/1/2026 (Date)

PENGAKUAN

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

13 Januari 2026

FIRDAUS JAMAL RASHID
P118428



PENGHARGAAN

Segala puji bagi Allah S.W.T. dengan rahmat serta limpah kurnia-Nya saya dapat menyiapkan tesis penyelidikan ini dengan baik. Syukur kehadiran Ilahi kerana dikurniakan kesihatan yang baik, kesempatan dan kelapangan masa kepada saya bagi menyempurnakan penyelidikan ini.

Jutaan terima kasih diucapkan kepada penyelia utama saya iaitu Prof. Madya Ir. Dr. Abang Annuar Ehsan di atas bantuan, sokongan, dan bimbingan yang diberikan kepada saya sepanjang tempoh pengajian saya. Tidak dilupakan juga Dr. Muhammad Aniq Shazni Mohammad Haniff selaku penyelia bersama saya diatas dorongan dan bantuan yang dihulurkan kepada saya dari awal hingga akhir penyelidikan ini. Terima kasih juga diucapkan buat staf-staf sokongan IMEN, pegawai sains serta jurutera dan penolong jurutera yang banyak menolong sepanjang saya menjalankan eksperimen di makmal Photonics, OPEL, dan Lab-on-Chip. Setinggi-tinggi penghargaan turut diucapkan kepada I-CRIM dan Micro Precision Machining Sdn. Bhd. atas sokongan teknikal, kemudahan, serta kerjasama yang diberikan sepanjang proses fabrikasi dan pelaksanaan penyelidikan ini. Akhir sekali, jutaan terima kasih yang tidak terhingga buat ibu bapa tercinta, isteri anak tersayang, keluarga, dan rakan yang disayangi di atas bantuan, sokongan, semangat yang diberikan serta doa yang tidak putus demi melihat kejayaan ini.

ABSTRAK

Fenomena perubahan iklim merupakan isu global di seluruh dunia yang telah memberikan kesadaran manusia terhadap kepentingan alam sekitar. Perkara ini menyebabkan permintaan terhadap tenaga hijau semakin meningkat untuk menggantikan bahan api konvensional yang merupakan punca utama pencemaran alam sekitar. Penjana nano triboelektrik berasaskan titisan air merupakan salah satu alternatif yang berpotensi bagi memperoleh tenaga yang lebih bersih. Walau bagaimanapun, terdapat cabaran dalam memperoleh prestasi yang baik pada peranti TENG seperti keupayaan memerangkap cas, mempercepatkan penurunan air dan mengurangkan pembasahan pada permukaan peranti. Sehubungan itu, cabaran dari sudut reka bentuk juga sering kali dikaitkan dengan peranti TENG yang dihasilkan. Oleh itu, kajian ini telah meneroka pengaruh penggabungan MXene dan tekstur permukaan ke atas prestasi penjana nanoelektrik (TENG) berasaskan *polytetrafluoroethylene* (PTFE). MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) digunakan sebagai salutan bagi meningkatkan pemindahan cas pada peranti TENG melalui teknik salut putar, manakala pemesian CNC membentuk struktur biomimetik yang meningkatkan luas interaksi serta sifat hidrofobik antara titisan air dan permukaan. Hasil kajian menunjukkan bahawa salutan MXene pada komposisi 0.01wt% memberikan prestasi terbaik dengan voltan (14.2 V), arus (19.1 μA) dan kuasa (4.56 μW). Struktur biomimetik berbentuk tiang mikro turut menunjukkan peningkatan ketara berbanding struktur lain, dengan output 10.8 V, 13.7 μA dan 2.35 μW . Seterusnya, penggabungan salutan MXene (0.01wt%) dan struktur tiang mikro kemudian membuktikan terdapat peningkatan prestasi yang lebih signifikan. Gabungan ini menunjukkan bahawa penjanaan tenaga dapat dipertingkatkan dengan lebih berkesan berbanding teknik salutan MXene dan kaedah CNC secara individu. Penggabungan kedua-dua teknik ini menghasilkan output penjanaan sebanyak 16.4 V, 22.5 μA dan 6.33 μW . Keputusan ini menunjukkan peningkatan prestasi yang ketara, dengan penjanaan kuasa meningkat sehingga 276% berbanding penggunaan kaedah secara individu. Peranti ini kemudian di uji dengan empat medium air yang berbeza dan mendapati peranti ini mampu di aplikasikan pada persekitaran NaCl 0.9%, air hujan dan juga air paip bagi memperoleh prestasi yang efisien. Kesimpulannya, kajian ini menunjukkan salutan MXene dan permukaan struktur mikro dapat meningkatkan kecekapan dan prestasi TENG dalam penuaian tenaga titisan air. Penemuan ini menunjukkan potensi yang cerah dalam kaedah penjanaan tenaga melalui titisan air dan berpotensi memberikan sumber kuasa yang lebih cekap dan mampan.

EFFECT OF MXENE COATING AND BIOMIMETIC MICROSTRUCTURE ON THE PERFORMANCE OF A WATER DROPLET TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR

ABSTRACT

The phenomenon of climate change is a global issue that has raised human awareness of the importance of the environment. This has led to an increasing demand for green energy to replace conventional fuels which are the primary cause of environmental pollution. Water droplet-based triboelectric nanogenerators (TENG) are one of the promising alternatives for obtaining cleaner energy. However, challenges remain in achieving optimal performance in TENG devices, such as enhancing charge trapping capability, accelerating water droplet detachment, and reducing surface wetting. Additionally, challenges from a design point of view are also often associated with the fabrication of TENG devices. Therefore, this study explores the influence of MXene integration and surface texturing on the performance of polytetrafluoroethylene (PTFE)-based triboelectric nanogenerators (TENG). MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) was used as a coating to enhance charge transfer in TENG devices through a spin-coating technique, while CNC machining created biomimetic structures that increased the interaction area and the hydrophobic properties between water droplets and the surface. The study results show that the MXene coating at a 0.01 wt% composition achieved the best performance, with a voltage of (14.2 V), a current of (19.1 μA), and a power output of (4.56 μW). The micro-pillar biomimetic structure also demonstrated a significant improvement compared to other structures, with an output of 10.8 V, 13.7 μA , and 2.35 μW . Subsequently, the combination of the MXene coating (0.01 wt%) and the micro-pillar structure demonstrated a more significant performance enhancement. This integration indicates that energy generation can be improved more effectively compared to using the MXene coating or the CNC method individually. The combined approach produced an output of 16.4 V, 22.5 μA , and 6.33 μW . The results show a remarkable improvement in performance, with power generation increasing by up to 276% compared to the use of individual methods. This device was then tested with four different water mediums and found that this device can be applied in an environment of NaCl 0.9%, rainwater and also tap water to obtain an efficient performance. In conclusion, this study demonstrates that MXene coating and microstructure surfaces enhance the efficiency and performance of TENG for water droplet energy harvesting. These findings highlight the promising potential of water droplet-based energy generation as a more efficient and sustainable power source.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	x
SENARAI ILUSTRASI	xi
SENARAI SIMBOL	xvii
SENARAI SINGKATAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Penyataan Masalah	6
1.3 Objektif	9
1.4 Skop Kajian	9
1.5 Organisasi Tesis	11
BAB II KAJIAN KEPUSTAKAAN	
2.1 Pendahuluan	13
2.2 Penuaian Tenaga	14
2.2.1 Penjana Nano	19
2.2.2 Triboelektrik	22
2.2.3 TENG Berasaskan Titisan Air	28
2.3 Bahan Tribo	32
2.3.1 Polytetrafluoroetilene (PTFE)	36
2.4 Bahan Nano	39

2.4.1	Bahan Dua Dimensi	40
2.4.2	MXene	42
2.5	Penstrukturan Permukaan	45
2.5.1	Kekasaran Permukaan	46
2.5.2	Pemesinan Mikro	50
2.6	Biomimetik	52
2.7	Aplikasi TENG Berasaskan Titisan Air	55
2.8	Rumusan	56
 BAB III KAEDAH PENYELIDIKAN		
3.1	Pendahuluan	59
3.1.1	Kesahan Dan Kebolehpercayaan	61
3.1.2	Pensampelan	62
3.2	Kajian Filem Komposit PTFE/MXene	62
3.2.1	Bahan-bahan Penyediaan	63
3.2.2	Konfigurasi Elektrod Pada Peranti TENG	66
3.2.3	Proses Salutan Komposit PTFE/MXene	68
3.2.4	Pencirian Salutan Komposit PTFE/MXene	70
3.3	Fabrikasi Struktur Mikro Biomimetik	74
3.3.1	Kajian Permukaan Alam Semula Jadi dan Pengiraan Luas Permukaan	74
3.3.2	Proses Pemesinan Struktur Mikro Biomimetik	77
3.3.3	Pencirian Struktur Permukaan Peranti	78
3.4	Kajian Pengukuran Prestasi TENG Dengan Kombinasi Salutan PTFE/MXene dan Struktur Mikro Terhadap Pelbagai Medium Air	78
3.4.1	Ujian Mengukur Voltan	79
3.4.2	Ujian Mengukur Arus	80
3.4.3	Ujian Mengukur Kuasa	82
3.4.4	Pencirian Medium Air	83

3.5	Rumusan	83
-----	---------	----

BAB IV FABRIKASI PERANTI TENG DAN SALUTAN PTFE/MXENE DENGAN PARAMETER DAN KOMPOSISI YANG BERBEZA

4.1	Pendahuluan	86
4.2	Fabrikasi Peranti	87
4.2.1	Kesan Perbezaan Konfigurasi Elektrod	87
4.2.2	Kesan Perbezaan Bahan Elektrod	92
4.2.3	Kesan Perbezaan Saiz Elektrod	96
4.2.4	Kesan Perbezaan Ketebalan PTFE	101
4.2.5	Rumusan Fabrikasi Peranti	105
4.3	Pencirian Campuran dan Salutan PTFE/MXene	106
4.3.1	Analisis FTIR Bagi Melihat Ikatan Di Antara PTFE dan MXene	107
4.3.2	Ujian Ketebalan dan Morfologi Salutan	111
4.3.3	Ujian Taburan Saiz Zarah	114
4.3.4	Ujian Pembelauan Sinar-X (XRD)	116
4.3.5	Ujian Sudut Sentuhan	119
4.4	Ujian Tribo Salutan PTFE/MXene Pada Peranti TENG	122
4.5	Rumusan	130

BAB V FABRIKASI STRUKTUR BIOMIMETIK PADA PERANTI TENG DAN FABRIKASI STRUKTUR MIKRO BERSALUT PTFE/MXNE SERTA UJIAN TERHADAP MEDIUM AIR YANG BERBEZA

5.1	Pendahuluan	131
5.2	Teori Luas Permukaan Dua Struktur Biomimetik	132
5.2.1	Pengiraan Luas Permukaan Tanpa Struktur (LPTS)	132
5.2.2	Pengiraan Luas Permukaan Dengan Struktur Alur (LPSA)	133
5.2.3	Pengiraan Luas Permukaan Dengan Struktur Tiang	134

	Nano (LPTA)	
5.2.4	Perbandingan Teori Perbezaan Luas Permukaan Struktur Biomimetik Yang Dihasilkan	136
5.3	Struktur Morfologi Permesinan Mikro	137
5.4	Ujian Sudut Sentuhan	139
5.5	Ujian Ciri Interaksi Air	142
5.6	Ujian Triboelektrik Terhadap Struktur Yang Berbeza	145
5.7	Ujian Terhadap Kombinasi Salutan PTFE/MXene dan Struktur Pemesinan Mikro	149
5.7.1	Perbandingan Sudut Sentuhan Terhadap Rawatan Permukaan	152
5.7.2	Perbandingan Ujian Triboelektrik Terhadap Rawatan Permukaan	154
5.8	Ujian Terhadap Empat Medium Air Yang Berbeza	159
5.8.1	Ujian XRF Terhadap Kandungan Medium Air Yang Berbeza	159
5.8.2	Ujian Triboelektrik Terhadap Medium Air Yang Berbeza	161
5.9	Perbandingan Prestasi Penjanaan Tenaga Dengan Kajian Lepas	167
5.10	Rumusan	168
BAB VI	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
6.1	Kesimpulan	171
6.2	Sumbangan Kajian Terhadap Bidang Penjana Nano Triboelektik Titisan Air	173
6.3	Cadangan Kajian Lanjutan	174
RUJUKAN		175

LAMPIRAN

Lampiran A	Senarai Penerbitan	190
Lampiran B	Reka bentuk Permesinan Struktur Mikro Biomimetik	191



SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 2.1	Kajian penggunaan bahan 2D dalam peranti TENG	42
Jadual 2.2	Kajian penggunaan bahan MXene dalam peranti TENG	44
Jadual 2.3	Kajian penggunaan CNC dalam meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik	51
Jadual 2.4	Kesan penjanaan voltan dan arus terhadap kaedah fabrikasi peranti TENG yang berbeza	58
Jadual 3.1	Rumusan parameter fabrikasi peranti	84
Jadual 3.2	Rumusan parameter ujian penjanaan tenaga	85
Jadual 4.1	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap konfigurasi elektrod yang berbeza	90
Jadual 4.2	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap kombinasi bahan elektrod yang berbeza	94
Jadual 4.3	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap panjang positif elektrod yang berbeza	98
Jadual 4.4	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap ketebalan substrat PTFE yang berbeza	102
Jadual 4.5	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza	127
Jadual 5.1	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap struktur biomimetik yang berbeza	147

Jadual 5.2	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap rawatan permukaan yang berbeza	156
Jadual 5.3	Analisis XRF terhadap medium air yang digunakan	160
Jadual 5.4	Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap medium air yang berbeza	163
Jadual 5.5	Ringkasan dan perbandingan tenaga triboelektrik dan kaedah penjanaanya melalui titisan air	168



SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 1.1	Lukisan skimetik penuaian tenaga melalui titisan air	2
Rajah 1.2	Lukisan skimetik bagaimana peranti TENG memperoleh tenaga melalui titisan air	3
Rajah 1.3	Gambar Skimetik bagi pendekatan penggunaan bahan 2D dan reka bentuk permukaan biomimetik	4
Rajah 1.4	Skop kajian tesis dalam penyelidikan terhadap penjana nano triboelektrik titisan	11
Rajah 2.1	Penderia tanpa wayar yang dikuasakan dengan teknik penuaian tenaga	16
Rajah 2.2	Prinsip kerja (a) sel fotovoltai, (b) piezoelektrik, (c) termoelektrik dan (d) tenaga RF	18
Rajah 2.3	Ilustrasi skimetik sistem berkuasa sendiri menggunakan tenaga yang dituai dengan TENG	20
Rajah 2.4	Jenis penjana nano dan aplikasinya dalam <i>Internet of things</i> (IoT)	20
Rajah 2.5	Skimetik awan elektron, model penghasilan potensi elektrik dan pemindahan atom apabila dua bahan terpisah dan bersentuhan rapat	23
Rajah 2.6	Skimetik menggambarkan kerja prinsip TENG dalam mod pemisah dan bersentuhan.	25
Rajah 2.7	Teknologi TENG menuai tenaga daripada pelbagai sumber yang berbeza. (A) Tenaga lautan (B) Tenaga mekanikal. (C) Tenaga bunyi (D) Tenaga angin	27
Rajah 2.8	Mekanisma penghasilan tenaga elektrik dalam TENG titisan air melalui sentuhan antara air dan permukaan. i) Titisan air bercas tribo jatuh di atas permukaan. ii) Titisan bersentuhan dengan permukaan. iii) Titisan merebak di atas permukaan.	29

iv) Titisan melantun semula. v) Titisan menggelongsor ke bawah. vi) Titisan meninggalkan permukaan

Rajah 2.9	Kaedah fabrikasi LL-TENG melalui pemendapan Au di bahagian daun teratai semula jadi dan LL-TENG dilekatkan di bahagian luar bangunan dan terdedah kepada persekitaran untuk ujian lapangan	31
Rajah 2.10	Gambar skimetik peranti tribo berasaskan titisan air dengan rawatan permukaan menjana elektrik pada waktu hujan	32
Rajah 2.11	Siri bahan triboelektrik	36
Rajah 2.12	Molekul PTFE	37
Rajah 2.13	Ilustrasi skimetik klasifikasi bahan nano berdasarkan kriteria yang berbeza	39
Rajah 2.14	Struktur molekul yang mewakili bahan 2D	41
Rajah 2.15	Imej SEM MXene (a) sebelum dan selepas proses punaran menggunakan asid hidrofluorik selama (b) 2 jam, (c) 10 jam dan (d) 20 jam	43
Rajah 2.16	Model <i>Young</i> , <i>Wenzel</i> , dan <i>Cassie-Baxter</i>	47
Rajah 2.17	Lukisan skimetik fenomena interaksi air <i>Wenzel</i> dan <i>Cassie-Baxter</i>	48
Rajah 2.18	Gambar skematik (a) super hidrofilik, (b) hidrofilik, (c) hidrofobik, dan (d) permukaan super hidrofobik dengan keadaan pembasahan yang berbeza	49
Rajah 2.19	Lima keadaan umum untuk permukaan anti-pembasahan (a) Keadaan <i>Wenzel</i> ; (b) Keadaan <i>Cassie-Baxter</i> ; (c) Keadaan <i>Wenzel-Cassie</i> ; (d) keadaan “teratai”; (e) keadaan Tokek (<i>gecko</i>) dan beberapa fenomena sifat anti-pembasahan yang biasa dilihat pada alam semula jadi (f) kelopak bunga; (g) rama-rama; (h) ayak-ayak (<i>Strider</i>) (i) daun teratai; (j) Tokek (<i>gecko</i>)	52
Rajah 2.20	Imej (a) SEM permukaan daun padi, (b) ialah titisan air pada permukaan daun padi, (c) Geometri dan paksi koordinat permukaan biomimetik daun padi yang dikaji dan simulasi	53

(d) Pandangan permukaan seranjang dan selari untuk orientasi pengukuran sudut sentuhan.

Rajah 2.21	Imej SEM struktur berskala mikro/nano hierarki permukaan sayap pelbagai serangga dan tumbuhan di mana (a, b) <i>Homoptera Meimuna opalifera</i> (Walker), (c, d) <i>Orthoptera Acrida Cinerea cinerea</i> (Thunberg), (e, f) <i>Hymenoptera Vespa dybowskii</i> (Andre), dan (g, h) pada tumbuhan daun keladi	54
Rajah 2.22	Hubungan pemboleh ubah	56
Rajah 3.1	Carta alir metodologi kajian	60
Rajah 3.2	Lukisan skimetik bagi peranti TENG yang dihasilkan	63
Rajah 3.3	Struktur formula kimia bagi <i>polytetrafluoroethylene</i> (PTFE).	64
Rajah 3.4	(a) <i>polytetrafluoroethylene</i> (PTFE) dengan 60 wt% penyebaran dalam H ₂ O dan (b) Kepingan PTFE	65
Rajah 3.5	(a) Serbuk dan (b) Formula struktur kimia bagi hirofobik MXene	66
Rajah 3.6	Perbezaan kaedah konfigurasi elektrod yang digunakan (a) Elektrod disusun secara selari di bawah PTFE dan (b) Elektrod di susun secara sandwic.	67
Rajah 3.7	Larutan komposit MXene dengan komposisi 0.01 wt%, 0.05 wt% dan 0.1wt%	69
Rajah 3.8	(a) Salut Putar (b) NAPCO Ketuhar Vakum model 5831	69
Rajah 3.9	Proses fabrikasi filem PTFE/MXene bagi menghasilkan peranti penjana nano titisan air	70
Rajah 3.10	Kaedah pengambilan bacaan taburan saiz zarah melalui perisian ImageJ	71
Rajah 3.11	Proses pengambilan bacaan sudut sentuhan melalui perisian ImageJ	72

Rajah 3.12	Merujuk kepada (a) gambaran skimetik bagi ujian titisan air dan (b) gambaran keseluruhan susunan operasi bagi ujian titisan air pada peranti .	73
Rajah 3.13	Lukisan skimetik sudut jatuhan air ketika ujian dijalankan	73
Rajah 3.14	Struktur permukaan (a) Daun Padi dan (b) Daun keladi	75
Rajah 3.15	Lukisan skimetik reka bentuk biomimetik (a) stuktur alur dan (b) struktur tiang mikro	76
Rajah 3.16	Gambar skimetik kaedah pemesanan kawalan berangka komputer (CNC)	77
Rajah 3.17	Ujian pengukuran voltan penuaian tenaga	80
Rajah 3.18	Ujian pengukuran arus penuaian tenaga	81
Rajah 3.19	Rajah skimetik litar pengukuran arus	82
Rajah 4.1	Perbezaan konfigurasi elektrod yang digunakan (a) Elektrod di susu secara selari di bawah PTFE dan (b) Elektrod di susun secara sandwic	88
Rajah 4.2	Kesan perbezaan konfigurasi elektrod terhadap (a) Voltan dan (b) Arus	88
Rajah 4.3	Fenomena pemindahan cas titisan air pada konfigurasi B	90
Rajah 4.4	Fenomena pemindahan cas titisan air pada konfigurasi A	91
Rajah 4.5	Kombinasi bahan elektrod yang digunakan iaitu Al-Al, Cu-Cu, Al-Cu	92
Rajah 4.6	Kesan perbezaan bahan elektrod terhadap (a) Voltan dan (b) Arus	93
Rajah 4.7	Perbezaan saiz elektrod iaitu 2 mm, 4mm, dan 6 mm pada positif kuprum dengan kombinasi Al-Cu yang digunakan.	97
Rajah 4.8	Kesan perbezaan saiz elektrod positif kuprum dengan kombinasi Al-Cu yang berbeza 2 mm, 4mm, dan 6 mm terhadap (a) Voltan dan (b) Arus.	98

Rajah 4.9	Fenomena pemindahan cas titisan air terhadap panjang elektrod positif yang berbeza	100
Rajah 4.10	Perbezaan ketebalan substrat PTFE iaitu 1 mm dan 2 mm yang di gunakan.	101
Rajah 4.11	Kesan perbezaan ketebalan PTFE (a) Voltan dan (b) Arus	102
Rajah 4.12	Fenomena pemindahan cas titisan air terhadap ketebalan substrat PTFE yang berbeza	104
Rajah 4.13	Lukisan skimetik bagi parameter peranti yang digunakan	105
Rajah 4.14	Plot FTIR bagi sampel larutan PTFE, PTFE/MXene 0.01%wt, PTFE/MXene 0.05wt%, and PTFE/MXene 0.1wt%	107
Rajah 4.15	Gambaran dekat regangan C-F pada panjang gelombang daripada 1500 cm^{-1} hingga 1200 cm^{-1}	109
Rajah 4.16	Gambaran dekat ikatan -OH pada panjang gelombang 1300 cm^{-1} sehingga 1400 cm^{-1}	110
Rajah 4.17	Gambaran dekat ikatan -OH pada panjang gelombang 3000 cm^{-1} sehingga 3500 cm^{-1} .	111
Rajah 4.18	Profil ketebalan salutan PTFE/Mxene menggunakan AFM	112
Rajah 4.19	Morfologi salutan (a) tanpa salutan, (b) PTFE/MXene 0.01%wt, (c) PTFE/MXene 0.05%wt dan (d) PTFE/MXene 0.1%wt	112
Rajah 4.20	Keputusan analisis taburan saiz zarah bagi komposit salutan PTFE/Mxene (a) 0.01wt%, (b) 0.5wt% dan (c) 0.1wt%	115
Rajah 4.21	Ujian XRD yang dijalankan pada salutan PTFE/MXene (0.01wt%, 0.05wt% dan 0.1wt%)	117
Rajah 4.22	Ujian sudut sentuhan di mana (a) tanpa salutan, (b) PTFE/MXene 0.01%wt, (c) PTFE/MXene 0.05%wt dan (d) PTFE/MXene 0.1%wt	120
Rajah 4.23	Plot ujian sudut sentuhan bagi komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza	121

Rajah 4.24	Keputusan ujian penjanaan voltan pada komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza (0.01%wt, 0.05%wt, 0.1%wt)	122
Rajah 4.25	Keputusan ujian penjanaan arus pada komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza (0.01%wt, 0.05%wt, 0.1%wt)	123
Rajah 4.26	Prestasi ambang bagi salutan PTFE/MXene: (a) Voltan, (b) Arus, dan (c) Kuasa	126
Rajah 5.1	Reka bentuk struktur alur	133
Rajah 5.2	Reka bentuk struktur tiang mikro	134
Rajah 5.3	Keputusan pengiraan luas permukaan terhadap struktur biomimetik yang berbeza	137
Rajah 5.4	Imej struktur biomimetik yang telah dihasilkan pada permukaan PTFE (a) struktur alur dan (b) struktur tiang mikro dengan menggunakan kaedah CNC	138
Rajah 5.5	Imej struktur biomimetik pada kadar pembesaran 50x (a) struktur alur dan (b) struktur tiang mikro	139
Rajah 5.6	Imej ujian sudut sentuhan (a) Struktur alur, (b) Struktur tiang mikro, (c) Tanpa struktur	140
Rajah 5.7	Plot ujian sudut sentuhan pada struktur mikro yang berbeza	141
Rajah 5.8	Imej ciri hidrofobisiti <i>Wenzel</i> di atas permukaan (a-b) Struktur alur mikro, (c-d) Struktur tiang mikro	143
Rajah 5.9	Ciri interaksi air dan ion pada permukaan	145
Rajah 5.10	Keputusan ujian penjanaan (a) Voltan dan (b) Arus terhadap struktur mikro biomimetik yang dihasilkan	146
Rajah 5.11	Penjanaan tenaga pada permukaan berstruktur mikro	147
Rajah 5.12	Lukisan skimetik interaksi air dengan struktur biomimetik yang berbeza	148
Rajah 5.13	Lukisan skimetik struktur biomimetik di salut dengan salutan PTFE/MXene	150

Rajah 5.14	Imej salutan pada struktur biomimetik yang dihasilkan dengan kadar pembesaran 50x (a) tiang mikro tanpa salutan dan (b) struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%	150
Rajah 5.15	Gambar ciri (a) hidrofobisiti <i>Wenzel</i> di atas permukaan struktur mikro bersalut PTFE/MXene 0.01wt% dengan menggunakan mikroskop pada kadar pembesaran 50x dan (b) lukisan skimetik bagi interaksi tersebut	151
Rajah 5.16	Perbandingan rawatan permukaan terhadap sudut sentuhan (a) Struktur alur mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%, (b) Struktur tiang mikro, (c) Salutan PTFE/MXene 0.01wt% tanpa struktur mikro dan (d) PTFE tanpa struktur dan salutan	152
Rajah 5.17	Perbandingan sudut sentuhan yang terhasil dengan rawatan permukaan yang berbeza	153
Rajah 5.18	Keputusan ujian penjaan voltan pada rawatan permukaan yang berbeza (tanpa salutan, salutan PTFE/MXene 0.01wt%, struktur tiang mikro dan struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%)	155
Rajah 5.19	Keputusan ujian penjanaan arus pada rawatan permukaan yang berbeza (tanpa salutan, salutan PTFE/MXene 0.01wt%, struktur tiang mikro dan struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%)	156
Rajah 5.20	Keputusan ujian penjanaan voltan pada medium air yang berbeza (a) air laut, (b) NaCl 0.9%, (c) air hujan dan (d) air paip	162
Rajah 5.21	Keputusan ujian penjanaan arus pada medium air yang berbeza (a) air laut, (b) NaCl 0.9%, (c) air hujan, dan (d) air paip	162

SENARAI SIMBOL

Arus	I
Arus dengan fungsi masa	$I(t)$
Cas triboelektrik	Q
Cas elektrik dengan fungsi masa	$Q(t)$
Celsius	$^{\circ}\text{C}$
Darjah	$^{\circ}$
Dua kali ganda nilai sudut	2θ
Fluorin	$-F$
Fungsi kerja logam	Φ_M
hidroksida	$-\text{OH}$
Jarak pemisah	d
Jarak pemisah dengan fungsi masa	$d(t)$
Jejari	R
Jumlah tenaga neutral	E_{neutral}
Jumlah tenaga atom atau zarah	E_{anion}
Kawasan interaksi	A
Ketinggian	H
Keboleh dielektrik	ϵ
Kebolehtelapan ruang bebas	ϵ_0
Ketumpatan cas	O
Ketumpatan cas efektif	O_{eff}
Ketumpatan cas sebenar	O_0
Ketebalan lapisan dielektrik	d
Ketinggian penghalang schottky	Φ_B
Kemuatan	C
Kemuatan dengan fungsi masa	$C(t)$
Kilo ohm	$\text{k}\Omega$
Medan elektrik	E
MikroAmpere	μA
MikroAmpere	μA
mikroliter	μL

Mikrowatt	μW
Milimeter	mm
Mililiter	mL
Mililiter Per Minit	mL/min
Milimeter Per minit	mm/min
Milimeter persegi	mm^2
Milivolt	mV
NanoAmpere	nA
Nanowatt	nW
Nisbah kekasaran	r
Oksida	-O
Paras fermi	E_F
Peratusan	%
Perbezaan paras fermi	ΔE
Peratusan berat	wt%
Perintang	R
Pemalar dielektrik	ϵ_r
Pemalar terowongan	k
Pi	π
Potensi permukaan	Φ_S
Punca min kuasa dua voltan	V_{RMS}
puncak ke puncak voltan	V_{pp}
Purata Kuasa	P_{avg}
Putaran per minit	rpm
sentimeter	cm
Sentimeter salingan	cm^{-1}
Sianida	$-\text{C}\equiv\text{N}$
Sudut	θ
Sudut sentuhan permukaan kasar	θ_w
Sudut sentuhan tanpa kekasaran	θ_0
Voltan	V

SENARAI SINGKATAN

Air	H ₂ O
Afiniti elektron	EA
Aluminium	Al
Mikroskopi Daya Atom	AFM
<i>Boron nitride heksagon</i>	h-BN
<i>Computer-aided design</i>	CAD
<i>Computer-aided manufacturing</i>	CAM
Dua dimensi	2D
<i>Fluorinated ethylene propylene fluoropolymer</i>	FEP
Frekuensi radio	RF
generasi kelima	5G
<i>Internet of things</i>	IoT
Jawatankuasa Bersama Piawaian Belauan Serbuk	JCPDS
Karbon nanotube	CNT
Kekasaran purata	Ra
Kekasaran purata kuasa dua	Rq
Kosong dimensi	0D
Lapisan dwi-elektrik	EDL
<i>Lotus leaf Triboelektrik Nanogenrator</i>	LL-TENG
Luas Permukaan Dengan Struktur Alur	LPSA
Luas Permukaan Dengan Tiang Nano	LPTA
Luas Permukaan Tanpa Struktur	LPTS
Mikroskopi Imbasan Elektron Pancaran Medan	FESEM
Natrium	Na
Natrium Klorida	NaCl
Penulisan dakwat penuh	DIW
Penjana Nano Triboelektrik	TENG
Pembelauan Sinar-X	XRD
pemesinan kawalan berangka komputer	CNC
Pemesinan nyahcas elektrik	EDM

Pendarfluor Sinar-X	XRF
<i>Polydimethylsiloxane</i>	PDMS
<i>Polymethyl methacrylate</i>	PMMA
<i>Polytetrafluoroethylene</i>	PTFE
Punca min kuasa dua	RMS
Satu dimensi	1D
Silikon dioksida	SiO ₂
Mikroskopi Imbasan Elektron	SEM
Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier	FTIR
Kuprum	Cu
Tetrafluoetilene	TFE
Tiga dimensi	3D
Titanium dioksida	TiO ₂
<i>Transition metal dichalcogenides</i>	TMDs
Ujian sudut sentuhan air	WCA
Uranium	U
<i>Wireless fidelity</i>	Wi-Fi

BAB I

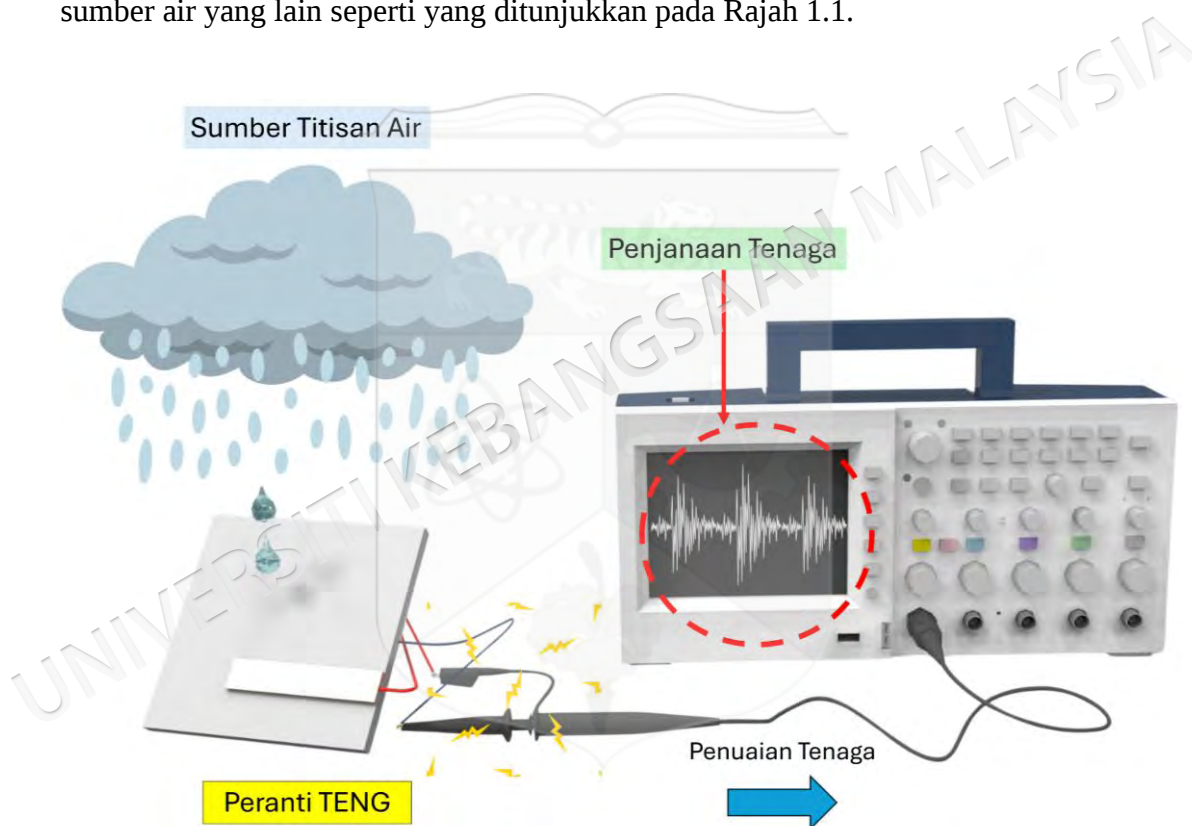
PENDAHULUAN

1.1 PENGENALAN

Dalam meniti arus kemodenan ini, isu perubahan iklim telah menjadi satu isu global diseluruh dunia kerana ia boleh memberi impak yang besar pada dunia seperti paras air laut tidak menentu, gempa bumi, banjir dan sebagainya (Tahir et al. 2023). Fenomena ini telah memberi kesedaran terhadap manusia tentang kepentingan alam sekitar. Terdapat banyak permintaan untuk menggunakan sumber tenaga yang bersih dan boleh diperbaharui untuk menggantikan sumber tenaga konvensional yang boleh mengakibatkan pencemaran pada alam sekitar (Arutyunov et al. 2017). Tenaga hijau atau tenaga boleh diperbaharui merupakan satu alternatif yang terbaik dan mempunyai harapan yang tinggi untuk menggantikan penggunaan bahan api konvensional seperti minyak petrol dan arang batu, yang merupakan punca utama pencemaran alam sekitar (Liu et al. 2020). Tenaga hijau ini dapat diperoleh daripada pelbagai sumber semula jadi seperti cahaya matahari (Kabir et al. 2018), angin (Willis et al. 2018), dan biojisim (Xu, Liao, et al. 2018) yang dianggap lebih stabil dan mesra alam daripada sumber tenaga konvensional.

Permintaan yang tinggi terhadap tenaga lestari telah membawa kepada pembangunan teknologi inovatif yang pesat bagi menjana tenaga semula jadi seperti daripada cahaya, angin, air dan getaran. Di antara teknologi ini, penjana nano merupakan salah satu teknologi yang dibangunkan sebagai satu alternatif yang menjanjikan penuaian tenaga yang boleh diperbaharui pada masa kini kerana keupayaannya untuk menukar tenaga daripada persekitaran kepada tenaga elektrik pada skala yang kecil (Kim et al. 2021). Penjana nano dibina dengan menggunakan pelbagai jenis bahan dan kaedah, termasuk reka bentuk, kaedah pembuatan dan pengunna bahan

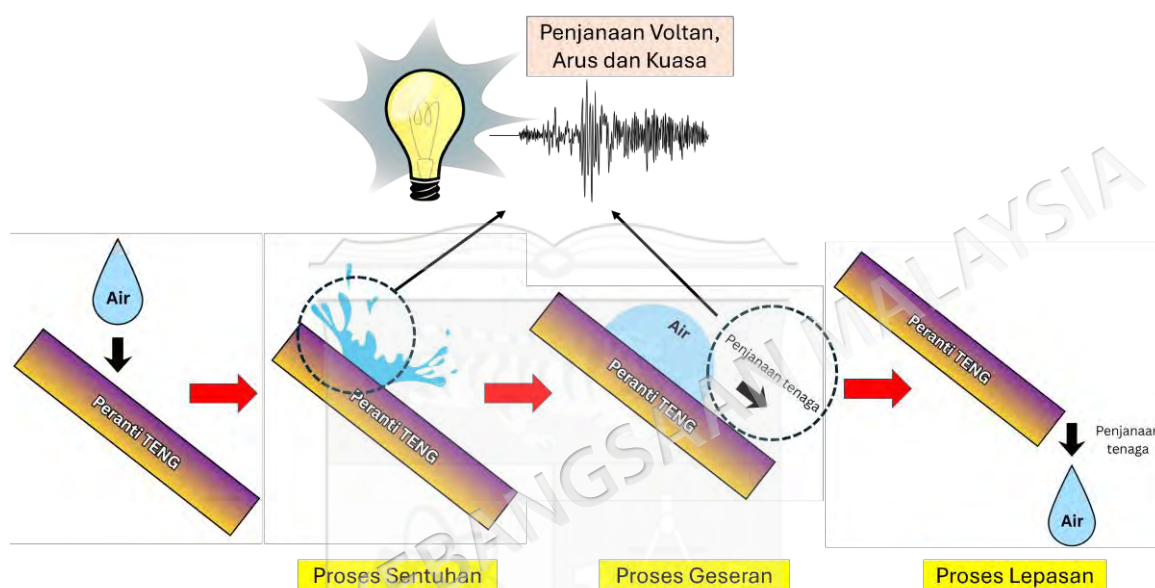
fabrikasi bagi membolehkan penuaian tenaga yang cekap dan optimum di capai di samping dapat meminimumkan kesan negatif terhadap alam sekitar (Khandelwal et al. 2020; Zi et al. 2021). Memandangkan permintaan terhadap penggunaan sumber tenaga yang stabil dan boleh diperbaharui terus meningkat, ramai penyelidik sedang meneroka teknologi baharu untuk penuaian tenaga yang boleh digunakan untuk mengaktifkan peranti elektronik yang kecil dan terdapat juga segelintir yang aplikasikan pada peranti yang lebih besar (Cheng et al. 2019). Penjana nano triboelektrik titisan air merupakan salah satu teknologi tenaga hijau yang digunakan untuk menjana elektrik iaitu dengan menggunakan gerakan daripada titisan air sama ada dari hujan, pemeluwapan atau sumber air yang lain seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1.1.



Rajah 1.1 Lukisan skematik penuaian tenaga melalui titisan air

Penjana nano triboelektrik atau *Triboelectric Nano Generators* (TENG) merupakan teknologi yang menjana elektrik melalui pemindahan elektron antara dua bahan yang bersentuhan antara satu sama lain. Fenomena ini dapat dilihat apabila dua bahan bersentuhan dan kemudian terpisah yang menyebabkan berlakunya pertukaran elektron diantara permukaan. Salah satu bahan akan memperoleh elektron yang menjadikannya bercas negatif, manakala satu lagi bahan yang kehilangan elektron akan

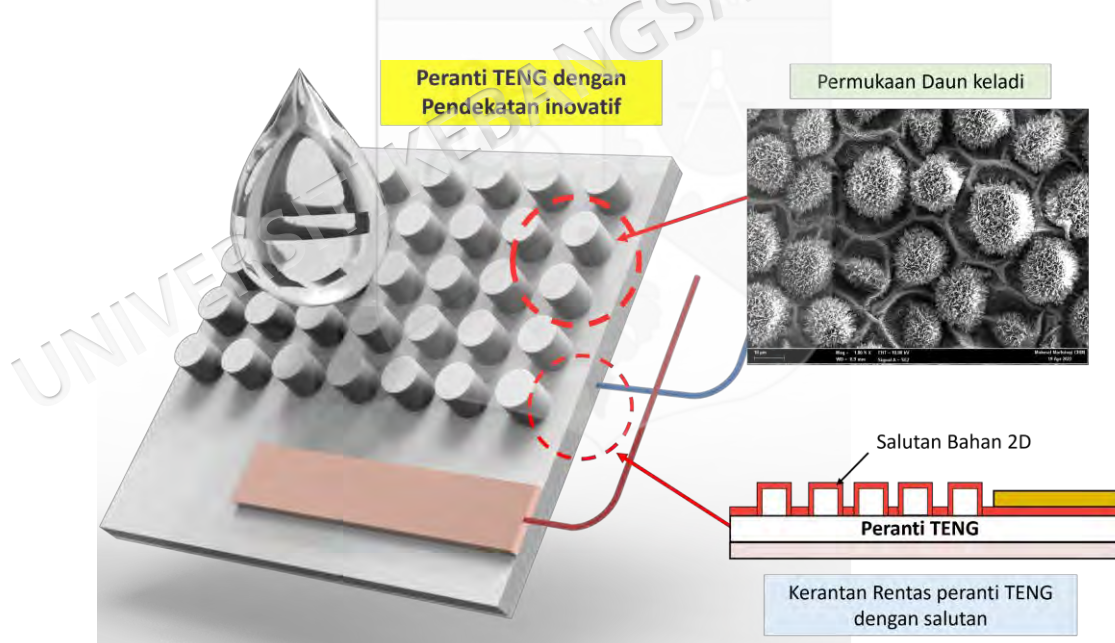
menjadikannya cas positif. Perbezaan cas yang terhasilkan ini akan mewujudkan potensi elektrik yang dapat digunakan sebagai penuaian tenaga (Yang et al. 2019). Penjana nano TENG yang dihasilkan telah menggunakan konsep teknologi ini untuk meraih penjanaan tenaga seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1.2. Bahan ini dapat menghasilkan tenaga elektrik melalui sentuhan dan geseran antara satu bahan dengan bahan yang lain.



Rajah 1.2 Lukisan skematik bagaimana peranti TENG memperoleh tenaga melalui titisan air

Bahan pepejal seperti *Polytetrafluoroethylene*(PTFE) dan air merupakan antara bahan yang boleh digunakan bagi memperoleh tenaga triboelektrik (Lee et al. 2019). Perkara ini disebabkan oleh PTFE memperoleh sifat Keelektronegatifan yang tinggi menyebabkan ia mempunyai kecekapan dalam penerimaan elektron yang baik daripada titisan air untuk menghasilkan tenaga. Terdapat dua jenis tenaga yang terhasil daripada titisan air, iaitu yang pertama tenaga tribo yang terhasil melalui sentuhan, gerakan dan geseran air apabila air bersentuhan dengan permukaan PTFE. Seterusnya, tenaga kedua ialah tenaga elektrostatik yang terhasil daripada pemindahan cas triboelektrik di antara lapisan PTFE dan titisan air yang dijana melalui sentuhan elektrifikasi ketika air bersentuhan dengan permukaan PTFE (Choi et al. 2014; Choi et al. 2013). Teknologi ini berpotensi untuk menyediakan tenaga yang stabil dan lebih cekap dalam meraih tenaga di kawasan yang mempunyai kadar titisan air yang tinggi.

Pada masa kini, penyelidikan dalam bidang penjana nano triboelektrik titisan air lebih tertumpu dalam meningkatkan kecekapan dan kestabilan teknologi, serta meneroka dalam aplikasi yang berpotensi dalam bidang tenaga hijau. Beberapa bidang utama penyelidikan termasuk mengoptimumkan reka bentuk, proses pembuatan, penggunaan bahan dan kaedah fabrikasi baharu untuk meningkatkan kecekapan penukaran tenaga, dan penerokaan aplikasi yang baharu seperti penjanaan tenaga dalam teknologi penderiaan melalui alam sekitar atau peranti elektronik kecil (Wu et al. 2021). Walaupun masih terdapat pelbagai cabaran untuk diatasi seperti kebolehskalaan, keberkesanan dan kos pembuatan penjana nano triboelektrik titisan air, namun penyelidikan dalam bidang ini berpotensi untuk merevolusikan cara penjanaan dan penggunaan tenaga yang lebih bersih. Kecekapan penuaian tenaga dalam teknologi ini dapat dipertingkatkan melalui beberapa pendekatan inovatif, termasuk penggunaan bahan dua dimensi (2D) serta penerapan reka bentuk permukaan biomimetik yang dihasilkan menggunakan proses pemesinan mikro berketepatan tinggi dalam pembangunan peranti TENG (Rajah 1.3).



Rajah 1.3 Gambar skematik bagi pendekatan penggunaan bahan 2D dan reka bentuk permukaan biomimetik

Reka bentuk biomimetik bagi meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik merupakan satu pendekatan berpotensi dalam pembangunan penjana nano triboelektrik berasaskan titisan air. Melalui pendekatan ini, permukaan TENG dirawat

agar memiliki struktur mikro yang lebih luas dan hidrofobik dengan meniru corak atau bentuk semula jadi yang terdapat pada permukaan biologi dalam alam sekitar. Reka bentuk ini melibatkan inspirasi daripada struktur mikro alam semula jadi dan diaplikasikan pada permukaan TENG bagi meningkatkan luas permukaan serta memperkukuh interaksi antara permukaan dan titisan air. Peningkatan sifat hidrofobik yang terhasil turut menyumbang kepada proses penjanaan tenaga yang lebih efisien. Kedua-dua fenomena ini membantu meningkatkan penghantaran cas antara peranti TENG dan titisan air (Meng, Zhang, et al. 2024). Selain itu, pemilihan dan penggunaan bahan seperti bahan 2D pada peranti triboelektrik juga adalah penting untuk membolehkan penjanaan tenaga dapat dihasilkan dengan lebih cekap apabila titisan air berinteraksi pada permukaan TENG.

Dalam kajian ini, luas permukaan TENG dipertingkatkan dengan meniru struktur alam semula jadi seperti struktur alur yang terdapat pada pokok padi dan struktur hierarki yang terdapat pada sayap serangga dan daun keladi yang diaplikasikan pada permukaan TENG dengan menggunakan kaedah pemesinan mikro (Barraza et al. 2022; Yoon et al. 2014). Kaedah ini merupakan satu alternatif yang lain bagi menggantikan proses konvensional iaitu foto litografi. Kaedah ini merupakan kaedah yang lebih murah serta dapat mengurangkan penggunaan bahan kimia berbanding kaedah konvensional. Teknik ini melibatkan pemotongan dan pengukiran pada bahan dengan menggunakan alat pemesinan bagi mengubah sifat fizikal sesuatu bahan (Chen et al. 2021; Dai et al. 2018). Dengan menggunakan kaedah pemesinan mikro, penyelidik bukan sahaja boleh mencipta peranti yang kecil, tetapi juga dapat menghasilkan struktur mikro yang sangat tepat (Yu et al. 2016). Teknologi yang berkecepatan tinggi ini mampu menghasilkan struktur biomimetik yang lebih efisien pada permukaan peranti TENG titisan air, seterusnya membantu dalam meningkatkan luas permukaan serta sifat hidrofobik peranti bagi mempertingkatkan prestasi penjanaan tenaga.

Sehubungan itu, penggunaan bahan 2D juga dapat membantu dalam penuaian tenaga peranti penjana nano kerana sifatnya yang unik termasuk mempunyai pengaliran elektrik dan pergerakan elektron yang baik, ciri ketumpatan cas yang tinggi, kadar rintangan yang rendah, dan sifat fleksibiliti yang memberangsangkan (Mitta et al. 2020). Terdapat banyak penyelidikan yang telah meneroka penggunaan bahan 2D

dalam teknologi ini untuk meningkatkan prestasi dan kecekapan peranti TENG. Namun, ciri bahan 2D MXene yang sangat konduktif dan berketumpatan cas yang tinggi menjadikannya sesuai untuk di aplikasikan dalam peranti penjana nano triboelektrik (TENG) ini. Sifat-sifat pada MXene ini dapat membantu peranti dalam memberikan kadar pemindahan dan pengekaln cas yang lebih efisien ketika proses penuaian tenaga dijalankan. Sehubungan itu, MXene mempunyai kestabilan dan keserasian yang tinggi terhadap pelbagai jenis substrat, menjadikannya bahan yang sesuai untuk digunakan pada pelbagai jenis permukaan (Lei et al. 2015). Ciri ini mampu memberikan keserasian yang tinggi untuk diaplikasikan pada peranti TENG yang dihasilkan bagi memperoleh prestasi penjanaan tenaga yang lebih memberangsangkan. Oleh itu, penerapan teknologi biomimetik bersama bahan 2D berpotensi menghasilkan peranti TENG berprestasi tinggi serta membuka peluang kepada pembangunan penyelesaian tenaga yang lebih inovatif dan mampan.

1.2 PENYATAAN MASALAH

Pada era globalisasi ini, peralihan kepada sumber tenaga hijau merupakan teknologi yang sangat penting dalam memerangi perubahan iklim. Penjana nano triboelektrik (TENG) titisan air merupakan salah satu teknologi yang berpotensi tinggi dalam penuaian tenaga boleh diperbaharui daripada sumber semula jadi. Teknologi ini mampu menjadi alternatif kepada tenaga konvensional yang sering dikaitkan sebagai penyumbang utama kepada masalah perubahan iklim global. Walau bagaimanapun, pada masa kini terdapat beberapa cabaran ketara yang masih menghadkan prestasi dan keupayaan penuh peranti TENG yang dihasilkan, antaranya ialah reka bentuk peranti, keupayaan pemerangkapan cas yang tidak cekap, sifat pembasahan permukaan yang tinggi, serta interaksi yang rendah antara titisan air dan permukaan peranti.

Prestasi semasa peranti penjana nano triboelektrik yang dilaporkan oleh Nie et al. (2020) menunjukkan bahawa penggunaan bahan kertas selulosa superhidrofobik hanya mampu menghasilkan purata voltan di bawah 5 V dan purata arus sekitar 0.5 μA bagi satu unit peranti yang dibangunkan. Keputusan ini menunjukkan kecekapan penjanaan tenaga bagi peranti TENG titisan air masih rendah dan memerlukan penambahbaikan dari segi reka bentuk, penggunaan bahan, dan rawatan permukaan bagi memperoleh kadar penjanaan tenaga yang lebih memberangsangkan. Faktor-faktor

cabaran ini kerap kali dibincangkan di dalam penerbitan melibatkan penyelidikan berkaitan penjana nano triboelektrik, namun tiada penyelesaian yang kukuh telah dibukti oleh penyelidikan semasa. Jurang yang terhasil ini membolehkan suatu kajian baru dapat dilaksanakan bagi menjawab dan menyelesaikan permasalahan ini.

Antara pendekatan baharu yang dapat mengatasi masalah ini ialah dengan meneliti reka bentuk peranti TENG secara lebih mendalam bagi mengenal pasti faktor-faktor yang mempengaruhi prestasi penjanaan tenaga. Hal ini kerana reka bentuk yang diperkenalkan sebelum ini adalah lebih kompleks, sukar difabrikasi dan sukar diskalakan, di samping tidak menilai secara khusus kesan variasi reka bentuk terhadap keupayaan penjanaan tenaga. Antara aspek penting yang dikaji termasuk konfigurasi elektrod pada peranti, jenis bahan yang digunakan, saiz elektrod, serta ketebalan substrat yang memainkan peranan penting dalam menentukan prestasi keseluruhan peranti TENG. Pengetahuan ini dapat membantu mengatasi kelemahan dalam pembangunan reka bentuk peranti TENG dan seterusnya menghasilkan reka bentuk yang lebih cekap dan efisien dalam menjana tenaga. Kajian ini turut menyumbang kepada peningkatan prestasi keseluruhan sistem penuaian tenaga triboelektrik yang dihasilkan.

Selain itu, penggunaan bahan 2D juga dapat membantu dalam mengatasi cabaran pemerangkapan cas yang rendah pada peranti TENG yang di hasilkan. MXene merupakan bahan 2D yang berpotensi tinggi dan sesuai digunakan sebagai salutan pada peranti kerana sifat pengaliran elektrik yang baik serta ketumpatan cas yang tinggi. Sehubungan itu, MXene menunjukkan keserasian yang baik dengan polimer seperti PTFE, menjadikannya sesuai untuk digunakan dalam meningkatkan prestasi penjanaan tenaga pada TENG. Namun, sifat hidrofilik semula jadi MXene menimbulkan cabaran dalam aplikasi berasaskan titisan air, kerana ia boleh menyebabkan titisan merebak dan membentuk lapisan air berterusan, yang berpotensi mengganggu kitaran sentuhan-pemisahan dalam penjanaan tenaga triboelektrik. Bagi mengatasi kelemahan ini, pendekatan baharu melibatkan MXene yang telah di ubah suai dengan kumpulan berfungsi alkylammonium dapat digunakan sebagai bahan salutan untuk memberikan sifat hidrofobik disamping mengekalkan sifat pengaliran elektrik dan ketumpatan casnya yang tinggi. MXene ini, yang dikenali sebagai MXene hidrofobik, masih belum

dikaji penggunaannya dalam aplikasi TENG berasaskan titisan air. Perkara ini menunjukkan terdapat jurang penyelidikan yang ketara berkaitan kesan penggunaan hidrofobik MXene sebagai salutan dalam peranti TENG untuk meningkatkan prestasi penjanaan tenaga.

Sehubungan itu, pendekatan lain yang boleh dibuat adalah dengan menggunakan teknologi biomimetik bagi mengatasi cabaran dari sudut ciri interaksi yang rendah dan sifat kebolehasahan yang tinggi pada permukaan peranti TENG. Teknologi biomimetik yang meniru struktur alam semula jadi dapat memberikan struktur permukaan yang lebih luas dan membantu dalam menambah baik kecekapan penukaran tenaga melalui peningkatan pada interaksi diantara permukaan TENG dan titisan air. Sehubungan itu, peniruan permukaan alam semula jadi yang bersifat hidrofobik juga dapat membantu dalam memberikan permukaan TENG bersifat hidrofobik. Ciri-ciri ini dapat memberikan peningkatan pada kecekapan proses sentuhan dan pelepasan, seterusnya memberikan proses penuaian tenaga yang lebih tinggi dan stabil. Walau bagaimanapun, kajian terperinci tentang kesan struktur biomimetik terhadap peningkatan luas permukaan dan sifat hidrofobik dalam mempengaruhi prestasi TENG masih belum diterokai sepenuhnya, menyebabkan terdapatnya ruang penyelidikan yang belum diterokai dalam bidang ini. Penyelidikan dalam bidang ini berpotensi membantu mengenal pasti ciri-ciri biomimetik yang mampu meningkatkan prestasi peranti TENG yang dihasilkan.

Akhir sekali, sehingga kini masih tiada kajian yang mengkaji penggabungan dua rawatan permukaan, iaitu struktur biomimetik dan salutan MXene hidrofobik, pada sebuah peranti TENG. Penggabungan ini berpotensi menjadi pendekatan rawatan permukaan yang lebih efisien serta mampu meningkatkan prestasi penjanaan tenaga peranti TENG yang dihasilkan. Ujian peranti TENG ini dalam pelbagai persekitaran juga perlu dijalankan bagi menilai kesesuaian peranti yang dihasilkan untuk aplikasi yang disasarkan, seperti dalam persekitaran air hujan, air paip, air laut, dan bioperubatan. Kajian ini dapat menunjukkan kesan jenis air terhadap prestasi peranti serta membantu mengenal pasti persekitaran yang paling sesuai untuk penggunaan peranti TENG yang dihasilkan. Perkara ini telah menunjukkan kekurangan kajian yang ketara dalam pembangunan peranti TENG berprestasi tinggi dengan penggabungan dua

rawatan permukaan, yang mampu berfungsi dengan baik dalam pelbagai persekitaran. Oleh itu, penemuan daripada kajian ini dapat membuka pendekatan baharu dalam penghasilan peranti TENG yang berprestasi tinggi yang dapat menyumbangkan kepada peralihan ke arah sumber tenaga hijau yang lebih baik dan stabil.

1.3 OBJEKTIF

Objektif utama kajian ini adalah untuk mengkaji sifat elektrik penjana nano triboelektrik titisan air dengan struktur tiang mikro lapisan campuran PTFE-MXene bagi tujuan penuaian tenaga elektrik. Secara terperinci, objektif kajian diuraikan seperti berikut:

1. Menilai kesan campuran salutan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan hidrofovik MXene pada substrat PTFE dalam penghasilan penjanaan voltan, arus dan kuasa.
2. Memfabrikasi struktur biomimetik pada permukaan PTFE untuk meningkatkan luas permukaan peranti dan sifat hidrofovik peranti serta menilai kesannya terhadap penjanaan voltan, arus, dan kuasa.
3. Menilai prestasi elektrik penjana nano triboelektrik bagi ujian titisan air paip, air laut, air NaCl 0.9% dan juga air hujan pada permukaan peranti yang dihasilkan dengan gabungan struktur pemesian mikro dan lapisan campuran PTFE-MXene.

1.4 SKOP KAJIAN

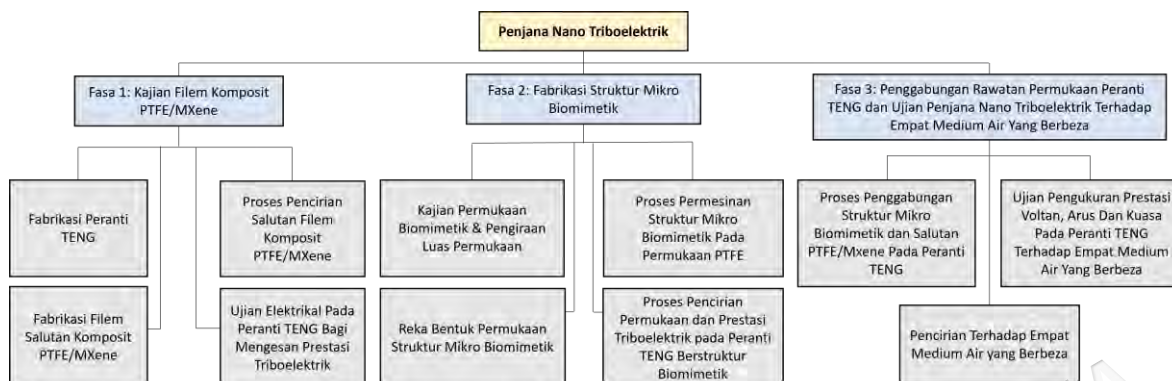
Skop kajian tesis tertumpu kepada kajian penjana nano TENG dengan menggunakan titisan air sebagai bahan tribo yang menjana tenaga. Rajah 1.4 menunjukkan skop kajian tesis dalam penyelidikan terhadap penjana nano triboelektrik titisan air. Pada fasa 1, kajian ini hanya menggunakan kepingan PTFE berukuran 2 mm × 2 mm sebagai bahan substrat kerana sifat keelektronegatifanya yang baik dan menggunakan campuran larutan PTFE (60 wt% penyebaran dalam H₂O) sebagai matrik dan MXene (hidrofovik MXene untuk komposit) sebagai bahan pengisi bagi menghasilkan salutan filem nipis pada permukaan PTFE. Beberapa komposisi campuran PTFE/MXene telah dihasilkan iaitu 0.01wt%, 0.05wt% dan 0.1wt% untuk menguji kesan filem nipis komposit PTFE/MXene terhadap penjanaan tenaga triboelektrik titisan air. Kaedah yang digunakan untuk menghasilkan filem nipis ialah kaedah salut putar pada permukaan

PTFE bagi memastikan penyebaran salutan yang homogen, diikuti dengan proses pensinteran bagi membentuk filem nipis yang stabil dan baik.

Peranti TENG yang dihasilkan hanya menggunakan 2 jenis elektrod iaitu pita pengalir kumprum dan aluminium. Kedua-dua pita pengalir yang digunakan juga mempunyai ketebalan yang sama iaitu 0.05 mm. Seterusnya pada fasa 2 kajian, struktur biomimetik yang dihasilkan hanya menggunakan kaedah pemesinan mikro untuk menghasilkan struktur permukaan yang lebih luas dan bersifat hidrofobik. Peningkatan luas permukaan ini bertujuan untuk meningkatkan interaksi diantara titisan air dan peranti TENG, manakala peningkatan sifat hidrofobik adalah untuk memberikan proses sentuhan-lepasan yang lebih efisien untuk penjanaan tenaga. Parameter pemesinan yang digunakan adalah sama bagi semua sampel, iaitu kadar suapan 200 rpm dan kelajuan gelendong 5000 rpm. Penggunaan parameter yang seragam ini penting untuk memastikan tiada perbezaan ketara dari segi pembentukan burr, kekasaran permukaan, atau ketidaktepatan geometri antara setiap struktur biomimetik yang dihasilkan. Pendekatan ini memastikan keseragaman kualiti sampel dan membolehkan analisis prestasi dilakukan secara lebih tepat. Pemilihan struktur mikro biomimetik juga adalah berasaskan kajian kepustakaan semata-mata tanpa menjalankan ujian tersendiri.

Pada fasa 3, penggabungan dua rawatan permukaan iaitu struktur biomimetik dan salutan PTFE/MXene hanya dijalankan pada struktur biomimetik dan komposisi salutan yang terbaik sahaja dalam menjana tenaga. Bagi ujian melibatkan empat medium air, kesemua medium tersebut dipilih berdasarkan potensi aplikasi sebenar yang ingin diterokai. Air paip digunakan bagi mensimulasikan keadaan dalam sistem perpaipan, air hujan dipilih untuk aplikasi penuaian tenaga daripada titisan hujan, larutan NaCl 0.9% digunakan bagi mewakili aplikasi bioperubatan, manakala air laut digunakan untuk aplikasi peranti yang beroperasi dalam persekitaran marin. Pemilihan ini memastikan penilaian prestasi peranti lebih menyeluruh dan relevan dengan keadaan penggunaan sebenar. Khir sekali, semua ujian penjanaan tenaga melalui titisan air dijalankan dengan menggunakan parameter yang sama bagi memastikan ketekalan dan kebolehbandingan keputusan. Parameter yang digunakan ialah sudut jatuhnya titisan terhadap peranti TENG pada 135° , ketinggian titisan 9 cm, kadar aliran air 70 mL/min,

diameter titisan 5 mm, serta daya titisan air sebanyak 0.64 μN . Penggunaan parameter seragam ini membolehkan analisis prestasi dilakukan dengan lebih tepat dan sistematik.



Rajah 1.4 Skop kajian tesis dalam penyelidikan terhadap penjana nano triboelektrik titisan air

1.5 ORGANISASI TESIS

Penulisan kajian tesis ini disusun dalam 6 bab untuk menerangkan dengan jelas tentang kaedah penyelidikan, hasil keputusan dan analisis yang diperolehi daripada kajian ini. Bab 1 menyentuh mengenai pengenalan ringkas kepada teknologi TENG secara menyeluruh seperti latar belakang kajian, permasalahan kajian, objektif dan skop kajian yang dijalankan. Kajian kepustakaan pula diuraikan secara terperinci dalam Bab II, merangkumi topik penuaian tenaga, bahan tribo, bahan nano, struktur permukaan, dan teknologi biomimetik. Seterusnya, Bab III menerangkan dengan jelas kaedah penyelidikan yang digunakan dalam tesis ini, termasuk proses penghasilan peranti TENG, kaedah pembentukan filem komposit PTFE/MXene, fabrikasi struktur biomimetik, serta kajian pengukuran prestasi TENG dengan penggabungan salutan PTFE/MXene dan struktur mikro terhadap pelbagai medium air. Pendekatan ini memastikan keseluruhan metodologi kajian mudah difahami dan lebih sistematik. Setup dan alat pencirian yang digunakan dalam kajian ini juga telah dibincangkan dalam bab ini. Penerangan tersebut merangkumi peralatan yang digunakan, konfigurasi ujian bersama parameter ketika pengujian, serta kaedah pengukuran yang diaplikasikan bagi memperoleh data dengan lebih tepat. Maklumat ini penting untuk memastikan data yang dikumpulkan berada dalam keadaan yang konsisten, boleh diulang, dan menggambarkan prestasi sebenar sampel peranti TENG yang diuji.

Seterusnya, hasil penyelidikan dibincangkan secara terperinci pada Bab IV dan Bab V. Bab IV menerangkan hasil kajian yang diperoleh daripada variasi parameter fabrikasi peranti TENG titisan air serta penghasilan salutan komposit dengan komposisi yang berbeza. Bahagian ini mempunyai tiga sub-topik utama yang dikaji iaitu fabrikasi peranti, pencirian salutan PTFE/MXene, dan ujian triboelektrik pada peranti TENG bersalut PTFE/MXene dengan menggunakan sumber titisan air. Antara perbincangan yang dikupas termasuklah analisis terhadap parameter-parameter berbeza yang digunakan dalam penghasilan peranti TENG, seperti variasi reka bentuk peranti, perbezaan kombinasi dan saiz elektrod, serta ketebalan PTFE yang digunakan. Setiap parameter ini dibincangkan dari sudut pengaruhnya dalam prestasi penjanaan tenaga bagi mendapatkan kefahaman yang lebih jelas tentang kesan faktor fabrikasi terhadap peranti yang dihasilkan. Selain itu, bab ini turut membincangkan hasil kajian terhadap salutan PTFE/MXene pada peranti TENG, bagi menilai kesan salutan tersebut terhadap prestasi triboelektrik titisan air yang dikaji.

Manakala, Bab V membincangkan hasil daripada penghasilan struktur mikro biomimetik pada permukaan peranti yang dihasilkan serta kesannya terhadap prestasi TENG. Selain itu, bab ini turut menerangkan prestasi hasil penggabungan rawatan permukaan antara salutan PTFE/MXene dan struktur mikro biomimetik terhadap empat medium air yang berbeza. Bab ini merangkumi beberapa hasil kajian, antaranya pengiraan luas permukaan, penilaian morfologi struktur hasil pemesinan mikro, ujian sudut sentuhan, serta prestasi penjanaan tenaga triboelektrik. Bahagian kedua pula menumpukan kepada hasil kajian penggabungan rawatan permukaan terhadap prestasi penjanaan tenaga triboelektrik, termasuk analisis kesan pelbagai medium air terhadap peranti yang dihasilkan. Bab terakhir, iaitu Bab VI, merumuskan penemuan daripada penyelidikan yang dijalankan, menekankan sumbangan dapatan kajian, serta mengemukakan cadangan bagi kajian lanjutan berkaitan penjana nano TENG berasaskan titisan air.

BAB II

KAJIAN KEPUSTAKAAN

2.1 PENDAHULUAN

Permintaan yang makin meningkat terhadap sebuah peranti yang stabil dan berkuasa sendiri telah mendorong ramai penyelidik meneroka teknologi penuaian tenaga yang inovatif (Liu, Guo, et al. 2021). Penjana Nano triboelektrik atau *Triboelectric Nano Generators* (TENG) merupakan antara teknologi yang dapat memberikan potensi yang tinggi dan dapat memanfaatkan tenaga daripada pelbagai punca sumber semula jadi untuk menjana elektrik seperti haba (Jo et al. 2021), angin (Wang et al. 2021), dan air (Xu, Jiang, et al. 2018). Namun, kajian ini memfokuskan kepada tenaga yang diperoleh daripada titisan air kerana ia menawarkan pendekatan yang lebih unik dan mesra alam. Tenaga yang lebih efisien dan optimum dapat diperoleh dengan melihat kepada faktor-faktor seperti reka bentuk dan penggunaan bahan yang sesuai.

Reka bentuk seperti susunan dan struktur permukaan peranti perlu dikaji bagi mendapatkan penukaran tenaga yang cekap dan stabil bagi mendapatkan peranti penuaian yang lebih baik. Pemilihan bahan juga perlu difokuskan. Dalam beberapa tahun kebelakangan ini, bahan dua dimensi (2D), khususnya MXene telah mendapat perhatian daripada para penyelidik kerana ciri-cirinya yang unik dan menarik. MXene, terdiri daripada keluarga karbida/nitrida logam peralihan 2D yang mampu mempamerkan kekonduksian yang luar biasa, fleksibiliti mekanikal, dan kestabilan kimia. Sehubungan itu, *Polytetrafluoroethylene* (PTFE) juga terkenal dengan ciri hidrofobisiti yang baik dan tenaga permukaan yang rendah membolehkan pengumpulan dan penolakan titisan yang cekap, serta dapat meningkatkan prestasi TENG. Dua bahan ini merupakan bahan yang dapat memberikan potensi yang baik bagi aplikasi TENG.

Oleh itu, sorotan kajian lepas ini bertujuan untuk meneroka reka bentuk dan strategi untuk meningkatkan kecekapan TENG titisan air untuk penuaian tenaga bagi memperoleh tenaga elektrik yang lebih cekap dan stabil. Dengan meneliti kajian penyelidikan yang lepas dan berkaitan, membolehkan pemahaman yang komprehensif tentang teknik terkini, cabaran dan hala tuju masa depan dalam bidang ini dapat diperolehi. Sehubungan itu, bab ini juga membincangkan prinsip asas TENG yang menekankan mekanisme dan proses penukaran tenaga daripada titisan air. Bahan yang digunakan pada kajian lepas juga telah dibincangkan bagi mengenal pasti prestasi penuaian dan kesesuaian untuk aplikasi TENG titisan air.

Penyepaduan antara bahan dua dimensi MXene dan PTFE diberi tumpuan kerana ciri-cirinya yang unik dan dapat meningkatkan prestasi TENG. Reka bentuk pada teknologi biomimetik telah diaplikasikan pada permukaan peranti bagi meningkatkan prestasi penuaian tenaga. Dalam bab ini, reka bentuk biomimetik diteroka dengan pelbagai pendekatan biomimetik yang diinspirasi daripada permukaan alam semula jadi untuk meningkatkan kecekapan penuaian tenaga. Pendekatan ini mampu meningkatkan luas permukaan yang secara langsung meningkatkan interaksi triboelektrik dan dapat memberikan kadar penuaian tenaga yang lebih efisien. Prinsip dan teori struktur luas permukaan pada alam semula jadi juga dibincangkan dalam bab ini. Dengan meneliti landskap penyelidikan sedia ada, ia akan menyumbang kepada kemajuan teknologi penuaian tenaga yang cekap, menawarkan pandangan tentang pembangunan masa depan dan potensi aplikasi TENG titisan untuk penjanaan tenaga yang stabil.

2.2 PENUAIAN TENAGA

Dalam menangani kekurangan tenaga global dan isu semasa seperti pencemaran alam sekitar. Kepentingan pencarian sumber tenaga yang lebih mampan dengan pelepasan karbon yang berkurangan dan boleh diperbaharui telah menjadikan sesuatu isu utama bagi menangani masalah ini. Penghasilan tenaga dengan menggunakan teknologi hijau merupakan antara pendekatan yang dapat digunakan bagi memperoleh ekonomi hijau dan pembangunan tamadun manusia yang lebih sihat (Chen, Chen, et al. 2020). Sehubungan itu, dunia juga pada masa kini sedang menjurus kepada teknologi

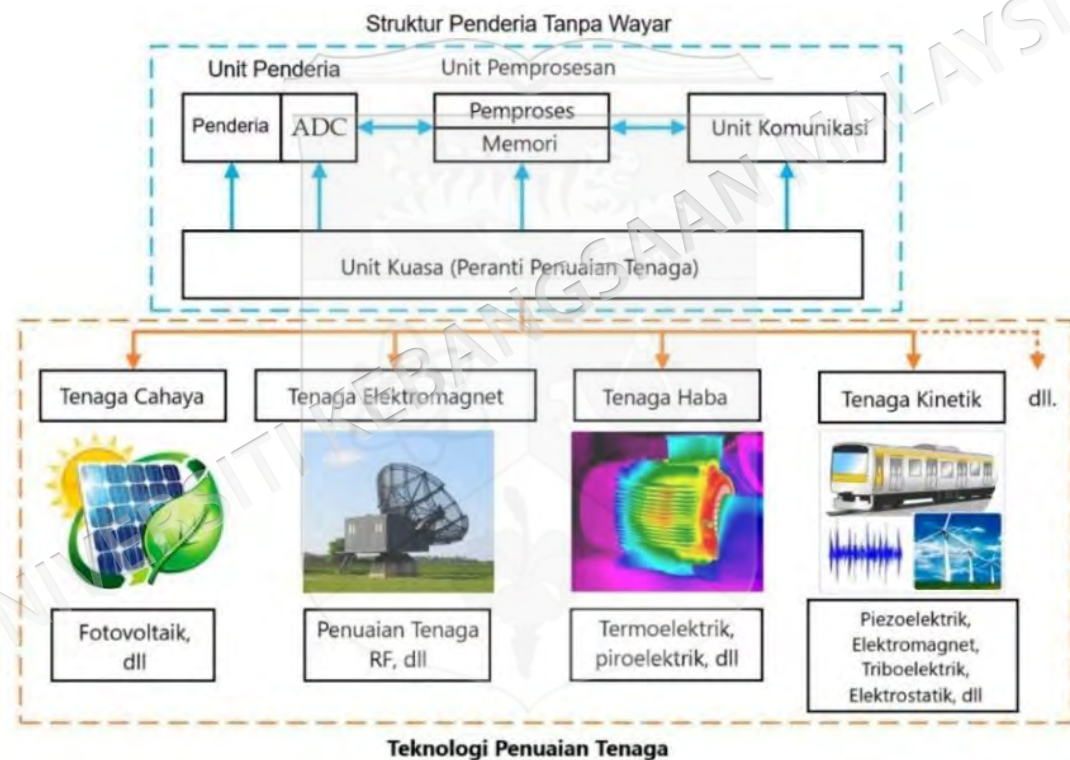
elektronik berkuasa sendiri seperti rangkaian tanpa wayar generasi kelima (5G) dan *internet of things* (IoT) yang dianggap sebagai asas pembangunan revolusi perindustrian untuk ke arah dunia pintar (Yao et al. 2020). Bagi mencapai kemajuan dalam teknologi hijau, penyelesaian yang terbaik adalah menghasilkan peranti yang mampu menghasilkan sumber tenaga yang mampu diperoleh daripada persekitaran.

Penuaian tenaga yang juga dikenali sebagai penjanaan tenaga merupakan konsep revolusioner yang mempunyai potensi yang besar dalam cara kita menjana atau menukarkan sesuatu daya kepada tenaga elektrik. Pada terasnya, penuaian tenaga melibatkan penangkapan dan penukaran sesuatu daya kepada tenaga elektrik yang terdiri daripada pelbagai bentuk sama ada daripada persekitaran mahupun alam semula. Daya ini merangkumi pelbagai bentuk seperti kepada tenaga kinetik, cahaya, terma, dan elektrostatik. Tenaga yang biasanya akan hilang dan terbuang ini mampu dituai dan ditukarkan kepada tenaga yang boleh digunakan dalam pelbagai bentuk aplikasi seperti dalam membekalkan kuasa pada teknologi mikro elektrik pada peranti elektronik untuk rangkaian penderiaan tanpa wayar (Edler et al. 2012). Rajah 2.1 menunjukkan diantara aplikasi teknologi penuaian tenaga dalam penderia tanpa wayar. Pendekatan inovatif ini telah menarik minat banyak penyelidikan sejak beberapa tahun kebelakangan ini kerana potensinya untuk menyediakan sumber kuasa yang stabil dan boleh digunakan dalam pelbagai aplikasi yang luas.

Penuaian tenaga telah menjadi satu keperluan yang penting pada dunia hari ini, sebahagian besarnya didorong oleh isu yang mendesak berkaitan dengan sumber tenaga konvensional. Kebergantungan yang berlebihan terhadap bahan api fosil, seperti arang batu, minyak dan gas asli telah membawa kepada pencemaran yang teruk seperti pencemaran udara, pelepasan gas rumah hijau dan perubahan iklim global (Raftery et al. 2017). Cabaran alam sekitar ini menuntut tindakan segera untuk beralih ke arah alternatif tenaga yang lebih bersih dan boleh diperbaharui. Penuaian tenaga ini dapat memberikan penyelesaian yang praktikal dan mampan untuk mengurangkan kesan buruk yang disebabkan oleh sumber tenaga konvensional (Hosseini et al. 2023).

Salah satu isu utama dengan tenaga konvensional ialah sifatnya yang terhad. Bahan api fosil adalah sumber yang tidak boleh diperbaharui, dan kehabisannya tidak

dapat dilakukan (Mohideen et al. 2023). Apabila permintaan terhadap pengeluaran tenaga semakin meningkat, rizab yang ada bagi sumber-sumber ini semakin berkurang, yang membawa kepada ketidakpastian harga dan ketegangan geopolitik. Teknologi penuaian tenaga dapat memanfaatkan sumber tenaga yang banyak dan boleh diperbaharui seperti cahaya matahari, getaran, kecerunan suhu, dan air yang tersedia dalam persekitaran semula jadi (Bai et al. 2018). Dengan memanfaatkan sumber tenaga yang berterusan ini, penuaian tenaga dapat memastikan bekalan kuasa yang berterusan dan mampan, mengurangkan kebergantungan terhadap bahan api fosil yang boleh habis dan mengurangkan tekanan pada sumber tenaga global.



Rajah 2.1 Penderia tanpa wayar yang dikuasakan dengan teknik penuaian tenaga

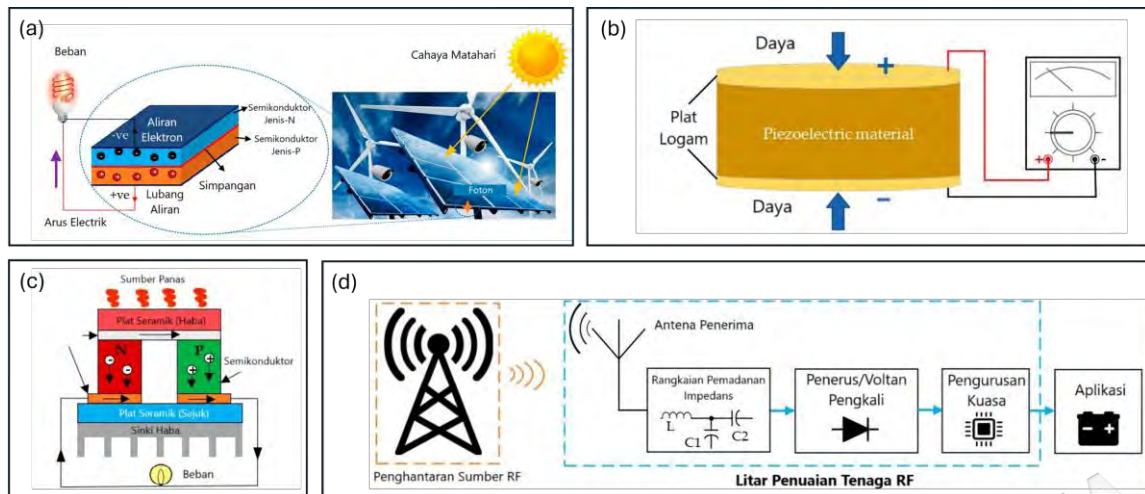
Sumber: (Tang et al. 2018)

Tambahan pula, pengeluaran tenaga konvensional terkenal dengan kesan negatifnya terhadap alam sekitar. Pembakaran bahan api fosil membebaskan bahan pencemar berbahaya, seperti karbon dioksida, sulfur dioksida, dan nitrogen oksida ke atmosfera, menyumbang kepada pencemaran udara dan memperburukkan lagi perubahan iklim. Akibat daripada pelepasan ini kejadian cuaca ekstrem, peningkatan paras laut,

dan ketidakseimbangan sering berlaku (Gong et al. 2023). Penuaian tenaga, sebaliknya boleh menjana tenaga bersih hingga tiada pelepasan pencemaran yang ketara, mengurangkan jejak karbon dan dapat menyumbangkan kepada kemerosotan masalah alam sekitar yang berkaitan dengan penjanaan kuasa (Lelieveld et al. 2019).

Isu yang mengelilingi sumber tenaga konvensional menuntut anjakan transformasi ke arah alternatif yang stabil dan boleh diperbaharui, menjadikan penuaian tenaga sebagai suatu teknologi yang penting kerana keupayaannya untuk menyediakan bekalan tenaga yang berterusan, bersih dan dapat menangani kebergantungan terhadap bahan api fosil, mengurangkan kesan alam sekitar, meningkatkan keselamatan tenaga dan merangsang pertumbuhan ekonomi (Ahmadi et al. 2019). Penggunaan teknologi penuaian tenaga bukan sahaja akan mengurangkan kebergantungan terhadap sumber tenaga konvensional tetapi juga membuka jalan ke arah masa depan tenaga yang lebih hijau, lebih berdaya tahan dan mampan untuk generasi akan datang (Akinaga 2020). Prinsip di sebalik penuaian tenaga melibatkan penggunaan tenaga yang berlaku secara semula jadi atau terbuang pada persekitaran dan menukarkannya kepada elektrik untuk menggerakkan peranti dan penderia kecil. Setiap jenis teknologi penuaian tenaga disesuaikan untuk memanfaatkan sumber tenaga ambien tertentu, daripada sinaran suria dan mekanikal kepada kecerunan terma dan isyarat frekuensi radio (Zou et al. 2019).

Di antara pelbagai sumber tenaga ambien, tenaga suria merupakan salah satu bentuk penuaian tenaga yang paling menonjol dan digunakan secara meluas seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.2(a). Sel fotovoltai, juga dikenali sebagai panel solar, mampu menukar cahaya matahari secara langsung kepada tenaga elektrik melalui kesan foto voltan (Kabir et al. 2018). Selain itu, tenaga mekanikal juga adalah satu lagi sumber penting yang boleh dituai dengan cekap menggunakan bahan piezoelektrik seperti pada Rajah 2.2(b). Seterusnya, penjana termoelektrik merupakan kaedah menghasilkan kuasa elektrik daripada kecerunan suhu, membolehkan penggunaan haba buangan dalam pelbagai proses perindustrian dan juga daripada badan manusia dalam peranti boleh pakai semula seperti pada Rajah 2.2(c) (Kishore et al. 2018). Terdapat juga penuaian tenaga frekuensi radio (RF) yang menggunakan pendekatan melibatkan menangkap dan menukar isyarat RF, seperti Wi-Fi, selular atau isyarat komunikasi wayarles lain, kepada tenaga elektrik seperti pada Rajah 2.2(d).



Rajah 2.2 Prinsip kerja (a) sel fotovoltaik, (b) piezoelektrik, (c) termoelektrik dan (d) tenaga RF

Sumber: (Tang et al. 2018)

Aplikasi penuaian tenaga adalah pelbagai dan meluas. Salah satu aplikasi utama yang dapat dilihat pada masa kini adalah dalam penjanaan rangkaian penerima tanpa wayar seperti dalam untuk pemantauan alam sekitar, automasi industri, aplikasi penjagaan kesihatan, dan penuaian tenaga (Zhou et al. 2018). Selain itu, ia juga dapat diaplikasikan dalam peranti elektronik berkuasa rendah seperti teknologi boleh pakai, jam tangan pintar dan penerima jauh (Chong et al. 2019). Penjana nano juga berpotensi untuk disepadukan pada struktur bangunan yang dapat menyumbang kepada penjanaan kuasa yang mampan dalam persekitaran bandar (Matiko et al. 2013).

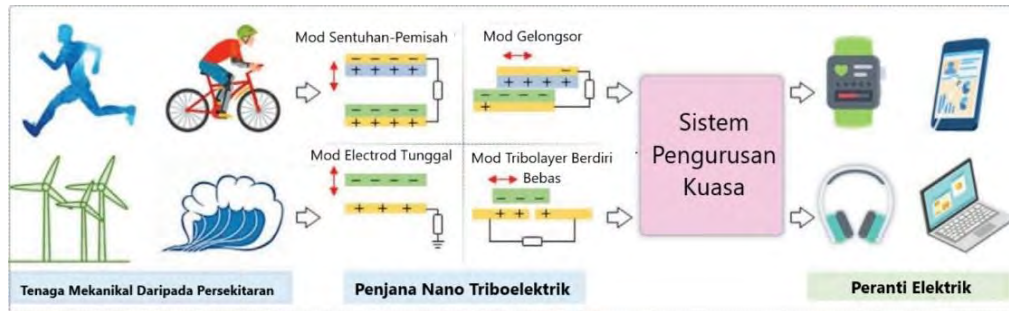
Pada masa kini, kemajuan yang pesat dalam nanoteknologi telah menimbulkan peranti penuaian tenaga revolusioner yang dikenali sebagai penjana nano yang dapat mengubah landskap tenaga dengan menawarkan alternatif yang terbaik bagi menggantikan sumber tenaga konvensional. Dengan kebimbangan yang semakin meningkat terhadap bahan api fosil yang terhingga dan kesan alam sekitarnya, penjana nano muncul sebagai penyelesaian termaju yang mampu menuai tenaga ambien dari persekitaran kita pada tahap skala nano. Teknologi ini dapat dimanfaatkan dalam pelbagai bentuk tenaga, seperti getaran mekanikal, kecerunan suhu, pergerakan biologi dan juga air. Penjana nano mempunyai potensi untuk menyediakan kuasa yang bersih

dan boleh diperbaharui menjadikannya calon yang menarik untuk menggantikan sumber tenaga konvensional dan memacu kita ke arah masa depan yang stabil dan lebih cekap.

2.2.1 Penjana Nano

Penjana nano merupakan satu inovasi penemuan baharu dalam bidang penuaian tenaga. Teknologi ini memanfaatkan sifat unik bahan nano yang mampu menukar tenaga sama ada daripada pergerakan mekanikal, pengeluaran haba, geseran air dan juga sumber biologi kepada aliran elektrik pada skala nano (Yu, Shang, et al. 2023). Peranti yang kecil namun mampu memberikan tenaga yang memberangsangkan ini dapat menjanjikan alternatif baru kepada sumber tenaga konvensional yang mempunyai pelbagai kelemahan. Teknologi ini bukan sahaja mampu merevolusikan cara memperoleh dan memanfaatkan tenaga, tetapi mampu juga membantu dunia dalam mencapai sasaran peralihan kepada tenaga hijau. Peranti penjana nano kebiasaannya mempunyai bahan nano yang bersifat piezoelektrik, piroelektrik dan triboelektrik yang membolehkan penjanaan arus elektrik apabila peranti ini terdedah kepada sesuatu daya seperti getaran mekanikal, turun naik suhu dan daya geseran (Feng et al. 2018).

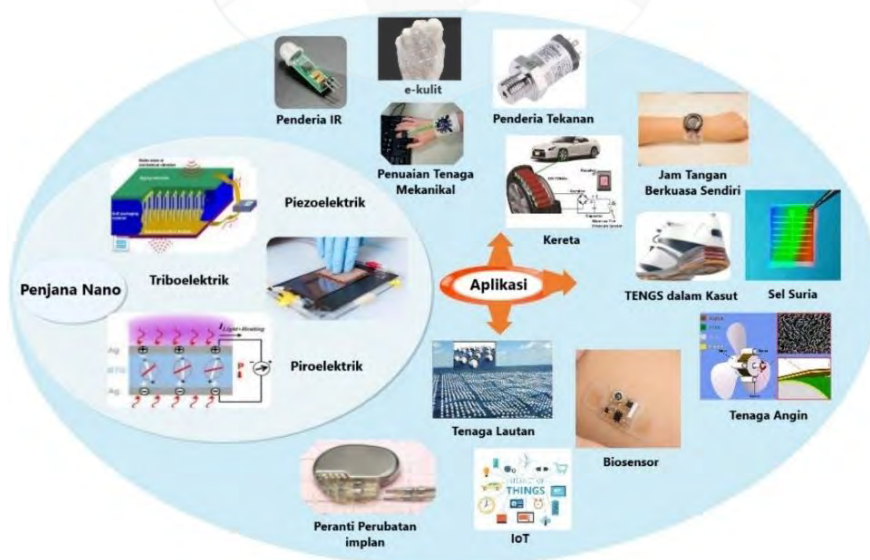
Penjana nano menawarkan pelbagai kelebihan dan faedah unik jika dibandingkan dengan penuai tenaga lain menjadikannya teknologi inovatif yang mempunyai kemampuan yang tinggi dan serba boleh dalam bidang penuaian tenaga. Salah satu kelebihan utama penjana nano terletak pada kemampuannya untuk disesuaikan dengan pelbagai aplikasi seperti pada peranti penderia (Zhou et al. 2021). Disebabkan saiznya yang kecil dan kebolehannya diserasikan pada substrat yang fleksibel, penjana nano boleh disepadukan dengan mudah ke dalam pelbagai aplikasi, daripada elektronik boleh pakai dan tekstil pintar kepada peranti perubatan boleh implan (Sun et al. 2021). Kebolehsuaian ini dapat memberi kelebihan kepada penjana nano berbanding kaedah penuai tenaga lain yang mempunyai tahap penyepaduan pada sesuatu peranti yang terhad. Rajah 2.3 menunjukkan sistem berkuasa sendiri dengan menggunakan kaedah penuaian tenaga TENG.



Rajah 2.3 Ilustrasi skematik sistem berkuasa sendiri menggunakan tenaga yang dituai dengan TENG

Sumber: (Zhou et al. 2021)

Selain itu, penjana nano berupaya untuk menuai tenaga daripada pelbagai jenis sumber. Tidak seperti sesetengah teknologi penuaian tenaga yang khusus untuk bentuk tenaga tertentu, penjana nano boleh mengeksploitasi pelbagai sumber tenaga, termasuk getaran mekanikal, kecerunan suhu dan daya geseran (Jin et al. 2019). Pelbagai fungsi ini membolehkan penjana nano menangkap tenaga daripada pelbagai persekitaran dan aktiviti, menawarkan penyelesaian penuaian tenaga yang lebih komprehensif dan cekap. Dengan kemajuan teknologi penjana nano pada masa kini, kesan piezoelektrik dan triboelektrik dapat dipertingkatkan dengan lebih berkesan. Hal ini membolehkan penjana nano mencapai kecekapan penukaran tenaga yang lebih tinggi walaupun beroperasi pada skala yang sangat kecil. Rajah 2.4 menunjukkan jenis penjana nano dan aplikasinya pada teknologi IoT.



Rajah 2.4 Jenis penjana nano dan aplikasinya dalam *Internet of things* (IoT)

Sumber: (Sripadmanabhan Indira et al. 2019)

Selain itu, penjana nano mempamerkan ketahanan yang mengagumkan dan jangka hayat operasi yang panjang (Lin et al. 2020). Tanpa memerlukan bahagian yang bergerak di samping penggunaan bahan yang kukuh menyebabkan peranti mampu untuk bertahan dengan persekitaran yang lasak dan tekanan mekanikal yang tinggi membolehkan peranti ini dapat beroperasi dengan berpanjangan dan boleh dipercayai. Ciri seperti kebolehskalaan, kepelbagaian, keupayaan memanfaatkan pelbagai sumber, kecekapan tinggi, masa tindak balas yang pantas, sifat desentralisasi, ketahanan, mesra alam, serta keserasian dengan sistem hibrid menjadikannya satu teknologi yang berpotensi besar untuk memacu penyelesaian tenaga mampan dan berkuasa sendiri merentas pelbagai industri dan aplikasi. Akhir sekali, saiznya yang kecil dan keserasian dengan substrat fleksibel membolehkan ia disepadukan ke dalam pakaian, peranti boleh pakai, serta peranti perubatan yang boleh diimplan. Perkara ini membuka laluan kepada era baharu elektronik yang berkuasa sendiri dan berautonomi (Wu et al. 2022).

Terdapat beberapa jenis penjana nano yang digunakan pada masa kini. Penjana nano piezoelektrik, sebagai contoh, boleh mengubah tenaga mekanikal ambien daripada aktiviti seharian, seperti langkah kaki atau pergerakan kenderaan, kepada elektrik, menjadikannya sesuai untuk menjanakan peranti elektronik berkuasa rendah dan penderia (Sezer et al. 2021). Begitu juga, penjana nano piroelektrik memanfaatkan kecerunan suhu untuk menjana tenaga elektrik, memberikan peluang untuk pemulihan sisa haba dalam proses perindustrian dan peranti boleh pakai (He et al. 2020). Kesan triboelektrik, sebaliknya, membolehkan penjana nano menghasilkan elektrik melalui sentuhan dan pengasingan bahan yang berbeza, membolehkan peranti ini dapat menjanakan elektronik mudah alih atau menuai tenaga daripada pergerakan biologi, seperti degupan jantung atau pengecutan otot (Mallineni et al. 2018).

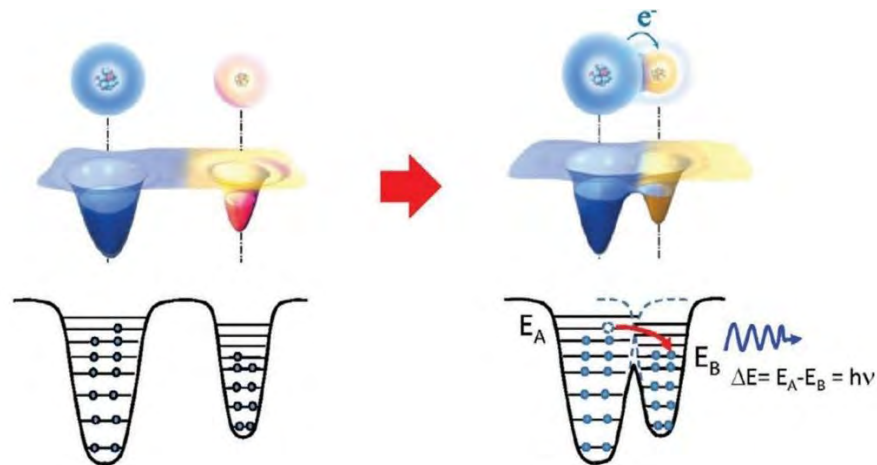
Penjana nano berfungsi dengan menukar daya luaran kepada tenaga elektrik melalui manipulasi cas dan polarisasi dalam sesuatu bahan. Cara penjanaan tenaga bergantung kepada jenis teknologi yang digunakan, iaitu melalui polarisasi dalam bahan piezoelektrik, pemindahan cas dalam bahan triboelektrik, atau perubahan polarisasi yang disebabkan oleh suhu dalam bahan piroelektrik. Dalam setiap mekanisme penjanaan nano, daya luar akan menyebabkan cas atau dipol di dalam bahan diagihkan semula. Keadaan ini menghasilkan medan elektrik yang berubah mengikut masa.

Perbezaan potensi yang terhasil seterusnya menggerakkan elektron melalui litar luaran, menghasilkan arus elektrik yang boleh digunakan. Kehadiran perbezaan potensi ini secara berterusan membolehkan penjanaan tenaga elektrik yang stabil dan boleh digunakan (Kim, Lee, Ryu, et al. 2017). Daripada prinsip fizik ini, dapat disimpulkan bahawa kesemua penjana nano menjana tenaga melalui polarisasi bahan. Polarisasi ini membentuk medan elektrik, yang seterusnya menyebabkan pergerakan elektron dan menghasilkan tenaga elektrik.

Dalam kajian ini, penjana nano triboelektrik telah dikaji kerana teknologi ini mempunyai pelbagai kelebihan berbanding teknologi penjana nano yang lain. Antaranya, peranti ini mempunyai sifat yang unik di mana ia mampu menangkap tenaga daripada pelbagai sumber seperti getaran, pergerakan manusia, dan aliran air yang membolehkan peranti digunakan dalam pelbagai jenis persekitaran. Sehubungan itu, penjana nano ini ringan, kos efektif dan mampu diperbuat daripada bahan yang fleksibel, membolehkan penyepaduan mudah ke dalam permukaan yang berbeza dan reka bentuk boleh skala. Kualiti ini menjadikan TENG sesuai untuk peranti berkuasa sendiri, teknologi boleh pakai dan penyelesaian tenaga mampan (Tian et al. 2020).

2.2.2 Triboelektrik

Penjana Nano Triboelektrik (TENG) merupakan sebuah penemuan baharu dalam bidang penuaian tenaga. Prinsip yang digunakan dalam penuai tenaga ini adalah dengan menggunakan kaedah kesan triboelektrik. Teknologi ini memanfaatkan prinsip yang menukar tenaga melalui pergerakan sentuhan mekanikal atau alam semula jadi menjadi sumber elektrik. Kaedah yang digunakan ini melibatkan penjanaan cas elektrik melalui konsep sentuhan dan pengasingan antara dua bahan yang berbeza (Kim et al. 2021). Fenomena ini berlaku apabila dua bahan bersentuhan menyebabkan elektron berpindah daripada satu bahan kepada bahan yang lain bergantung kepada ciri-ciri elektron yang terdapat bahan masing-masing. Perkara ini akan menyebabkan salah satu bahan tersebut menjadi bahan bercas positif (kehilangan elektron), dan satu lagi bahan menjadi cas negatif (mendapat elektron) seperti yang terdapat pada Rajah 2.5. Apabila bahan tersebut diasingkan semula, cas yang berpindah itu kekal pada permukaannya dan akan menghasilkan potensi elektrik atau juga dikenali sebagai voltan.



Rajah 2.5 Skimetik awan elektron, model penghasilan potensi elektrik dan pemindahan atom apabila dua bahan terpisah dan bersentuhan rapat.

Sumber: (Luo et al. 2020)

Berdasarkan teori fizik kesan triboelektrik, mekanisme asas penghasilan cas dapat diterangkan melalui beberapa konsep seperti tahap tenaga elektron, keadaan permukaan, elektronegativiti dan pembentukan medan elektrostatik. Tenaga elektron dalam sesuatu bahan ditentukan oleh fungsi kerja, pertalian elektron dan kumpulan berfungsi kimia pada permukaannya. Apabila dua bahan bersentuhan, keadaan permukaan mereka bertindih dan menyebabkan elektron berpindah berdasarkan perbezaan aras tenaga, sama ada ke bahan yang mempunyai paras Fermi yang lebih rendah atau pertalian elektron lebih tinggi. Pemindahan cas ini dapat dihuraikan secara fizik melalui prinsip asas yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$\Delta E = E_{F1} - E_{F2} \quad \dots(2.1)$$

Dimana, E_{F1} dan E_{F2} merupakan paras Fermi bagi kedua-dua bahan yang bersentuhan. Bahan yang mempunyai paras Fermi lebih tinggi akan cenderung melepaskan elektron dan menjadi bercas positif, manakala bahan dengan paras Fermi lebih rendah akan menerima elektron dan menjadi bercas negatif (Luo et al. 2020).

Ketika dua permukaan bersentuhan, ikatan hidrogen, daya van der Waals dan interaksi dipol-dipol terbentuk secara sementara di antara kedua-duanya. Pada saat ini, awan elektron kedua-dua permukaan saling bertindih, seterusnya membolehkan cas merentasi antara bahan melalui proses terowongan. Proses ini dapat dijelaskan dengan

lebih tepat melalui prinsip terowong mekanik-kuantum, iaitu elektron mampu merentasi penghalang tenaga walaupun secara teorinya tidak mempunyai tenaga yang mencukupi (Luo et al. 2020). Fenomena ini dapat diuraikan melalui model terowongan berikut:

$$J \propto e^{-2kd} \quad \dots(2.2)$$

Di mana J merujuk kepada kebarangkalian terowongan, e ialah cas elektron, d merupakan jarak pemisahan antara dua permukaan, dan k ialah pemalar terowongan. Semasa kedua-dua bahan berada dalam keadaan bersentuhan, nilai $d = 0$, menyebabkan kebarangkalian terowongan berada pada nilai maksimum (Willatzen et al. 2019). Namun, apabila permukaan mula terpisah, proses terowongan terhenti dan elektron tidak lagi dapat merentasi penghalang tenaga. Keadaan ini meninggalkan cas terperangkap pada permukaan masing-masing. Penghentian terowongan elektron ini menyebabkan ketidakseimbangan dalam ketumpatan elektron, seterusnya menghasilkan pemisahan cas antara kedua-dua permukaan. Fenomena ini selari dengan konsep dipol antara muka, di mana elektron yang sebelum ini tersempit secara seimbang menjadi tidak sekata ketika proses pemisahan berlaku, lalu menghasilkan cas bersih pada setiap permukaan (Cui et al. 2022).

Cas bersih yang terperangkap pada permukaan tidak dapat dipindahkan atau digabung semula. Keadaan ini menyebabkan terbentuknya dua permukaan dengan cas yang bertentangan (Cui et al. 2022). Akibatnya, medan elektrostatik muncul antara permukaan tersebut, seterusnya menghasilkan potensi elektrik yang dapat dijelaskan melalui prinsip dan persamaan berikut:

$$V = \frac{Q}{C} \quad \dots(2.3)$$

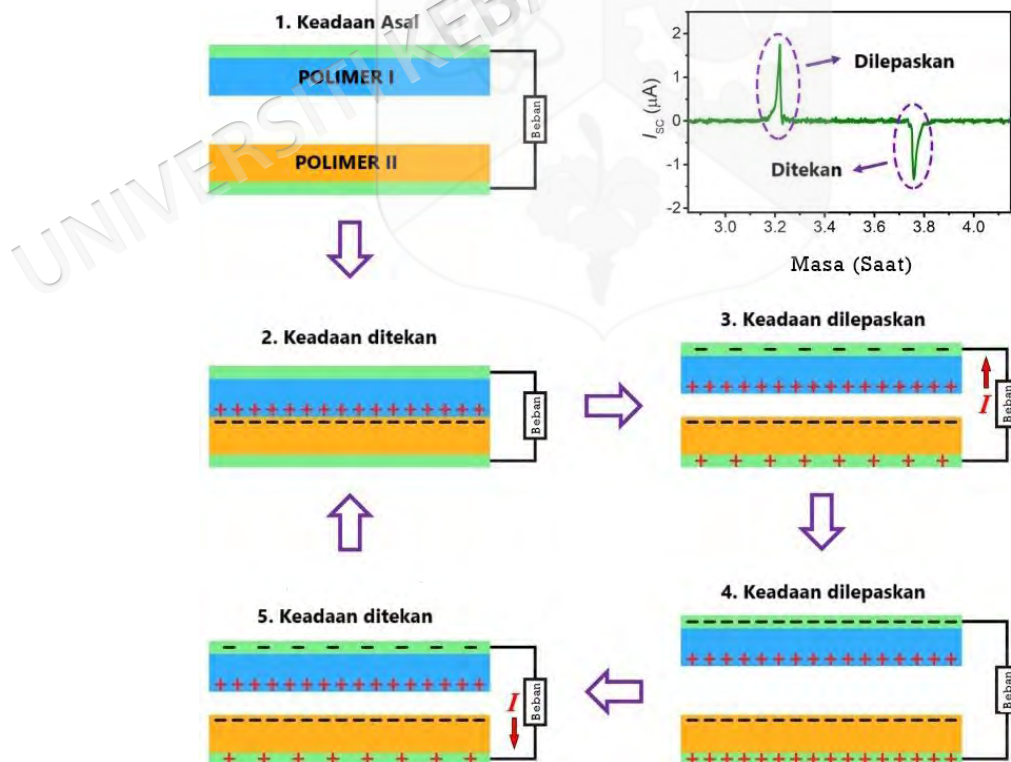
Di sini, Q mewakili cas triboelektrik manakala C ialah kemuatan (Bista et al. 2023). Manakala, kekuatan medan elektrik antara muka dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$E = \frac{Q}{\epsilon} \quad \dots(2.4)$$

Di mana ρ ialah ketumpatan cas dan ϵ ialah kebolehan dielektrik sesuatu bahan (Ha et al. 2017). Sekiranya terdapat jarak pemisah antara permukaan, voltan triboelektrik dapat dinyatakan melalui hubungan berikut:

$$V = E \cdot d \quad \dots(2.5)$$

Persamaan ini menunjukkan bahawa peningkatan jarak pemisah antara permukaan (d) serta pergerakan permukaan secara berasingan ketika proses pemishan telah menyebabkan voltan meningkat, yang seterusnya memacu pergerakan elektron melalui litar luar dan menghasilkan arus elektrik. Selain itu, peningkatan medan elektrik (E) turut mempertingkatkan pergerakan elektron, menghasilkan potensi elektrik yang lebih tinggi (Hu et al. 2024). Potensi elektrik ini bertindak sebagai daya penggerak elektron dalam litar, manakala cas yang terkumpul pada permukaan membolehkan penjanaan elektrik berlaku. Keadaan ini membolehkan tenaga elektrik yang terhasil dimanfaatkan untuk pelbagai aplikasi (Wu et al. 2019). Rajah 2.6 menunjukkan prinsip kerja peranti TENG dalam menghasilkan tenaga elektrik.



Rajah 2.6 Skematik menggambarkan kerja prinsip TENG dalam mod pemisah dan bersentuhan

Sumber: (Luo et al. 2020)

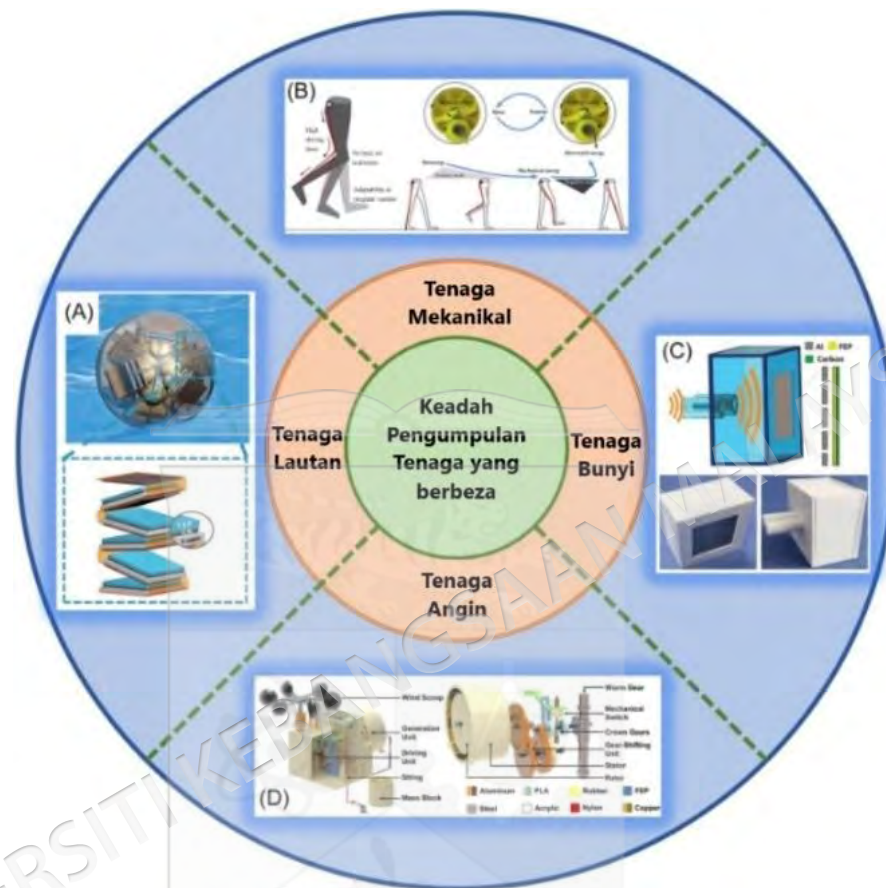
Dalam penjana nano triboelektrik (TENG), prinsip ini dimanfaatkan untuk menjanakan tenaga elektrik melalui interaksi sentuhan mekanikal antara dua bahan. Apabila bahan triboelektrik (kebiasaannya bahan penebat seperti polimer) berulang kali bersentuhan dan terpisah daripada bahan lain (yang boleh menjadi polimer, logam, atau cecair lain), proses pemindahan cas yang berlaku akan mewujudkan medan elektrik yang berubah-ubah. Fenomena ini berpunca daripada cas triboelektrik yang terbentuk pada permukaan, yang seterusnya menghasilkan aruhan elektrostatik. Medan elektrik akibat cas tersebut menyebabkan pengagihan semula elektron pada elektrod, lalu menghasilkan arus elektrik yang dapat diperhatikan dengan lebih jelas melalui prinsip berikut:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad \dots(2.6)$$

Di mana $I(t)$ merupakan arus sebagai fungsi masa, manakala Q merujuk kepada jumlah cas elektrik yang terjana pada sesuatu masa tertentu. Berdasarkan persamaan ini, kadar perubahan cas terhadap masa menunjukkan kewujudan aliran arus dalam sistem (Hu et al. 2024). Medan elektrik yang terbentuk akibat pengagihan cas ini memacu pengaliran arus, seterusnya menukarkan tenaga mekanikal kepada tenaga elektrik yang boleh dimanfaatkan (Pan et al. 2019). Walau bagaimanapun, prestasi peranti TENG bergantung pada sifat bahan yang digunakan dan kekerapan sentuhan dan pemisahan yang dilakukan bagi membolehkan teknologi ini mampu menuai tenaga elektrik berskala kecil dengan stabil dan berkesan melalui pelbagai sumber (Zhang et al. 2020).

Terdapat pelbagai kelebihan dalam teknologi TENG, dan salah satu kelebihan utamanya ialah kebolehannya untuk dihasilkan dengan mudah, yang membolehkan peranti ini diaplikasikan dalam pelbagai sistem. Peranti TENG juga boleh dibina menggunakan bahan yang mudah diperolehi serta bersifat kos efektif, menjadikannya satu penyelesaian penuaian tenaga yang berpotensi tinggi dengan kos yang rendah (Zhang et al. 2020). Sifatnya yang fleksibel dan mudah diskalakan membolehkan penyepaduannya dilakukan dengan mudah ke dalam pelbagai sistem, termasuk elektronik boleh pakai, peranti perubatan boleh implan, serta objek harian seperti pakaian dan kasut. Fleksibiliti ini membuka pelbagai kemungkinan untuk pembangunan elektronik berkuasa sendiri dan autonomi, yang dapat mengurangkan kebergantungan

terhadap bateri dan meningkatkan kestabilan bekalan tenaga (Niu et al. 2021). Selain itu, TENG mempunyai keupayaan untuk menuai tenaga daripada pelbagai sumber mekanikal, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.7.



Rajah 2.7 Teknologi TENG menuai tenaga daripada pelbagai sumber yang berbeza. (A) Tenaga lautan (B) Tenaga mekanikal. (C) Tenaga bunyi (D) Tenaga angin

Sumber: (Xu, Li, et al. 2022)

Teknologi ini mampu menangkap tenaga daripada pelbagai aktiviti, termasuk gerakan manusia, getaran ambien, kesan mekanikal, angin dan aliran air. Rajah 2.7 menunjukkan contoh penuaian tenaga menggunakan teknologi TENG daripada pelbagai sumber seperti daya mekanikal, angin, bunyi dan pergerakan lautan. Fleksibiliti dalam memperoleh sumber tenaga ini menjadikan teknologi TENG sangat sesuai untuk diaplikasikan dalam persekitaran bandar, kawasan industri, perairan dan lokasi terpencil, di mana pelbagai bentuk tenaga mekanikal atau daya fizikal mudah didapati (Khandelwal et al. 2021). Satu lagi kelebihan yang ketara mengenai TENG

adalah output kuasanya tinggi dan kecekapannya memperoleh tenaga. Pemindahan cas yang cekap semasa proses triboelektrik dapat membantu dalam menghasilkan kadar penukaran tenaga yang baik walaupun pada skala kecil (Askari et al. 2018). Dalam kajian ini, TENG berasaskan titisan air telah difabrikasi kerana keupayaannya yang ketara dalam menjana tenaga daripada pelbagai jenis daya dan sumber, serta kemudahannya untuk diaplikasikan dalam pelbagai teknologi.

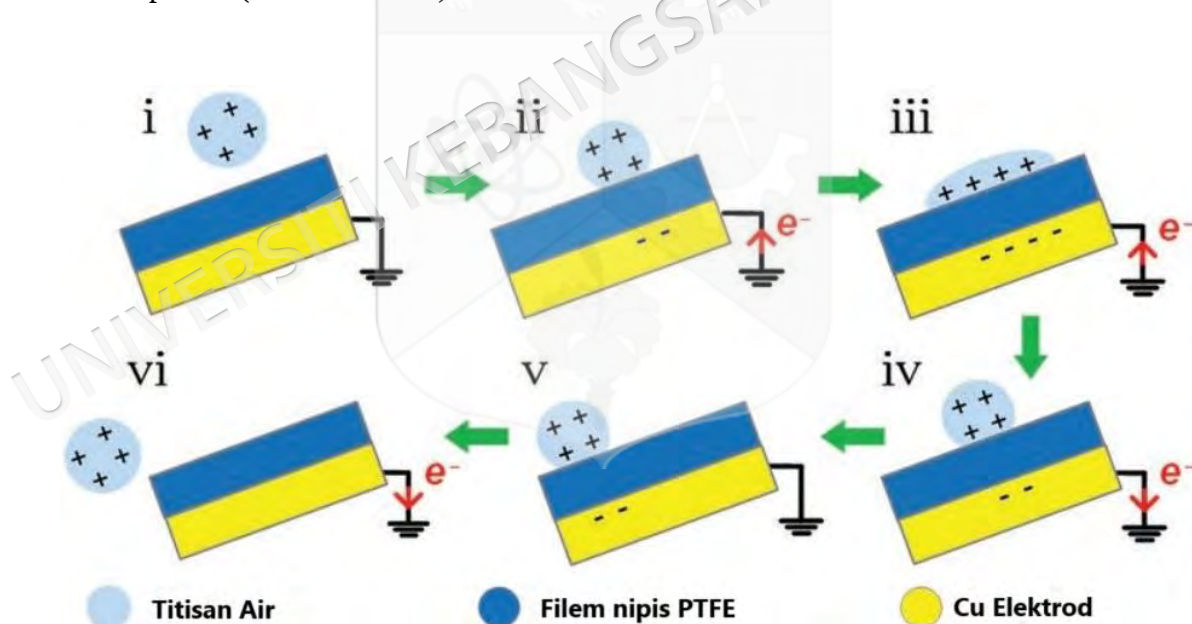
2.2.3 TENG Berasaskan Titisan Air

Penjana nano triboelektrik (TENG) berasaskan titisan air merupakan pendekatan baharu dalam teknologi penuaian tenaga. Air adalah salah satu sumber yang paling banyak terdapat di muka bumi, dengan hampir separuh daripada permukaan bumi terdiri daripadanya. Oleh itu, pemanfaatan air dalam teknologi penuaian tenaga berpotensi untuk menghasilkan tenaga yang lebih bersih dan mampan. Baru-baru ini, para penyelidik telah memperkenalkan TENG berasaskan titisan air sebagai salah satu kaedah inovatif dalam penjanaan tenaga. (Zhan, Wang, et al. 2020).

Seperti yang dijelaskan sebelum ini, TENG merupakan penjana nano yang boleh menjana elektrik secara berkesan daripada kesan gerakan melalui sentuhan dan geseran yang mampu menghasilkan cas elektrik (Nguyen et al. 2021). Tetapi, baru-baru ini para penyelidik telah menemui bahawa cecair juga di klasifikasikan sebagai bahan triboelektrik yang mampu menjana elektrik jika bersentuhan dengan sesuatu bahan yang bersifat elektronegatif. Konsep ini memanfaatkan interaksi antara titisan, permukaan pepejal dan bahan triboelektrik untuk menukar tenaga kinetik dan interaksi titisan air kepada arus elektrik (Chung et al. 2018). Banyak kelebihan TENG sentuhan cecair-pepejal kerana kaedah ini mampu mengatasi masalah haus daripada geseran yang tidak dapat dielakkan antara dua bahan pepejal yang di gunakan dalam teknologi TENG yang konvensional (Liu et al. 2019). Dengan menangani masalah kehausan ini, TENG berasaskan titisan air mampu menghasilkan output tenaga yang lebih baik, stabil dan mempunyai tempoh ketahanan yang lebih lama.

Prinsip kerja TENG berasaskan titisan melibatkan titisan yang memberi kesan sentuhan atau pergerakan titisan air pada permukaan sesuatu bahan triboelektrik yang mendorong pemindahan cas melalui kesan triboelektrik. Dalam teknologi TENG, titisan

air dan permukaan peranti mempunyai tahap pertalian elektron pada bahan yang tersendiri sebelum bersentuhan. Fenomena ini terhasil apabila dua bahan tribo bersentuhan antara satu sama lain dan terdapat penghantara cas seperti yang diterangkan pada persamaan 2.1. Penghantara cas akan menyebabkan bahan yang memberikan cas akan membentuk permukaan bercas positif dan bahan yang menerima cas akan permukaan bercas negatif seperti yang di tunjukkan pada Rajah 2.8. Penghantaran dan penerimaan cas yang berlaku ini bergantung kepada tahap keelektronegatifan sesuatu bahan. Memandangkan substrat yang digunakan perlu memerangkap cas daripada titisan air, kebiasaannya bahan pada permukaan TENG yang digunakan adalah bersifat elektronegatif seperti yang terdapat pada PDMS, PMMA, FEP, dan PTFE. Oleh itu, substrat pada peranti akan menjadi cas positif dan titisan air akan bercas positif seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.8 (i - iii). Bahan yang mempunyai tahap keelektronegatif yang lebih tinggi mampu memberikan elektro potensi yang lebih baik dalam pemindahan cas pada peranti penjana nano triboelektrik berbanding bahan elektropositif (Wu et al. 2021).



Rajah 2.8 Mekanisma penghasilan tenaga elektrik dalam TENG titisan air melalui sentuhan antara air dan permukaan. i) Titisan air bercas tribo jatuh di atas permukaan. ii) Titisan bersentuhan dengan permukaan. iii) Titisan merebak di atas permukaan. iv) Titisan melantun semula. v) Titisan menggelongsor ke bawah. vi) Titisan meninggalkan permukaan

Sumber: (Yang et al. 2019)

Seterusnya, titisan air akan bergolek dan gelongsor pada permukaan TENG seperti pada Rajah 2.8 (iv-v). Ketika ini, cas daripada titisan air akan terus dihantar

kepada peranti TENG sehingga titisan air terpisah daripada permukaan seperti pada Rajah 2.8 (vi). Ketika ini, cas daripada permukaan dan titisan air menjadi bercas bertentangan secara fizikal dan menyebabkan wujudnya medan elektrik antara kedua-dua permukaan. Pada keadaan ini, cas teraruh akan terhasil seperti yang di terangkan pada persamaan 2.5 dan menghasilkan potensi elektrik (Yang et al. 2019). Berdasarkan persamaan ini, semakin jauh pergerakan titisan air daripada permukaan, semakin tinggi voltan yang dihasilkan. Substrat daripada peranti TENG telah membentuk satu sistem kemuatan sementara yang dijana melalui titisan. Kemuatan berubah mengikut daripada kawasan sentuhan titisan dan jarak pemisah seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.7:

$$V = \frac{q}{C(t)} \quad \dots(2.7)$$

Q merujuk kepada cas triboelektrik, dan $C(t)$ merupakan kemuatan yang bergantung pada masa. Apabila titisan air menjauhi substrat, $C(t)$ akan berkurangan dan voltan akan terus meningkat. Tingkah laku ini yang menyebabkan penghasilan voltan berdenyut ketika penjanaan tenaga. Voltan yang terhasil akan menghasilkan medan elektrik yang mendorong elektron untuk mengalir ke litar luar melalui elektrod yang disambungkan pada peranti. Fenomena ini akan menghasilkan arus ulang alik (AC). Arus yang terhasil ini yang dapat digunakan untuk menjana tenaga pada peranti elektronik (Cui et al. 2022). Selain itu, Teknologi TENG berasaskan titisan air bukan sahaja dapat diaplikasikan pada penjanaan tenaga, tetapi ia mampu juga di aplikasikan dalam teknologi penderiaan seperti dalam pengesanan dan pemantauan. Sebagai contoh, Zeng et al. (2022) telah menggunakan teknologi TENG berasaskan titisan air sebagai penderia titisan hujan, manakala kajian Yang, Lin, et al. (2023) pula telah menggunakannya sebagai sistem mikrobendalir berkuasa sendiri.

Terdapat pelbagai kajian lepas telah dijalankan yang menghasilkan TENG berasaskan titisan air seperti Choi et al. (2017) yang telah menjalankan TENG yang di inspirasi daripada bahan semula jadi daun teratai (LL-TENG). Kajian ini mengkaji fenomena kewujudan elektrifikasi sentuhan cecair-pepejal dan penjanaan cas elektrik yang terdapat pada permukaan daun teratai. Bahan yang telah digunakan secara langsung dalam kajian ini ialah daun teratai yang ditukarkan kepada fluoropolymer dan

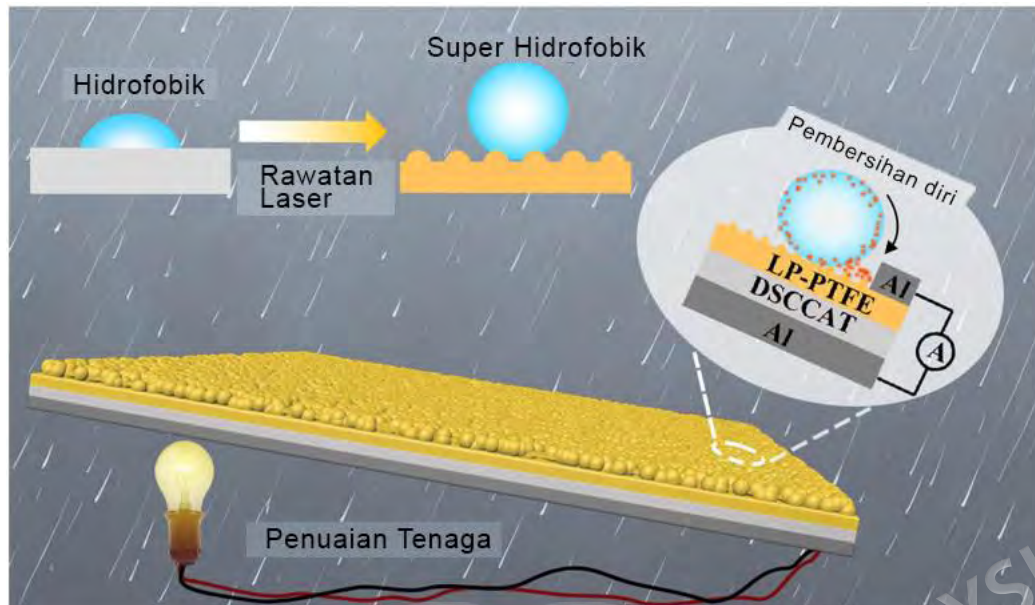
menggunakan kaedah pencetakan nano terma bagi menghasilkan elektrod seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.9. Berdasarkan kajian ini, peranti daun teratai yang dihasilkan ini mampu menjana tenaga elektrik apabila berinteraksi dengan air. Walau bagaimanapun, tenaga yang di hasilkan adalah berskala rendah iaitu pada purata skala 284 mV dan 250 nA arus.



Rajah 2.9 Kaedah fabrikasi LL-TENG melalui pemendapan Au di bahagian daun teratai semula jadi dan LL-TENG dilekatkan di bahagian luar bangunan dan terdedah kepada persekitaran untuk ujian lapangan

Sumber: (Choi et al. 2017)

Selain itu, Zhang et al. (2023) juga telah menghasilkan peranti triboelektrik berasaskan titisan air. Dalam kajian ini, permukaan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) telah dirawat dengan menggunakan femtosaat laser untuk menghasilkan struktur mikro berliang bagi meningkatkan sifat pembersihan diri dan super hidrofobisiti pada permukaan seperti yang di tunjukan pada Rajah 2.10. Berdasarkan kajian ini, Permukaan yang telah dirawat mempunyai prestasi yang lebih baik berbanding dengan permukaan yang tidak dirawat dari segi jangka hayat yang lebih lama, sifat pembersihan diri, fleksibiliti. Sehubungan itu, voltan dan arus yang dihasilkan juga meningkat dengan kehadiran struktur mikro berliang dengan menghasilkan voltan setinggi. Dengan saiz peranti berdimensi 4 cm x 4 cm, ia dapat menghasilkan voltan setinggi purata 50 V dan arus sebanyak 1.6 μ A.



Rajah 2.10 Gambar skimetik peranti tribo berasaskan titisan air dengan rawatan permukaan menjana elektrik pada waktu hujan

Sumber: (Zhang et al. 2023)

Walaupun terdapat pelbagai kajian yang telah dilakukan dalam teknologi ini, tetapi masih terdapat cabaran dalam meningkatkan kecekapan dan kestabilan TENG berasaskan titisan. Terdapat pelbagai faktor yang mempengaruhi teknologi ini seperti saiz titisan, struktur permukaan dan keserasian bahan yang perlu dipertimbangkan dengan teliti untuk meningkatkan prestasi penuaian tenaga dan memastikan jangka hayat peranti yang dihasilkan lebih panjang (Yuan & Guo 2024).

2.3 BAHAN TRIBO

Penggunaan bahan dalam menghasilkan peranti TENG merupakan antara faktor yang utama dalam mempengaruhi prestasi penjanaan tenaga di dalam peranti TENG. Terdapat pelbagai jenis bahan yang telah digunakan dalam teknologi penjanaan tenaga. Namun, bagi aplikasi peranti TENG berasaskan titisan air, pemilihan bahan tribo yang sesuai adalah penting bagi memastikan proses penjanaan tenaga dapat berlaku secara efektif melalui interaksi titisan air dengan permukaan bahan tersebut. Bahan tribo atau bahan triboelektrik merupakan bahan yang mampu menyimpan cas dan menjana elektrik melalui kesan triboelektrik. Penjanaan triboelektrik berlaku apabila dua permukaan bahan yang berbeza bersentuhan dan berinteraksi diantara satu sama lain, dan kemudiannya berpisah yang mengakibatkan elektron berpindah dari satu bahan ke

bahan yang lain. Pemindahan ini berlaku disebabkan oleh ciri yang terdapat pada sesuatu bahan dimana bahan yang lebih elektronegatif akan cenderung menerima elektron manakala bahan elektropositif akan cenderung untuk memberikan elektron apabila dua bahan berinteraksi. Fenomena yang terjadi ini juga kebiasaannya dikenali sebagai potensi triboelektrik dimana bahan yang menerima elektro akan menjadi negatif dan bahan yang kehilangan elektron akan menjadi positif. Proses pemisahan dan pengabungan akan mewujudkan perbezaan keupayaan atau voltan.

Teori kewujudan perbezaan keupayaan ini melalui proses pemisahan dan penggabungan dapat dilihat melalui formula pontensi triboelektrik seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$V = \frac{Q \cdot d}{\epsilon_0} \quad \dots(2.8)$$

Q merupakan ketumpatan cas permukaan, d ialah jarak pemisah dan ϵ_0 kebolehtelapan ruang bebas (Bista et al. 2023). Daripada formula ini, dapat dilihat bahawa semakin banyak cas pemindahan cas berlaku, lebih banyak kadar voltan yang terhasil daripada peranti TENG yang dihasilkan. Bagi peranti bersaskan titisan air, formula persamaan (2.2) telah digunakan bagi memperoleh voltan(V):

$$V = \frac{Q}{C} \quad \dots(2.9)$$

Dimana, Q , merupakan cas yang terjana melalui kesan tribo diantara PTFE dan titisan air, manakala C merupakan kemuatan diantara titisan air dan elektrod (Bista et al. 2023). Penjanaan voltan ini dapat digunakan untuk menghasilkan tenaga daripada peranti TENG yang dihasilkan. Terdapat beberapa faktor utama yang dapat mempengaruhi kadar penjanaan tenaga melalui kaedah tribo termasuk perbezaan afiniti elektron, permukaan dielektrik dan struktur permukaan.

Afiniti elektron (EA) merupakan kebolehan sesuatu bahan untuk menerima (tribo-negatif) dan memberi elektron (tribo-positif). Nilai sesuatu elektron afiniti dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$EA = E_{neutral} - E_{anion} \quad \dots(2.10)$$

Dimana, $E_{neutral}$ merupakan jumlah tenaga neutral bagi sesebuah atom atau zarah dan E_{anion} merupakan jumlah tenaga bagi atom atau zarah selepas memperoleh elektron (Zhan, Wang, et al. 2020). Formula ini menunjukkan jumlah tenaga yang dikeluarkan apabila atom atau zarah neutral menerima satu elektron. Dapatan daripada formula ini, dapat dikatakan bahawa perbezaan afiniti elektron yang tinggi menunjukkan terdapat pertukaran elektron yang lebih tinggi dan seterusnya dapat menghasilkan penjanaan cas elektrik yang lebih baik.

Selain itu, permukaan dielektrik sesuatu bahan juga dapat mempengaruhi kadar penjanaan tenaga pada peranti. Ciri dielektrik merupakan ciri penyimpanan cas yang terdapat pada sesuatu bahan. Ciri ini mampu membantu menyimpan cas dengan yang lebih banyak sebelum dilepaskan ketika proses triboelektrik dilakukan. Kemampuan penyimpanan cas ini dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad \dots(2.11)$$

Dimana, C merupakan kemuatan, ϵ_0 kebolehtelapan ruang bebas, ϵ_r pemalar dielektrik bagi bahan tribo, A merupakan kawasan interaksi dan d merupakan ketebalan lapisan dielektrik. Kesemua perhubungan ini dapat mempengaruhi kadar kemuatan yang dapat diperoleh daripada peranti TENG yang dihasilkan (Hu et al. 2024). Namun, nilai ϵ_r merupakan antara perkara perlu di titik beratkan kerana ia pemilihan bahan tribo yang baik dapat memberikan pengaruh yang lebih besar pada kemuatan penyimpanan cas. Kemampuan penyimpanan cas yang lebih banyak ini dapat memberikan kadar penjanaan yang lebih tinggi berbanding bahan yang tidak memperoleh ciri ini. Akhir sekali, struktur permukaan juga mampu mempengaruhi kadar penjanaan dalam triboelektrik. Permukaan yang lebih kasar dan berstruktur mampu memberikan kadar penjanaan tenaga yang lebih baik yang disebabkan oleh peningkatan luas permukaan sentuhan dan menyebabkan lebih banyak elektron berpindah semasa interaksi diantara dua bahan.

Bagi aplikasi penjana nano triboelektrik (TENG) berasaskan titisan air, bahan tribo yang digunakan lebih menekankan sifat pengumpulan cas yang cekap ketika berlaku interaksi antara titisan air dan permukaan peranti. Sifat ini memainkan peranan penting dalam mempengaruhi jumlah cas yang terkumpul ketika proses penjanaan triboelektrik berlaku. Ciri bahan yang mempunyai kelebihan dalam penyimpanan dan pengumpulan yang lebih cekap dapat memberikan pengaruh yang besar dalam penjanaan tenaga triboelektrik dengan memberikan pengaruh terhadap pemindahan elektron ketika proses sentuhan-pengasingan berlaku (Chen, Zhang, et al. 2020). Kelebihan pengumpulan cas ini dapat dikenal pasti melalui nilai dielektrik sesuatu bahan. Bahan yang mempunyai nilai dielektrik yang tinggi mampu mengekalkan serta mengumpulkan cas dalam jumlah yang lebih besar. Selain itu, bagi menghasilkan peranti TENG yang berprestasi baik, bahan triboelektrik yang mempamerkan sifat seperti geseran rendah, kadar haus yang perlahan, serta kestabilan terma dan kimia yang tinggi dapat membantu meningkatkan keberkesanan penjanaan tenaga elektrik serta memastikan prestasi peranti lebih konsisten dan tahan lama (Qian et al. 2019).

Terdapat beberapa bahan tribo yang biasa digunakan dalam menghasilkan peranti TENG berasaskan titisan air seperti *polytetrafluoroethylene* (PTFE), *polydimethylsiloxane* (PDMS), dan *fluorinated ethylene propylene* (FEP). Bahan ini lazimnya digunakan sebagai substrat TENG berasaskan titisan air kerana sifat elektronegatifnya yang tinggi, membolehkannya menjana cas elektrik dengan lebih ketara apabila berinteraksi dengan bahan lain, terutamanya kerana kemampuannya yang baik untuk berinteraksi dengan titisan air (Wu et al. 2021). Rajah 2.11 menunjukkan siri bahan triboelektrik daripada elektropositif sehingga elektronegatif (Kim, Lee, Park, et al. 2017). Daripada rajah yang ditunjukkan, PTFE merupakan bahan tribo dengan tahap elektronegatif yang tertinggi berbanding bahan lain. Sifat ini membantu meningkatkan kadar pemindahan cas antara PTFE dan titisan air, seterusnya meningkatkan potensi penjanaan. Selain itu, PTFE mempunyai nilai dielektrik sekitar ~ 2.1 , walaupun penyimpanan casnya tidak terlalu tinggi, keupayaannya mengekalkan cas menjadikannya sesuai digunakan dalam peranti TENG. Berdasarkan kelebihan ini, kajian ini menggunakan polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon) sebagai substrat bagi penghasilan peranti TENG berasaskan titisan air.



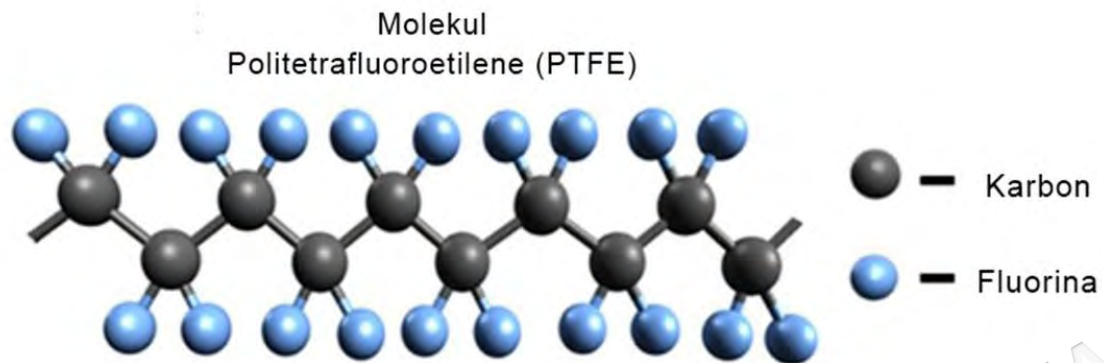
Rajah 2.11 Siri bahan triboelektrik

Sumber: (Kim, Lee, Park, et al. 2017)

2.3.1 Polytetrafluoroethylene (PTFE)

Polytetrafluoroethylene (PTFE), atau dikenali sebagai Teflon merupakan *fluoropolimer* sintetik yang terkenal dengan sifatnya yang unik menjadikannya salah satu bahan yang kerap digunakan dalam aplikasi kejuruteraan dan perindustrian. Monomer PTFE terdiri daripada tetrafluoroethylene (TFE) yang mempunyai ikatan C-F dengan formula molekul $[(CF_2-CF_2)_n]$ seperti yang di tunjukan pada Rajah 2.12. Bahan ini mempunyai tahap geseran yang sangat rendah, kestabilan kimia yang sangat baik, rintangan haba yang tinggi dan sifat dielektrik yang baik (Dhanumalayan et al. 2018). Kelebihan fizikal PTFE menjadikannya bahan yang sesuai digunakan sebagai substrat utama dalam peranti TENG. Sifat fizikal yang baik membolehkan PTFE bertahan dalam pelbagai persekitaran serta menahan impak berterusan daripada titisan air, yang berpotensi

menyebabkan hakisan. Dengan ketahanan ini, peranti TENG berasaskan titisan air dapat berfungsi dengan lebih stabil dan tahan lama.



Rajah 2.12 Molekul PTFE

Sumber: (Dhanumalayan et al. 2018)

Sehubungan itu, PTFE juga mempunyai permukaan bersifat hidrofobik. Sifat ini wujud kerana struktur asas fluorin yang padat pada PTFE, menjadikannya mampu menolak air dengan kuat. Lapisan fluorin yang licin dan tenaga permukaan yang rendah menyebabkan titisan air sukar merebak atau melekat pada permukaan PTFE. Fenomena ini titisan air lebih cenderung untuk berguling pada permukaan daripada membasahnya apabila berinteraksi dengan permukaan PTFE. Penjana nano triboelektrik (TENG) memerlukan permukaan yang bersifat hidrofobik bagi meningkatkan kecekapan penuaian tenaga, terutamanya dalam sistem triboelektrik berasaskan titisan air. Permukaan hidrofobik mampu menolak air dan mengurangkan lekatan titisan, yang membolehkan interaksi antara titisan air dan permukaan peranti berlaku dengan lebih terkawal semasa proses triboelektrik (Zhang et al. 2023).

Selain itu, sifat hidrofobik semula jadi yang terdapat pada PTFE juga dapat mengelakkan daripada kesan *sweating effect* untuk berlaku. Kesan berpeluh (*sweating effect*) berlaku apabila kelembapan terserap pada permukaan dielektrik akibat air atau kelembapan, menyebabkan pembebasan cas terperangkap berlaku dengan lebih cepat. Kesan ini bersifat negatif dan perlu dielakkan pada peranti triboelektrik berasaskan titisan air kerana ia boleh mengurangkan ketumpatan cas serta menjejaskan kestabilan penjanaan tenaga dalam operasi jangka panjang. Disebabkan PTFE bersifat hidrofobik, ia mampu menghalang daripada kesan peluh untuk berlaku dan ia juga merupakan ciri

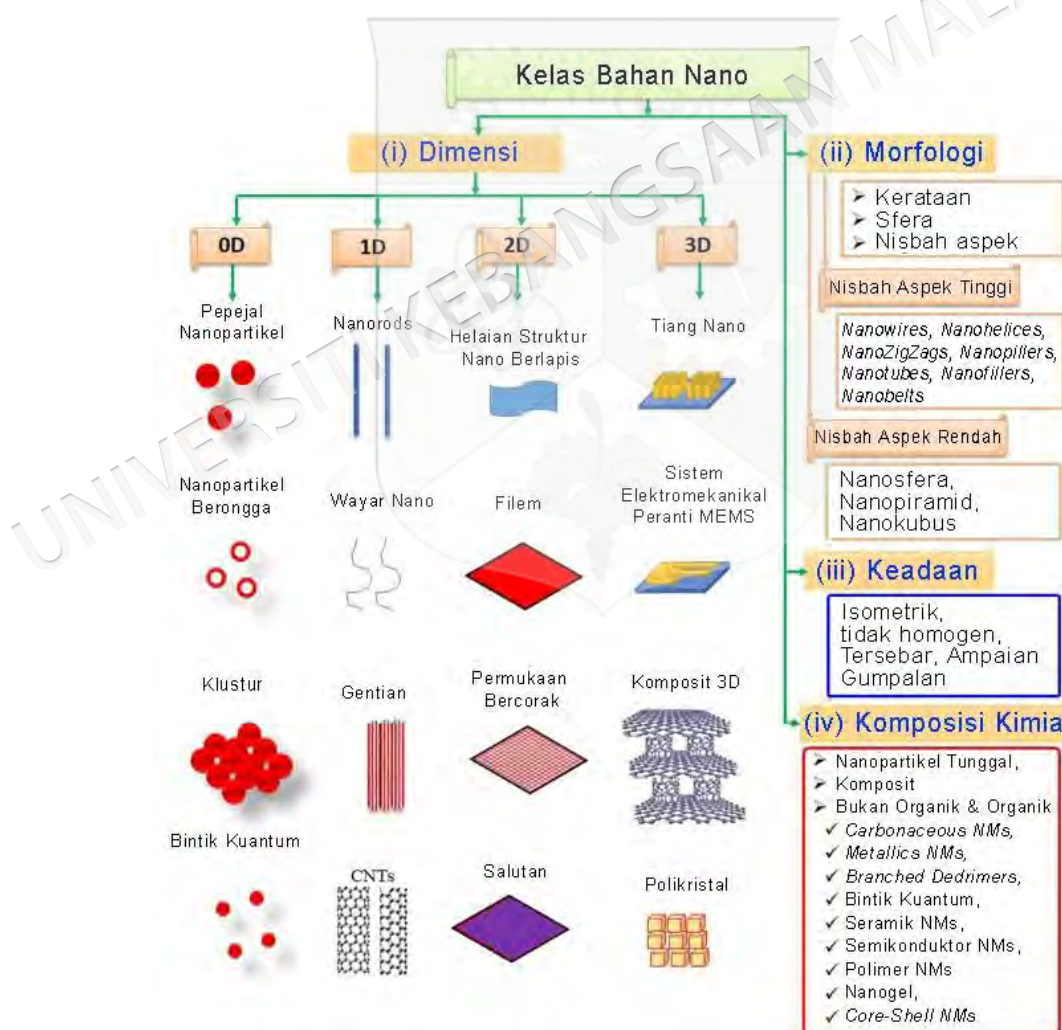
penting kenapa terdapat banyak penyelidikan yang menggunakan PTFE secara meluas dalam teknologi TENG berasaskan titisan air. Disebabkan PTFE bersifat hidrofobik, ia dapat menghalang berlakunya kesan peluh. Ciri ini menjadikan PTFE pilihan utama dalam banyak kajian dan aplikasi TENG berasaskan titisan air. Oleh itu, kelebihan permukaan hidrofobik ini amat penting untuk meningkatkan kecekapan, kestabilan, dan ketahanan TENG dalam aplikasi penuaian tenaga berasaskan titisan air.

Selain itu, PTFE juga mempunyai tahap keelektronegatifan yang sangat tinggi berbanding bahan lain. Keelektronegatifan merujuk kepada kecenderungan sesuatu atom untuk menarik atau menerima elektron. Semakin tinggi keelektronegatifan sesuatu bahan, semakin besar kecenderungannya untuk menerima elektron. Dalam aplikasi TENG berasaskan titisan air, sifat ini sangat penting kerana ia mempengaruhi kecekapan penjanaan serta pengekalan cas melalui kesan triboelektrik (Dhanumalayan et al. 2018). Tahap keelektronegatifan yang tinggi ini meningkatkan keupayaan PTFE untuk menarik dan menahan elektron, seterusnya menghasilkan perbezaan potensi yang diperlukan untuk penjanaan tenaga. Kelebihan tersebut membolehkan PTFE menarik elektron daripada titisan air dan menghasilkan tenaga triboelektrik walaupun pada kadar yang kecil. Dengan ciri ini, PTFE menjadi salah satu calon bahan terbaik untuk digunakan sebagai substrat dalam peranti TENG kerana ia mampu memberikan prestasi penjanaan tenaga yang lebih tinggi berbanding bahan lain.

Walau bagaimanapun, masih terdapat cabaran seperti penghasilan tenaga yang rendah dan kurang stabil, yang mendorong kepada keperluan penyelidikan berterusan bagi mencapai potensi penuh TENG berasaskan titisan air. Hal ini kerana PTFE mempunyai nilai pemalar dielektrik yang rendah, iaitu sekitar ~ 2.1 , yang menyebabkan keupayaannya menyimpan cas pada peranti menjadi terbatas. Dengan peningkatan sifat ini, peranti yang dihasilkan mampu memberikan kadar penjanaan tenaga yang lebih baik. Terdapat pelbagai kaedah untuk meningkatkan prestasi PTFE dalam peranti TENG, antaranya melalui penggunaan bahan nano. Bahan nano boleh disepadukan bersama PTFE bagi meningkatkan keupayaan penyimpanan dan pemindahan cas dengan lebih cekap, dan ini membantu menghasilkan penjanaan tenaga yang lebih tinggi.

2.4 BAHAN NANO

Rajah 2.13 menunjukkan klasifikasi dimensi bahan nano berdasarkan kriteria yang berbeza. Bahan nano merupakan sesuatu bahan yang mempunyai ciri struktur pada skala nano yang biasanya bersaiz diantara 1 sehingga 100 nanometer. Bahan nano kerap digunakan kerana mempunyai sifat yang unik berbeza dengan bahan pukal yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti bahan nano mempunyai nisbah permukaan yang luas kepada isi padu yang tinggi, kesan kuantum dan kadar interaksi atom yang lebih tinggi pada permukaan (Chia et al. 2021). Sifat unik bahan ini dapat mempengaruhi prestasi sesuatu bahan termasuk peningkatan kreatifan kimia, kekuatan mekanikal, memberikan sifat optik yang unik dan mengubah sifat elektronik sesuatu bahan jika disepadukan (Glavin et al. 2020).



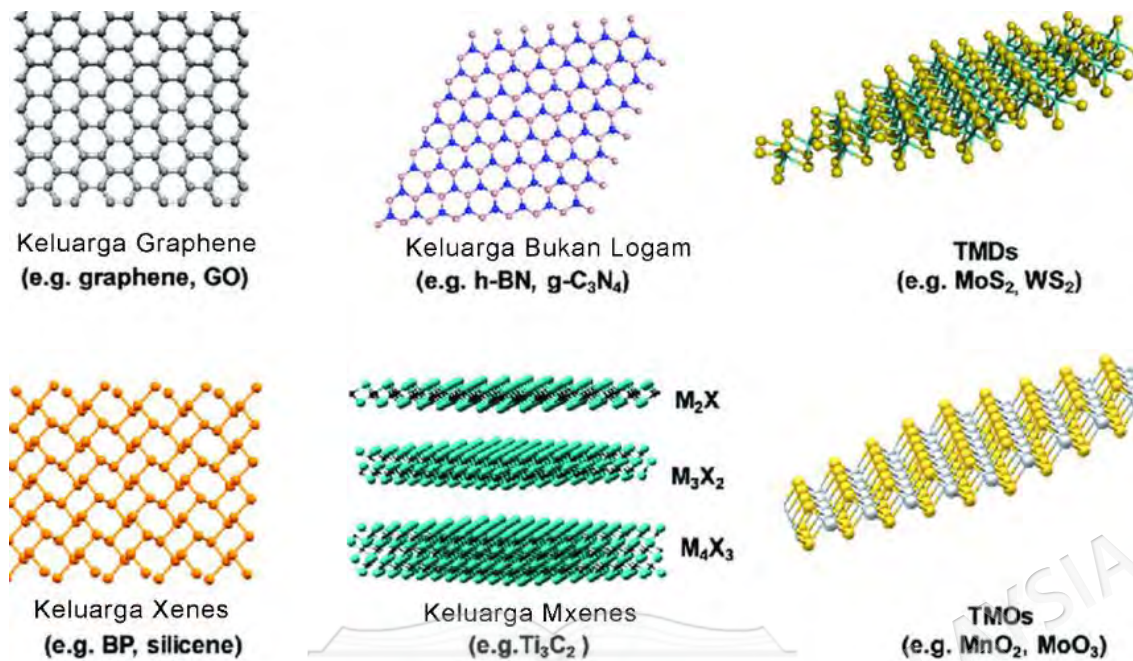
Rajah 2.13 Ilustrasi skematik klasifikasi bahan nano berdasarkan kriteria yang berbeza

Sumber: (Saleh 2020)

Pada masa kini, terdapat pelbagai bahan nano yang telah dihasilkan dan telah dikategorikan kepada beberapa jenis mengikut dimensi. Diantara kategori dimensi bahan nano yang telah dihasilkan ialah dimensi sifar, satu dimensi, dua dimensi, dan bentuk tiga dimensi (Saleh 2020). Dalam kajian ini, bahan dua dimensi telah digunakan dalam sebagai salutan didalam peranti TENG yang telah dihasilkan. Pemilihan bahan dua dimensi (2D) disebabkan oleh bahan nano ini dapat menawarkan kelebihan yang tersendiri berbanding dengan bahan dimensi lain (0D, 1D dan 3D) kerana bahan 2D mempunyai struktur dan sifat uniknya yang tersendiri. Bahan 2D mempunyai satah atom yang berterusan menyebabkan ia mampu memberikan kadar pengangkutan elektron yang lebih baik dan penyepaduan mekanikal yang lebih tinggi apabila digunakan sebagai salutan (Khan et al. 2020). Sehubungan itu, bahan 2D juga mempunyai nisbah permukaan ke isi padu yang lebih tinggi yang dapat memudahkan kadar interaksi antara atom. Sifat-sifat semula jadi ini menjadikan bahan 2D pilihan utama di dalam kajian ini.

2.4.1 Bahan Dua Dimensi

Bahan dua dimensi (2D) sering dianggap lebih unggul daripada bahan dimensi lain kerana sifat uniknya yang berstruktur skala atom nipis dan planar. Bahan dua dimensi (2D) ialah kelas bahan yang hanya mempunyai hanya satu atau beberapa lapisan atom tebal (Ma et al. 2021). Rajah 2.14 menunjukkan antara bahan 2D yang biasa digunakan dan struktur molekulnya. Sifat atomnya yang nipis membolehkan ia mempunyai sifat yang unik berbeza dengan bahan pukal. Selain itu, bahan 2D juga mempunyai nisbah luas permukaan kepada isi padu yang tinggi menjadikannya mempunyai sifat kereaktifan yang tinggi dan memberikan interaksi yang sangat cekap dengan persekitaran (Zhang et al. 2022). Sehubungan itu, bahan 2D juga mempunyai sifat elektronik yang luar biasa menawarkan pengaliran elektrik sangat baik, luas permukaan yang tinggi, sifat boleh laras dan jurang jalur yang lebar yang mempengaruhi kecekapan sifat pemindahan caj dan penukaran tenaga (Wang, Guo, et al. 2022). Bahan 2D telah digunakan secara meluas dalam pelbagai bidang seperti dalam bidang elektronik, penyimpanan tenaga, aplikasi bioperubatan dan penuaian tenaga (Fan et al. 2021).



Rajah 2.14 Struktur molekul yang mewakili bahan 2D

Sumber: (Kurapati et al. 2016)

Pada masa kini, penggunaan bahan nano sebagai salutan berfungsi telah terbukti berkesan untuk meningkatkan prestasi penjana nano triboelektrik (TENG). Saiznya yang sangat kecil dan luas permukaan yang besar membolehkan bahan nano meningkatkan kecekapan penjanaan dan pemindahan cas, seterusnya menghasilkan output elektrik yang lebih tinggi (Liu, Ping, et al. 2021). Pelbagai jenis bahan nano telah diterokai untuk meningkatkan prestasi TENG, termasuk graphene, tiub nano karbon (CNTs), dan titanium dioksida (TiO₂). Jadual 2.1 menunjukkan beberapa kajian melibatkan bahan dua dimensi yang telah digunakan dalam penghasilan TENG. Namun, dalam kalangan bahan tersebut, masih tiada kajian yang menumpukan kepada penggunaan MXene sebagai bahan untuk meningkatkan prestasi TENG berasaskan titisan air. MXene merupakan keluarga karbida dan nitrida logam peralihan dua dimensi yang mempunyai potensi tinggi kerana menawarkan kekonduksian elektrik yang baik, sifat mekanikal yang kukuh, keupayaan kapasitan yang tinggi serta permukaan yang mudah diubah suai melalui tindak balas kimia. (Zhan, Si, et al. 2020). Sifat-sifat ini menjadikan MXenes sebagai bahan yang sangat sesuai untuk meningkatkan prestasi dan kecekapan TENG berasaskan titisan air. Dalam kajian ini, bahan 2D MXene telah digunakan kerana keunikan sifatnya yang menyebabkan ia sesuai digunakan dalam aplikasi seperti penjana nano triboelektrik titisan.

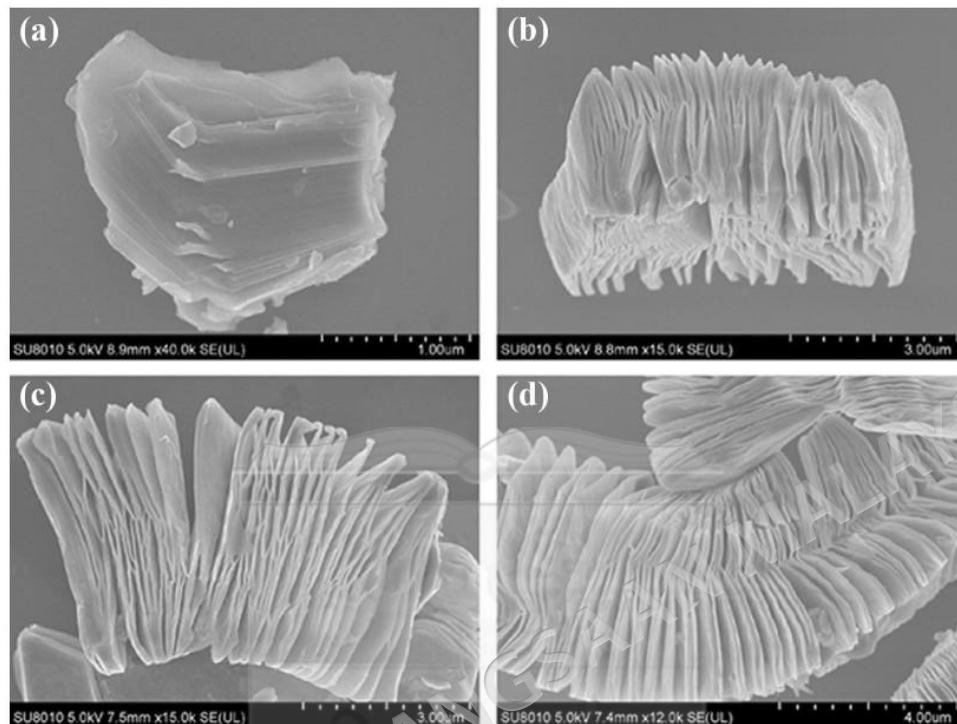
Jadual 2.1 Kajian penggunaan bahan dua dimensi dalam peranti TENG

Rujukan	Teknik fabrikasi	Bahan 2D	Penemuan dan prestasi
Kajian oleh Lin, Cheng, Wu, et al. (2014)	TENG berasaskan air dibina menggunakan lapisan TiO_2 untuk menuai tenaga elektrostatik daripada pergerakan air (output 1). Manakala Sentuhan-TENG diperbuat daripada filem PTFE yang digabungkan dengan lapisan nanozarah SiO_2 (output 2). Kedua-dua peranti ini disusun dalam konfigurasi berbentuk sandwich dan diuji pada kadar aliran 40mLs^{-1}	TiO_2 dan SiO_2	Peranti ini mampu menjana tenaga melalui titisan air menggunakan mod penjanaan dwifungsi dan berjaya menghasilkan arus dalam julat 18 hingga $43\text{ }\mu\text{A}$.
Kajian oleh Domingos et al. (2021)	TENG difabrikasi dengan menggunakan graphene sebagai elektrod serta lapisan triboelektrik aktif yang didepositkan. Graphene kemudian digabungkan dengan polimer PDMS untuk membentuk peranti TENG yang berfungsi.	Kepingan Graphene	Peranti ini mampu menjana output sekitar 233 V dan arus 731 nA.
Kajian oleh Yang et al. (2021)	Elektrod dibangunkan secara kimia menggunakan fluoropolymer (FP) dan karbon nanotube (CNT). Bentuk elektrod kemudian dibentuk pada permukaan fleksibel filem PEN dan FEP melalui proses penulisan dakwat terus (DIW) untuk menghasilkan peranti TENG.	Tiub karbon nano (CNT)	Peranti yang dibangunkan mampu menghasilkan arus sehingga 2 mA dan kuasa sebanyak 0.12 W.

2.4.2 MXene

MXene mempunyai sifat yang luar biasa termasuk ke pengaliran elektrik yang tinggi, luas permukaan yang besar, permukaan kimia yang boleh dikawal, kekukuhan mekanikal, fleksibiliti dan sifat hidrofilik. Sifat ini membolehkan MXene mampu digunakan dalam pelbagai aplikasi seperti penyimpanan tenaga dalam bateri dan *supercapacitors*, teknologi penderiaan, dan penuaian tenaga dalam penjana nano triboelektrik (TENG) (Li et al. 2018). Dalam peranti TENG, MXene memainkan peranan yang penting dalam mempengaruhi kadar pemindahan caj dan kecekapan penyimpanan tenaga. Sehubungan itu, struktur 2D MXene yang berlapis juga memudahkan bahan ini disepadukan ke dalam komposit atau filem untuk memberikan kawasan sentuhan yang lebih besar untuk interaksi triboelektrik. Permukaan kimia MXene juga mampu membantu dalam mengoptimumkan ke elektronegatifan dan meningkatkan kesan triboelektrik dan ketumpatan cas pada peranti yang dihasilkan

(Jiang et al. 2019). Rajah 2.15 menunjukkan imej Mikroskop Imbasan Elektrond (SEM) bagi struktur morfologi MXene.



Rajah 2.15 Imej SEM MXene (a) sebelum dan selepas proses punaran menggunakan asid hidrofluorik selama (b) 2 jam, (c) 10 jam dan (d) 20 jam.

Sumber: (Michael et al. 2019)

Meningkatkan kesan triboelektrik dan ketumpatan cas dalam penjana nano triboelektrik (TENG) merupakan kelebihan utama untuk menggunakan MXene pada peranti (Luo et al. 2021). Kumpulan berfungsi yang terdapat pada permukaan MXene, seperti -OH, -F, atau -O, membolehkan bahan ini membantu dalam mengoptimumkan keupayaannya untuk menderma atau menerima elektron bagi memaksimumkan pemindahan cas semasa proses triboelektrik berlaku (Bhatta et al. 2021). MXene juga mampu meningkatkan ketumpatan cas yang disebabkan oleh kekonduksian elektrik yang luar biasa dan luas permukaan 2D yang besar. Kekonduksian tinggi MXene berpunca daripada kehadiran kumpulan permukaan yang membolehkan cas bergerak dengan pantas serta mengurangkan kehilangan tenaga semasa operasi. Kumpulan permukaan ini juga menjadikan MXene serasi dengan polimer seperti polytetrafluoroethylene (PTFE), seterusnya meningkatkan interaksi permukaan dan menyokong penjanaan tenaga yang lebih cekap (Riazi et al. 2020). Struktur ini

menyediakan lebih banyak titik hubungan untuk interaksi triboelektrik dan memastikan pengumpulan dan pemindahan caj dapat dijana dengan cekap dan TENG menghasilkan isyarat elektrik yang lebih kuat (Ghorbanzadeh et al. 2024; Sardana, Mahajan, et al. 2023). Jadual 2.2 menunjukkan kajian penggunaan MXene dalam peranti TENG.

Jadual 2.2 Kajian penggunaan bahan MXene dalam peranti TENG

Rujukan	Teknik fabrikasi	MXene	Penemuan/Prestasi
Kajian oleh Wang et al. (2025)	TENG berasaskan komposit PDMS telah dipertingkatkan melalui penggabungan struktur sinergistik ZIF-8 dan MXene.	ZIF-8 dengan MXene	Peranti ini menunjukkan peningkatan sehingga 46 kali ganda pada voltan dan 26 kali ganda pada arus.
Kajian oleh Pratap et al. (2025)	Komposit polimer PVBVA dicampurkan dengan $Ti_3C_2T_x$ MXene dan dicetak pada substrat aluminium foil sebagai lapisan tambahan bagi fabrikasi peranti TENG.	$Ti_3C_2T_x$ MXene	Peranti ini menunjukkan peningkatan sebanyak 129% dalam penjanaan voltan dan 250% dalam penjanaan arus.
Kajian oleh Tao et al. (2024)	S-TENG berstruktur spring telah dihasilkan dengan menggunakan komposit Nb_2CT_x MXene-PVDF sebagai elektrod bagi meningkatkan ketumpatan cas dielektrik pada permukaan.	Nb_2CT_x MXene	Peranti S-TENG yang dihasilkan menunjukkan peningkatan prestasi sehingga 300% berbanding PVDF tulen.
Kajian oleh Wang, Wang, et al. (2023)	PDMS komposit telah dicampurkan dengan campuran MXene dan SiO_2 bagi meningkatkan keupayaan pengumpulan tenaga serta memperbaiki titik sentuhan antara cecair dan pepejal.	MXene/ SiO_2	Peranti ini menunjukkan peningkatan penjanaan voltan dan arus dengan faktor masing-masing sebanyak 47.5 dan 25.21.
Kajian oleh Salauddeen et al. (2022)	Teknik corak mikro telah digunakan untuk membentuk fabrik pada permukaan nanokomposit MXene/Silikon bagi aplikasi penderiaan berkuasa sendiri dan elektronik boleh pakai.	MXene/Silikon	Peranti ini menunjukkan peningkatan ketumpatan voltan dan arus dengan faktor masing-masing sebanyak 9.8 dan 20.

Walaupun, sifat hidrofilik pada permukaan MXenes telah memberikan cabaran untuk aplikasi TENG yang berasaskan titisan air. Perkara ini disebabkan oleh sifat kebolehasan yang kuat akan menyebabkan titisan air membasahi permukaan dan pembentukan lapisan air yang berterusan. Pembentukan ini boleh mengganggu kitaran pemisahan dan sentuhan proses TENG dan akan pengurangan dalam penghantaran cas elektron triboelektrik. Sehubungan itu, di bawah operasi lembap atau berterusan, kesan ini boleh juga menyebabkan pembentukan filem air pada permukaan,

mengakibatkan output elektrik yang tidak stabil dan berkurangan (Sardana, Sharma, et al. 2023; Yu, Lu, et al. 2023).

Bagi mengatasi kelemahan ini, penggunaan MXene dengan pengubahsuaian permukaan telah digunakan, seperti menfungsikan MXenes dengan kumpulan alkylammonium untuk memberikan sifat hidrofobik pada permukaan MXene disamping mengekalkan sifat asal MXene. Penggunaan MXenes hidrofobik ini berpotensi dalam membantu memberikan proses sentuhan dan lepasan titisan air yang lebih cekap, menghalang daripada pembentukan filem air pada permukaan, dan dapat meningkatkan kecekapan pemindahan cas diantara air dan peranti TENG. Kelebihan ini dapat membawa kepada kestabilan output penuaian tenaga yang lebih baik. Kajian penggunaan MXene hidrofobik dalam peranti TENG berasaskan titisan air masih belum lagi dilakukan. Oleh itu, kajian ini telah menggunakan MXene berjenis hidrofobik untuk di sepadukan ke dalam peranti TENG dengan menggunakan kaedah salutan.

2.5 PENSTRUKTURAN PERMUKAAN

Luas permukaan merupakan sifat asas sesuatu struktur permukaan bahan yang menerangkan jumlah kawasan yang terdedah untuk berinteraksi dengan persekitaran. Luas permukaan memainkan peranan yang penting dalam mengawal sifat fizikal, kimia dan biologi sesuatu bahan seperti mempengaruhi sifat lekatan, kebolehasahan, pemangkinan dan pemindahan cas (Kusior et al. 2022). Luas permukaan dapat dikategorikan kepada dua jenis iaitu yang pertama luas permukaan geometri yang merujuk kepada kawasan berdasarkan dimensi makroskopi, manakala yang kedua luas permukaan berkesan atau khusus yang menyumbang kepada kekasaran mikroskopik, kehadiran liang dan struktur ciri spesifik. Bahan dengan luas permukaan yang tinggi dapat mempamerkan keupayaan interaksi yang tinggi dan menjadikannya sesuai dalam aplikasi dalam teknologi seperti penuaian tenaga (Turar et al. 2025).

Kekasaran permukaan dapat membantu mempengaruhi luas permukaan kerana permukaan yang lebih kasar dengan ciri skala mikro dan nano mempunyai lebih banyak kawasan permukaan yang dapat berinteraksi jika dibandingkan dengan permukaan yang licin (Mu et al. 2023). Dalam aplikasi triboelektrik dan penuaian tenaga, mengoptimumkan kawasan permukaan melalui reka bentuk bahan dan kejuruteraan

permukaan adalah penting untuk memaksimumkan kecekapan pemindahan dan penjanaan cas yang dihasilkan. Fenomena ini berlaku apabila kekasaran atau luas permukaan yang lebih besar dapat meningkatkan titik sentuhan antara bahan dan membantu dalam proses pemindahan cas berlaku (Panda et al. 2022).

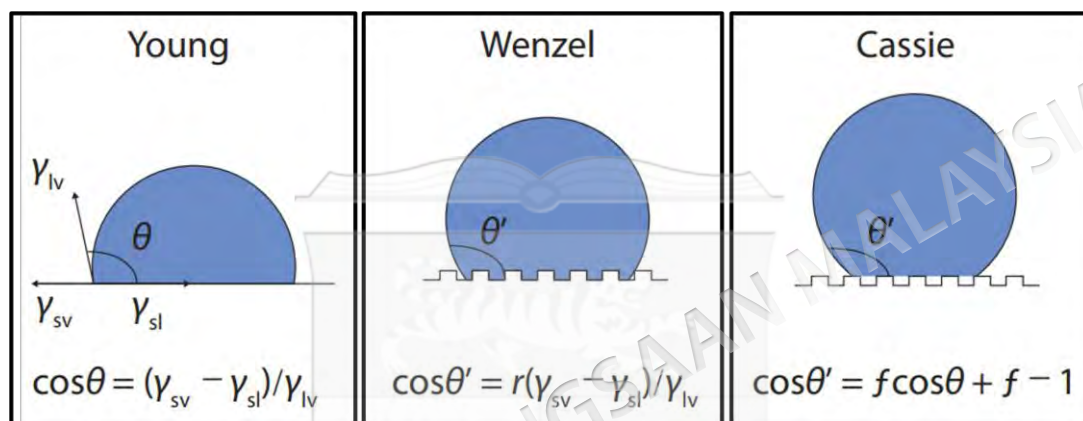
Apabila permukaan menjadi lebih kasar, ia akan membentuk lebih banyak puncak, lembah, dan struktur mikro yang akan menyumbang kepada jumlah kawasan yang lebih besar berbanding permukaan licin yang rata pada saiz dimensi yang sama. Walau bagaimanapun, hubungan ini tidak selalu linear (Mu et al. 2023). Hal ini kerana peningkatan luas permukaan bergantung kepada skala dan kerumitan ciri kekasaran yang dihasilkan. Namun, terdapat beberapa situasi yang mana kekasaran yang sangat tinggi boleh menyebabkan kadar sentuhan berkurangan dan berlaku pengurangan interaksi pada permukaan (Kato et al. 2023). Keadaan ini biasanya berkait rapat dengan fenomena hidrofobisiti.

Peningkatan pada kekasaran secara bersesuaian dapat memberikan sifat hidrofobik yang baik pada sesuatu peranti dan dapat membantu dalam memberikan proses sentuhan dan pisahan dalam penjanaan triboelektrik dengan lebih efisien. Walaubagai manapun, kekasaran ini perlu dikawal kerana kekasaran yang berlebihan akan menyebabkan pembentukan poket udara pada permukaan peranti apabila air berinteraksi dengan peranti. Hal ini menyebabkan pengurangan interaksi diantara titisan air dan peranti, seterusnya mengurangkan pemindahan elektron daripada air kepada peranti. Oleh itu, kekasaran pada permukaan dapat menyumbang kepada luas permukaan yang lebih besar dan sifat hidrofobik, tetapi tahap kekasaran perlu dikawal bagi memperoleh permukaan yang baik dalam membantu penjanaan tenaga.

2.5.1 Kekasaran Permukaan

Permukaan kekasaran mikro merujuk kepada tidak aturan tekstur permukaan pada skala mikro dan nano. Ia dicirikan dari segi ketinggian atau kedalaman ciri permukaan seperti bonggol, lembah dan puncak. Kekasaran permukaan biasanya dikira dengan parameter seperti kekasaran punca min kuasa dua (RMS), kekasaran purata (RA) dan ketinggian puncak ke lembah. konteks kekasaran permukaan, kehadiran ciri permukaan yang kasar

akan memberikan peningkatan dalam *effective surface area* (Attané et al. 2007). Model *Wenzel* dan *Cassie-Baxter* menerangkan cara kekasaran permukaan akan mempengaruhi kebolehbasaan dan boleh digunakan untuk mengaitkan luas permukaan dengan kecekapan interaksi untuk pelbagai aplikasi seperti pemindahan cas triboelektrik, lekatan dan penuaian tenaga. Rajah 2.16 menunjukkan kesan interaksi melalui model *Young*, *Wenzel* dan *Cassie-Baxter* yang menyatakan cara kekasaran berinteraksi dengan kebolehbasaan pada sesuatu permukaan (Nakajima 2011).

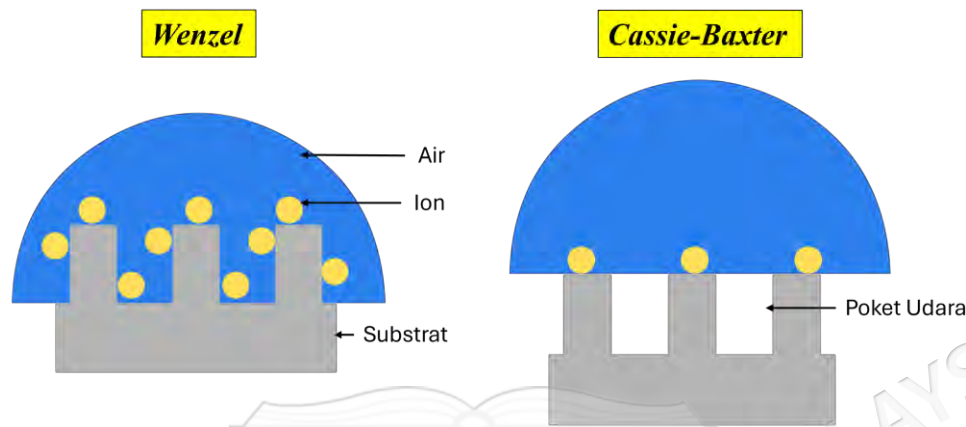


Rajah 2.16 Model *Young*, *Wenzel*, dan *Cassie-Baxter*

Sumber: (Nakajima 2011)

Model *Wenzel* digunakan apabila cecair membasahi permukaan kasar sepenuhnya dan meningkatkan kawasan sentuhan sebenar. Persamaan *Wenzel* menyatakan yang faktor kekasaran yang digunakan mewakili nisbah permukaan sebenar kepada luas permukaan geometri. Berdasarkan faktor yang terdapat di dalam formula ini, dapat di simpulkan bahawa kekasaran meningkat seiring dengan luas permukaan yang akan meningkatkan interaksi pada permukaan. Walau bagaimanapun, kekasaran yang berlebihan juga boleh menyebabkan pengurangan interaksi pada permukaan. Perkara ini dapat di terangkan melalui model *Cassie-Baxter*. Fenomena ini terjadi apabila kekasaran akan meminimumkan kawasan sentuhan air pada permukaan dan mewujudkan poket udara pada permukaan (Lu et al. 2021). Kehadiran poket udara ini akan mengurangkan kawasan sentuhan dan interaksi pada permukaan. Pada situasi ini, jurang udara telah mendominasi dan mengurangkan luas permukaan yang membawa kepada lekatan dan pemindahan cas yang lebih rendah. Rajah 2.17 menunjukkan lukisan skimetik bagi fenomena interaksi air dengan kekasaran

permukaan yang berbeza. Memahami perhubungan ini membantu dalam mengoptimumkan kekasaran permukaan untuk meningkatkan dan mengawal interaksi untuk aplikasi triboelektrik dan penuaian tenaga.



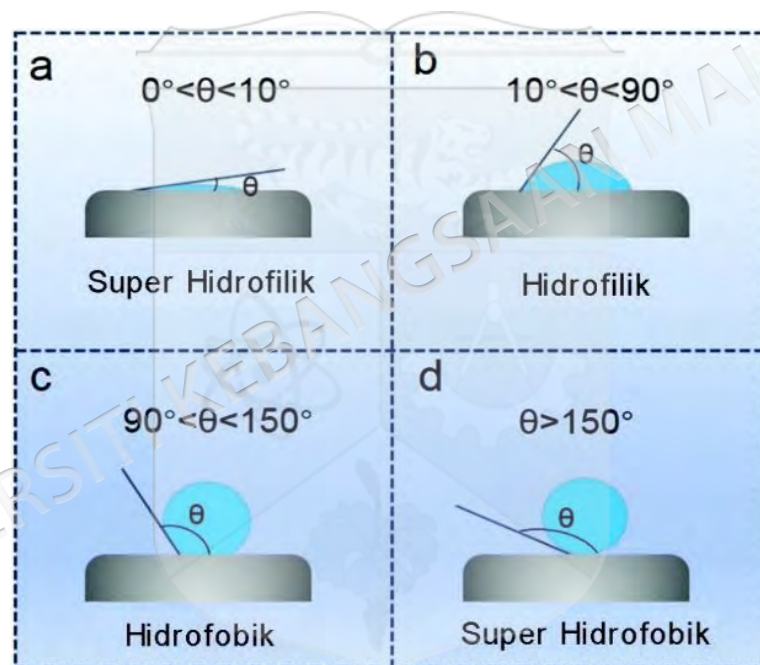
Rajah 2.17 Lukisan skematik fenomena interaksi air *Wenzel* dan *Cassie-Baxter*

Gabungan bahan yang mempunyai permukaan bersifat hidrofobik seperti PTFE dan kekasaran berskala mikro dapat menghasilkan permukaan yang baik untuk interaksi triboelektrik bagi menghasilkan teknologi penuaian tenaga yang lebih efisien. Namun, permukaan hidrofobik yang terhasil perlu di kawal bagi memperoleh proses sentuhan dan lepasan dapat berlaku dengan lebih baik. Sifat hidrofobik dapat ditentukan melalui sudut sentuhan atau sifat pembasahan yang terhasil diantara titisan air dan permukaan. Terdapat 4 kategori sifat pembasahan iaitu super hidrofilik, hidrofilik, hidrofobik dan super hidrofobik seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.18. Sifat super hidrofilik, dan hidrofilik terhasil apabila sudut sentuhan yang diperoleh diantara 0° sehingga 10° dan 10° sehingga 90° . Manakala, sifat hidrofobik dan super hidrofobik apabila sudut sentuhan yang terhasil adalah diantara 90° sehingga 150° dan 150° ke atas (Zhang & Xu 2021). Sifat hidrofobik dengan kekasaran interaksi *Wenzel* dapat memberikan kadar penjanaan yang baik. Perkara ini dapat dilihat melalui persamaan berikut:

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_0 \quad \dots(2.12)$$

Diamana θ_w mewakili sudut sentuhan yang terhasil pada permukaan yang mempunyai kekasaran dan θ_0 , pula adalah sudut sentuhan pada permukaan yang sebenar iaitu tanpa kekasaran (licin). Seterusnya, r merujuk kepada nisbah kekasaran yang

terdapat pada permukaan. Dapatan daripada persamaan ini menunjukkan bahawa bahan yang bersifat hidrofobik akan meningkatkan lagi ciri hidrofobik permukaan, manakala bahan yang bersifat hidrofilik pula akan menguatkan ciri hidrofiliknya (Li et al. 2021). Dengan penggunaan PTFE sebagai substrat dalam kajian ini, sifat hidrofobiknya berpotensi untuk dipertingkatkan dan seterusnya membantu dalam penjanaan tenaga pada peranti TENG. Oleh itu, pembentukan struktur dan tekstur pada permukaan peranti TENG mampu meningkatkan prestasi keseluruhan peranti. Kehadiran struktur atau tekstur ini dapat memainkan peranan penting dalam mempertingkatkan sifat hidrofobik serta memperkukuh interaksi antara titisan air dan permukaan, yang seterusnya membantu meningkatkan kecekapan penjanaan tenaga.



Rajah 2.18 Gambar skematik (a) super hidrofilik, (b) hidrofilik, (c) hidrofobik, dan (d) permukaan super hidrofobik dengan keadaan pembasahan yang berbeza

Sumber: (Zhang & Xu 2021)

Perkara ini dapat dibuktikan dengan kajian lepas yang dijalankan oleh Ameer et al. (2022) di mana kekasaran permukaan TENG dipertingkatkan dengan menggunakan kertas ampelas dengan *grit* kekasaran yang berbeza. Kajian ini menunjukkan peningkatan kekasaran dan luas permukaan mampu meningkatkan output penuaian tenaga. Namun, penggunaan kertas ampelas kebiasaannya tidak mampu menghasilkan struktur permukaan struktur yang konsisten menyebabkan penghasilan kekasaran tidak dapat dikawal. Terdapat pelbagai kaedah yang boleh digunakan dan mampu

menghasilkan struktur kekasaran seperti menggunakan kaedah plasma, fotolitografi, dan pemesinan mikro. Tetapi kaedah pemesinan mikro telah digunakan dalam kajian ini untuk menghasilkan struktur pada permukaan TENG kerana kosnya yang rendah, mudah digunakan dan mampu menghasilkan struktur yang terkawal.

2.5.2 Pemesinan Mikro

Pemesinan mikro merupakan permesinan termaju yang digunakan untuk mencipta sesuatu struktur dengan sangat tepat dan rumit pada skala mikrometer atau sub-mikrometer pada pelbagai bahan. Teknik pemesinan mikro boleh dikategorikan kepada, kaedah elektrik, kimia dan mekanikal. Kaedah pemesinan mikro laser menggunakan pancaran laser berkuasa tinggi untuk pemotongan, penggerudian dan penstrukturan permukaan yang tepat pada bahan seperti logam, seramik dan polimer. Teknik ini menawarkan ketepatan yang tinggi, membolehkan pembuatan komponen rumit seperti mikrochip, alat pembedahan dan struktur permukaan mikro (Owusu-Ansah et al. 2020). Pemesinan nyahcas elektrik (EDM) menggunakan percikan elektrik untuk menyingkirkan bahan bagi membentuk struktur menjadikannya sesuai digunakan untuk bahan keras dan ciri halus (Hadad et al. 2018).

Kaedah kimia pula termasuk kaedah fotolitografi dan *selective etching* untuk mengeluarkan bahan melalui tindak balas kimia dan digunakan secara meluas dalam pembuatan semikonduktor (Taskin et al. 2021). Manakala, kaedah mekanikal adalah seperti pengilangan mikro dan Pemutaran mikro melibatkan penyingkiran bahan menggunakan alat khusus yang keras dan tajam membolehkan pembentukan geometri kompleks dengan ketepatan yang tinggi (Yu et al. 2016). Kajian ini dijangka akan menggunakan kaedah pemesinan mikro mekanikal iaitu pemesinan CNC untuk meningkatkan luas permukaan pada peranti TENG yang dihasilkan.

Pemesinan CNC (pemesinan kawalan berangka komputer) mempunyai kelebihan yang tersendiri berbanding kaedah yang lain seperti kos yang rendah, menyediakan ketepatan tinggi, ke boleh ulangan dan kecekapan dalam proses penyingkiran bahan. Teknik ini juga berupaya menghasilkan ciri-ciri yang rumit pada skala mikro dengan ketepatan yang tinggi (Serje et al. 2020). Pemesinan mikro merupakan proses yang melibatkan penggunaan alat pemotong bersaiz mikro untuk

proses pemesinan untuk menghasilkan butiran halus pada bahan sama ada daripada logam, seramik, polimer dan komposit. Proses penggunaannya ini dapat dilihat lebih mudah jika di bandingkan dengan kaedah yang lain seperti (mikro molding dan fotolitografi) yang memerlukan proses yang lebih complex dalam menghasilkan struktur mikro. Terdapat kajian yang telah menggunakan pendekatan ini untuk menghasilkan sifat hidrofobik seperti kajian yang dijalankan oleh Zhu et al. (2018). Kajiannya menghasilkan struktur mikro pada permukaan aluminium aloi untuk menukarkan sifat permukaan daripada hidrofilik ke permukaan yang bersifat yang bersifat hidrofobik. Jadual 2.3 menunjukkan antara kajian yang telah menggunakan kaedah pemesinan CNC untuk meningkatkan sifat hidrofobik dan luas permukaan.

Jadual 2.3 Kajian penggunaan CNC dalam meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik

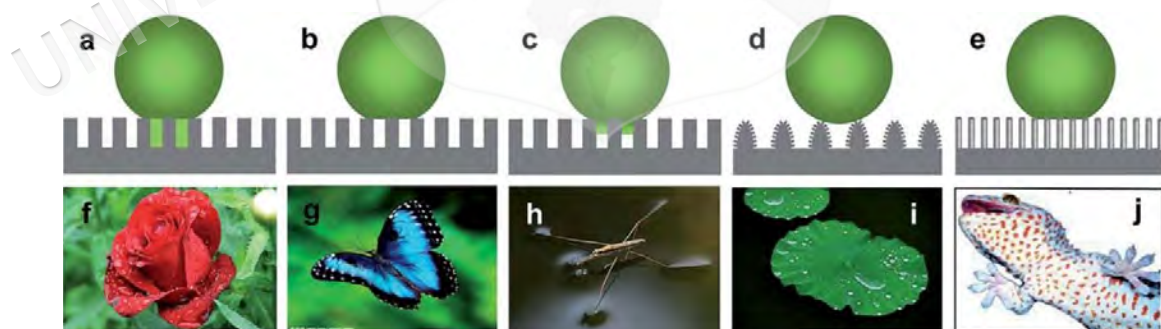
Rujukan	Teknik	Permukaan Bahan	Penemuan
Kajian oleh Zhu et al. (2023)	Simulasi digunakan untuk ramalan prestasi, manakala pemotongan mikro-milling digunakan bagi membentuk struktur alur.	316L <i>stainless steel</i>	Meningkatkan hidrofobik permukaan sehingga 146.5° dan mencapai ketepatan simulasi 98.4%
Kajian oleh Guerrero-Vacas et al. (2024)	Menggunakan kaedah mikro-milling dengan <i>ball nose tool</i> (struktur alur) dan dioptimumkan menggunakan kaedah Taguchi.	EN-AW 5083 H111 aluminium berlamina	Memberikan peningkatan kira-kira 20° pada sifat hidrofobik permukaan aluminium melalui struktur pemesinan CNC.
Kajian oleh Sooraj (2021)	Menggunakan kaedah CNC pemotong mikro (struktur alur) untuk menghasilkan kekasaran permukaan, dengan parameter pemesinan dikawal bagi meningkatkan sifat hidrofobik.	Aluminium AA6061	Struktur yang dihasilkan meningkatkan sifat hidrofobik permukaan sebanyak 3° hingga 7°.
Kajian oleh Lu et al. (2021)	Struktur dihasilkan menggunakan kaedah CNC <i>nanosecond pulsed laser</i> dengan morfologi biomimetik menyerupai daun <i>Bauhinia Linn.</i>	316S <i>stainless steel</i>	Struktur yang dihasilkan berjaya mengubah ciri permukaan daripada hidrofilik kepada hidrofobik, dengan sudut sentuhan $150.9 \pm 0.8^\circ$.

Dapatan kajian-kajin ini menunjukkan pemesinan CNC mampu untuk mengubah sifat sesuatu permukaan. Walau bagaimanapun, masih tiada kajian yang mengkaji kesan struktur permukaan terhadap prestasi peranti TENG berasaskan titisan air dengan menggunakan kaedah CNC secara pemotongan mekanikal. Struktur permukaan yang berbeza berpotensi menghasilkan kadar penjanaan tenaga yang

berlainan disebabkan oleh terdapat perbezaan dari sudut luas permukaan, sifat interaksi air dan sifat hidrofobik permukaan. Oleh itu, kajian ini telah mengkaji kesan struktur permukaan yang berbeza terhadap prestasi penjanaan tenaga dengan menggunakan kaedah CNC bagi menghasilkan variasi permukaan. Terdapat pelbagai struktur dan tekstur yang boleh digunakan antaranya struktur yang terdapat pada alam semula jadi dengan menggunakan prinsip biomimetik.

2.6 BIOMIMETIK

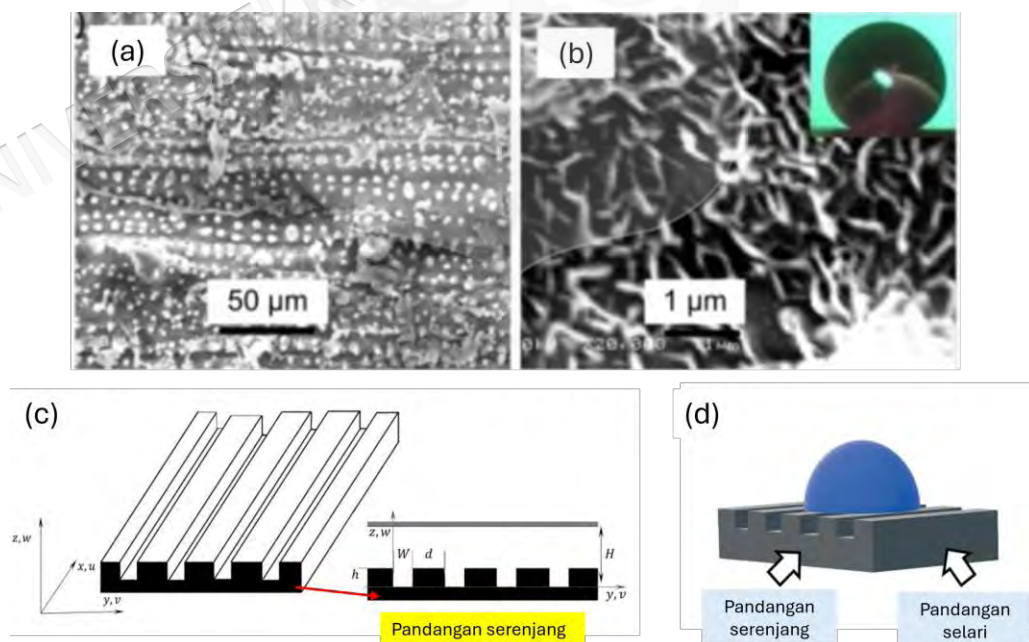
Biomimetik merupakan bidang antara disiplin yang mengkaji dan meniru reka bentuk, proses dan sistem alam semula jadi untuk menyelesaikan sesuatu masalah atau membangunkan teknologi yang inovatif. Teknologi ini mampu meniru dengan memerhati dan memahami cara organisma alam semula jadi menyesuaikan diri dan berfungsi untuk mencipta penyelesaian yang cekap, mampan dan berfungsi dalam bidang kejuruteraan dan sains bahan. Teknologi biomimetik ini dijangka dapat memainkan peranan yang penting dalam meningkatkan luas permukaan untuk pelbagai aplikasi, termasuk penuaian tenaga, interaksi bendalir dan lekatan. Banyak permukaan semula jadi, seperti daun teratai, kaki tokek, dan kulit jerung, mempamerkan kekasaran mikro dan skala nano yang dapat memberi peningkatan pada sifat hidrofobik dan luas permukaan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.19.



Rajah 2.19 Lima keadaan umum untuk permukaan anti-pembasahan (a) Keadaan Wenzel; (b) Keadaan Cassie-Baxter; (c) Keadaan Wenzel-Cassie; (d) keadaan “teratai”; (e) keadaan Tokek (*gecko*) dan beberapa fenomena sifat anti-pembasahan yang biasa dilihat pada alam semula jadi (f) kelopak bunga; (g) rama-rama; (h) ayak-ayak (*Strider*) (i) daun teratai; (j) Tokek (*gecko*)

Sumber: (Li, Huang, et al. 2017)

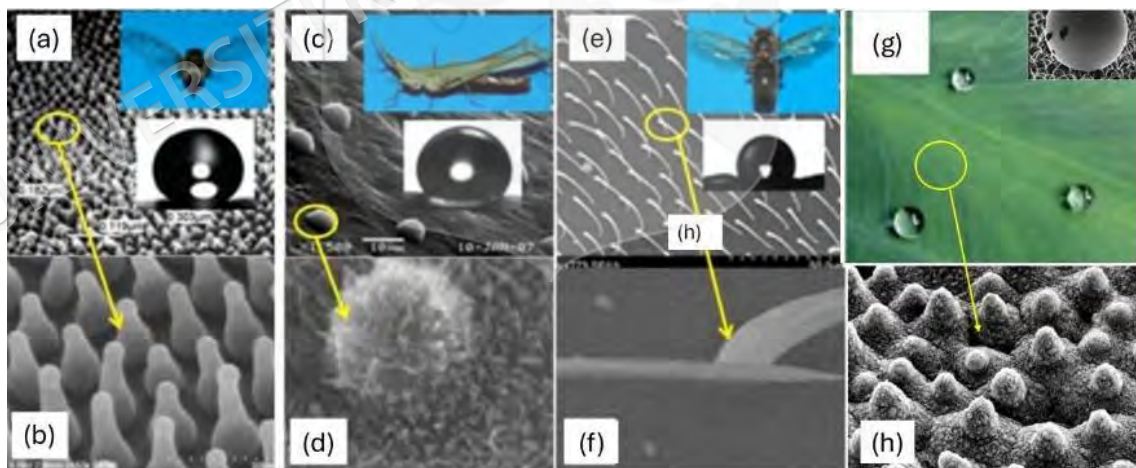
Banyak permukaan semula jadi, seperti daun teratai, kaki tokek, dan kulit jerung, mempamerkan kekasaran mikro dan skala nano yang dapat memberi peningkatan pada sifat hidrofobik dan luas permukaan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.19. Dengan meniru tekstur biologi pada teknologi TENG, ia boleh membantu peranti mencapai prestasi unggul dengan memberikan peningkatan terhadap sifat hidrofobik dan interaksi air pada permukaan. Sebagai contohnya, struktur mikro/nano hierarki yang terdapat dalam sayap rama-rama atau daun tumbuhan boleh mencipta permukaan yang mempunyai sifat kekasaran yang tinggi dan memberi peningkatan kawasan sentuhan yang menyebabkan penyerapan cahaya atau cecair semakin meningkat. Begitu juga, struktur kaki tokek, yang terdiri daripada berjuta-juta *setae* berskala nano yang menyebabkan interaksi maksimum pada permukaan untuk lekatan (Li, Huang, et al. 2017). Dalam aplikasi triboelektrik, permukaan kasar biomimetik dapat dimanfaatkan dalam meningkatkan kawasan sentuhan antara bahan ketika interaksi bagi meningkatkan kecekapan pemindahan cas. Selain itu, kekasaran biomimetik ini juga dapat mendorong permukaan memperoleh sifat hidrofobik dan membantu dalam menghasilkan interaksi sentuhan dan pelepasan yang lebih efisien, yang seterusnya meningkatkan kecekapan penjanaan tenaga.



Rajah 2.20 Imej (a) SEM permukaan daun padi, (b) ialah titisan air pada permukaan daun padi, (c) Geometri dan paksi koordinat permukaan biomimetik daun padi yang dikaji dan simulasi (d) Pandangan permukaan seranjang dan selari untuk orientasi pengukuran sudut sentuhan

Sumber: (Barraza et al. 2022; Lian et al. 2019)

Kajian Barraza et al. (2022) melaporkan bahawa struktur permukaan daun padi mempunyai kadar luas permukaan yang tinggi. Daun padi memiliki struktur mikro beralur pada permukaannya, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.20 (a) dan Rajah 2.20 (b). Melalui pendekatan biomimetik yang meniru struktur mikro ini, luas permukaan yang tinggi dapat dicapai dan seterusnya dimanfaatkan untuk aplikasi dalam teknologi TENG. Struktur pemesian mikro yang dihasilkan juga dapat dilihat seperti dalam Rajah 2.20 (c) dan Rajah 2.20 (d). Selain itu, terdapat juga struktur alam semula jadi lain yang mampu meningkatkan luas permukaan. Kajian oleh Xiu et al. (2006) dan Chen et al. (2023) melaporkan bahawa struktur permukaan hierarki turut berkeupayaan meningkatkan luas permukaan dengan berkesan. Struktur hierarki ini banyak ditemui dalam alam semula jadi seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.21. Struktur sedemikian berpotensi untuk diaplikasikan pada peranti TENG bagi meningkatkan luas permukaan dan membantu memperoleh penjana tenaga yang lebih efisien. Struktur biomimetik beralur dan hierarki yang wujud ini bukan sahaja dapat meningkatkan luas permukaan, namun sifat hidrofobiknya juga dapat dipertingkatkan seperti pada Rajah 2.20 dan 2.21. Perkara ini juga dapat membantu dalam memberikan proses penjana pada peranti TENG dengan lebih baik.



Rajah 2.21 Imej SEM struktur berskala mikro/nano hierarki permukaan sayap pelbagai serangga dan tumbuhan di mana (a, b) *Homoptera Meimuna opalifera* (Walker), (c, d) *Orthoptera Acrida cinerea cinerea* (Thunberg), (e, f) *Hymenoptera Vespa dybowskii* (Andre), dan (g, h) pada tumbuhan daun keladi.

Sumber: (Patankar 2004; Yoon et al. 2014)

Terdapat banyak penyelidikan yang dijalankan bagi merealisasikan tingkah laku permukaan alam semula jadi dengan menggunakan pelbagai kaedah dan teknik. Dalam kajian ini, kaedah pemesinan mikro CNC mekanikal digunakan untuk meniru topografi permukaan semula jadi, termasuk struktur beralur dan struktur hierarki. Keupayaan untuk memesis permukaan TENG dengan ketepatan yang tinggi menjadikan kaedah pemesinan mikro CNC mekanikal sebagai pendekatan yang menarik untuk memesis permukaan TENG bagi menghasilkan luas permukaan yang tinggi dan menambah baik sifat hidrofobik (Kuo et al. 2016). Namun, masih tiada kajian yang menggunakan pemesinan mikro CNC untuk menilai kesan perbezaan struktur biomimetik terhadap prestasi TENG berasaskan titisan air. Aplikasi pendekatan ini berpotensi menghasilkan kadar penjanaan tenaga yang berbeza dan membantu mengenal pasti struktur yang paling berkesan dalam meningkatkan prestasi TENG titisan air.

2.7 APLIKASI TENG BERASASKAN TITISAN AIR

Penjana nano triboelektrik berasaskan titisan air (TENG) telah mendapat perhatian ramai penyelidik kerana kemampuannya menjana tenaga melalui pelbagai sumber semula jadi seperti titisan hujan, pemeluwapan, geseran, dan percikan air. Peranti ini berpotensi digunakan secara meluas dalam pelbagai teknologi, terutamanya bagi aplikasi penderiaan alam sekitar, di mana peranti kecil ini dapat menghasilkan tenaga untuk menghidupkan penderia seperti pemantauan hujan, pengesanan kelembapan, atau analisis kualiti air menggunakan platform IoT (Lin et al. 2024). Sehubungan itu, peranti TENG ini juga boleh disepadukan dengan teknologi penuaian tenaga sedia ada, seperti peranti solar, membolehkan tenaga dijana melalui cahaya sambil tetap mampu menjana tenaga daripada titisan hujan apabila dipasang pada bangunan. Bagi aplikasi elektronik boleh pakai, TENG titisan air boleh digabungkan dengan jaket kalis air, payung, atau peralatan yang terdedah kepada persekitaran luar, membolehkan sistem berkuasa sendiri menjana elektrik daripada pendedahan hujan (Tang et al. 2019). Selain itu, TENG titisan air boleh digunakan dalam saluran paip, sistem pengairan, atau peralatan biomedikal untuk menjana tenaga bagi sensor pengesanan kebocoran, pemantauan aliran, atau menyalakan komponen elektronik (Pan et al. 2018). Di samping itu, peranti ini juga sesuai untuk aplikasi marin, di mana titisan air daripada percikan ombak atau permukaan kapal boleh dijana untuk membekalkan tenaga kepada pengesan lautan yang

diedarkan (Dip et al. 2023). Dapatan daripada aplikasi ini menunjukkan bahawa peranti TENG mampu digunakan dalam pelbagai teknologi. Walau bagaimanapun, kesesuaian pendedahan peranti terhadap persekitaran perlu diuji bagi memastikan keupayaannya menjana tenaga dengan berkesan. Sehingga kini, masih tiada kajian yang menghasilkan peranti TENG dengan penggabungan rawatan permukaan salutan dan pemesinan mikro biomimetik untuk pelbagai persekitaran. Justeru, kajian ini menumpukan kepada penghasilan peranti TENG yang menggabungkan rawatan permukaan untuk diuji pada persekitaran berbeza, termasuk air hujan, air laut, air paip, serta aplikasi bioperubatan seperti air NaCl.

2.8 RUMUSAN

Kajian perpustakaan yang telah dijalankan ini akan membantu penyelidikan ini dari sudut mengenal-pasti rangka kerja teori atau theoretical framework yang sesuai dengan kajian ini. Kajian yang memfokus kepada penambah-baikan prestasi suatu penjana nano triboelektrik ini dijangka mempunyai beberapa pemboleh-ubah yang akan digunakan bagi membentuk rangka kerja teori. Pemboleh-ubah bersandar (dependent variable) dan pemboleh-ubah tidak bersandar (independent variable) bagi kajian ini adalah kecekapan penukaran tenaga dan struktur biomimetik lapisan PTFE-MXene. Hubungan pemboleh-ubah ini diberi seperti dibawah:



Rajah 2.22 Hubungan pemboleh ubah

Seterusnya, kajian kepustakaan yang melihat kepada pengubahsuaian struktur permukaan dengan menggunakan pendekatan biomimetik dan teknologi salutan bahan 2D mendapati mampu meningkatkan prestasi penjana nano triboelektrik TENG titisan air. Kaedah ini mampu mempengaruhi beberapa faktor utama dalam TENG seperti dari penjanaan cas, kawalan luas permukaan dan juga ketahanan peranti. Reka bentuk permukaan biomimetik yang diilhamkan oleh struktur semula jadi dapat memberikan

peningkatan luas permukaan yang baik untuk interaksi permukaan dan memberikan sifat hidrofobik yang lebih baik. Kekasaran berskala mikro pada struktur ini dapat memberikan peningkatan pemindahan cas pada permukaan dan dapat membantu dalam menghasilkan kesan triboelektrik yang lebih baik pada peranti TENG. Kaedah yang digunakan dalam menghasilkan struktur ini adalah dengan menggunakan pemesinan CNC mikro mekanikal kerana ia mampu memberikan ketepatan yang tinggi dan menghasilkan struktur yang baik. Selain itu, penggunaan bahan 2D Mxene juga memberikan banyak kelebihan seperti membantu dalam meningkatkan kekonduksian elektrik, mempunyai luas permukaan yang tinggi, meningkatkan ketumpatan cas dan meningkatkan kecekapan pemindahan elektron dalam peranti TENG. Oleh itu, pendekatan penyepaduan teknologi ini dapat membuka jalan bagi sistem TENG yang lebih murah, mampan dan berprestasi tinggi yang potensi luas pada aplikasi seperti elektronik boleh pakai, penderian berkuasa sendiri dan peranti mudah alih. Jadual 2.4 menunjukkan perbandingan beberapa kajian mengenai ciri triboelektrik bagi peranti TENG. Jadual ini kelak akan digunakan bagi perbandingan hasil kajian yang dicadangkan di sini dengan hasil yang diberi oleh kajian lepas seperti dalam Jadual 2.4.

Jadual 2.4 Kesan penjanaan voltan dan arus terhadap kaedah fabrikasi peranti TENG yang berbeza

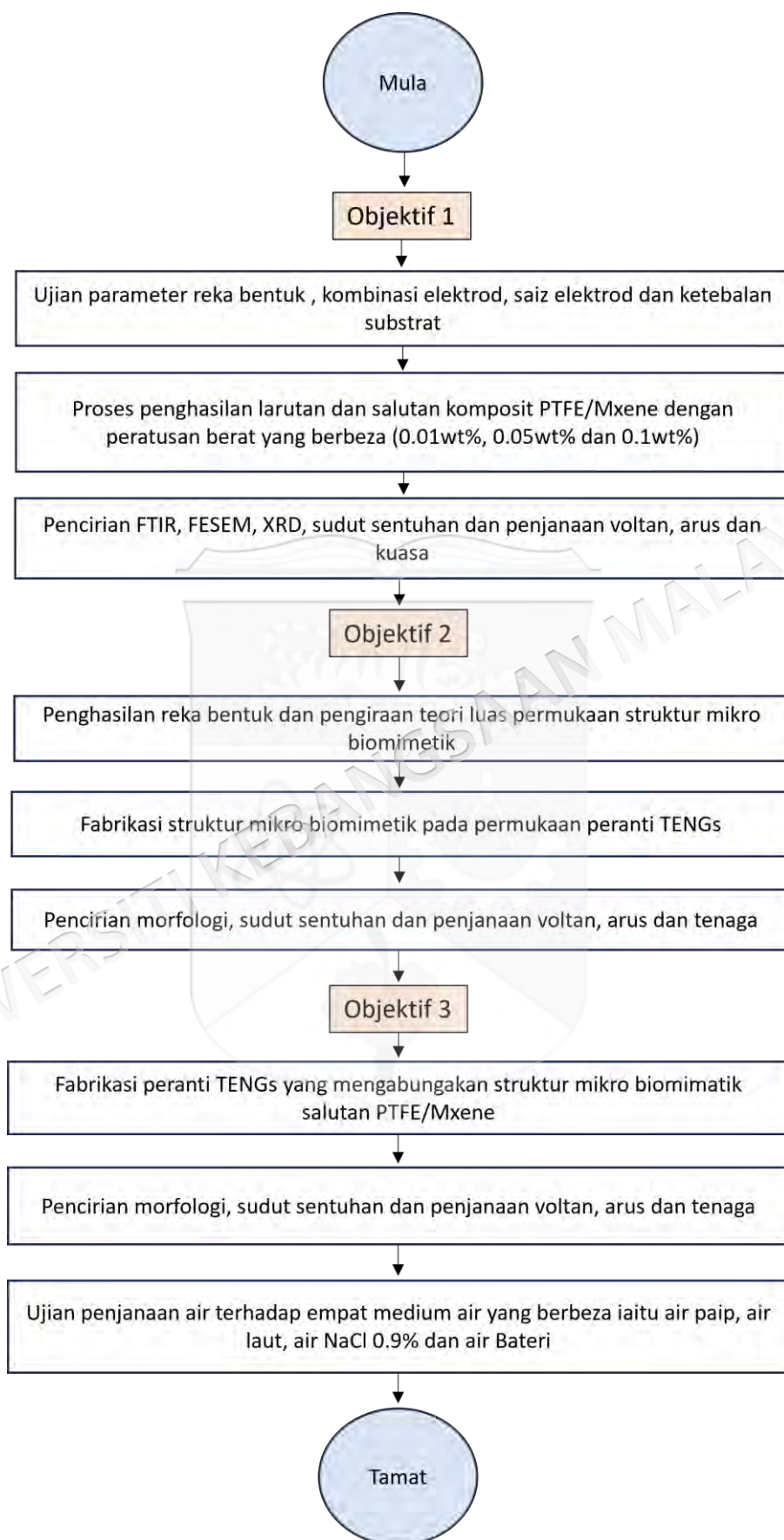
Rujukan	Objektif Kajian	Metodologi Kajian	Hasil	Perbandingan Prestasi
Wang et al. (2024)	Menghasilkan peranti TENG berstruktur benang teras cangkang	TENG berstruktur benang dihasilkan menggunakan keluli tahan karat dan FEP yang ditiup pengecut haba.	Berjaya menghasilkan peranti TENG berstruktur benang untuk aplikasi pada pakaian	Purata voltan: 1 V Purata arus : 0.4 μ A
Zhang et al. (2023)	Meningkatkan prestasi triboelektrik dengan menggunakan kaedah laser pada permukaan PTFE	Menggunakan rawatan laser untuk meningkatkan sifat hidrofobik permukaan PTFE	Memberikan peningkatan voltan daripada 52 V ke 63 V dan arus daripada 2.4 μ A ke 3.2 μ A pada permukaan yang menjalani proses laser	Purata voltan: 63 V Purata arus: 3.2 μ A
Yang, Wang, et al. (2023)	Menghasilkan peranti TENG yang mudah diregang	Menghasilkan peranti TENG menggunakan proses pengawetan silikon (Ecoflex 00-30).	Peranti TENG yang dihasilkan mempunyai ciri kebolehrengangan yang baik	Purata voltan: 1.34 V Purata arus: 63.01 nA
Chung et al. (2018)	Peranti TENG dengan peningkatan sifat hidrofobik dihasilkan dengan menggunakan kaedah semburan	Peranti TENG dihasilkan menggunakan aluminium berlapis pelekat dan lapisan semburan hidrofobik.	Kaedah semburan hidrofobik telah menghasilkan permukaan bersifat superhidrofobik dan meningkatkan penjanaan tenaga.	Purata voltan: 13.4 V Purata arus: 2.1 μ A
Choi et al. (2017)	Menghasilkan peranti TENG menggunakan daun teratai.	Peranti TENG dihasilkan menggunakan kaedah penukaran daun teratai kepada fluoropolimer serta pencetakan nano terma untuk menghasilkan elektrod.	Peranti TENG berasaskan daun teratai berjaya dihasilkan	Purata voltan: 284 mV Purata arus: 250 nA

BAB III

KAEDAH PENYELIDIKAN

3.1 PENDAHULUAN

Penjana nano titisan air merupakan antara peranti yang baru diperkenalkan bagi menjana sesebuah tenaga bersih. Namun, teknologi ini masih perlu diperbaharui dan beberapa inovasi yang baharu telah diperkenalkan untuk mempertingkatkan prestasi dalam peranti ini. Dalam bab ini, kaedah pembuatan peranti penjana nano titisan air yang baharu telah diperkenalkan untuk memberikan prestasi penuaian tenaga yang cekap. Terdapat 3 fasa dalam kajian ini iaitu pembuatan peranti penjana nano dan filem PTFE-MXene, penghasilan struktur mikro biomimetik dan ujian penjana nano triboelektrik titisan air pada medium air yang berbeza. Bab ini juga membincangkan mengenai bahan yang digunakan dalam pembuatan peranti seperti pemilihan jenis elektrod, pembuatan filem, dan jenis air yang digunakan bagi melihat prestasi penuaian tenaga pada peranti. Peranti ini di hasilkan dengan menggunakan beberapa parameter dan komposisi tertentu untuk mendapatkan komposisi yang terbaik dalam penuaian tenaga. Komposisi yang terbaik telah dipilih berdasarkan tenaga elektrik yang dihasilkan untuk proses seterusnya iaitu proses pemesinan pada permukaan. Permukaan ini diukir mengikut reka bentuk yang telah dikira mengikut teori luas permukaan dengan menggunakan kaedah pemesinan CNC. Sampel yang telah diukir akan menjalani ujian triboelektrik dengan menggunakan beberapa jenis medium air yang berbeza untuk melihat kesan air terhadap prestasi penuaian tenaga. Rajah 3.1 menunjukkan carta alir bagi ringkasan kajian.



Rajah 3.1 Carta alir metodologi kajian

3.1.1 KESAHAN DAN KEBOLEHPERCAYAAN

Kajian ini melibatkan pengukuran data kualitatif dan kuantitatif. Pengukuran data akan dilakukan berdasarkan kaedah penyelidikan yang diberi pada bahagian 3.2, 3.3 dan 3.4. Data kuantitatif akan melibatkan data yang diperoleh melalui ujian pengukuran data berbentuk numerikal atau angka sementara data kualitatif melibatkan data yang diperoleh melalui ujian pengukuran data berbentuk kualiti seperti imej dan pemerhatian. Di samping itu, data kuantitatif juga akan melibatkan pengukuran data dalam skala selang (interval) atau nisbah (ratio). Sementara data kualitatif pula akan melibatkan pengukuran data dalam skala nominal iaitu secara pelabelan sahaja.

Alat pengukuran atau instrumen yang digunakan di dalam kajian merangkumi alat pengukuran ciri elektrik, alat pencirian bagi mengukur morfologi, FESEM, alat mengukur ciri bahan XRD, FTIR dan alat mengukur sudut sentuhan. Instrumen-instrumen yang digunakan ini meliputi instrumen pengukuran yang sesuai dan menepati ciri-ciri kesahan atau *validity* seperti sesuai, betul, bermakna dan berguna. Kesahan data diperoleh berdasarkan pendekatan "kesahan kandungan" atau *content validity* iaitu merujuk kepada kemampuan alat pengukuran yang digunakan sejajar atau menepati ciri-ciri dengan instrumen di dalam sorotan kajian lepas. Sorotan kajian lepas membuktikan instrumen atau pengukuran yang serupa sudah ditentukan kesahan oleh pakar bidang kajian (Abdullah et al. 2022; Ismail 2022).

Seterusnya, instrumen atau alat pengukuran juga menepati kriteria kebolehpercayaan atau *reliability*. Kebolehpercayaan yang dimaksudkan di sini merujuk kepada ketekalan atau *consistency* alat pengukuran di dalam mengukur sesuatu parameter. Alat pengukuran atau instrumen yang digunakan di dalam kajian ini meliputi instrumen pengukuran yang sesuai dan menepati ciri-ciri kebolehpercayaan iaitu boleh dipercayai (Berawi 2017). Alat pengukuran atau instrumen yang digunakan mempunyai ciri-ciri yang diterima sebagai instrumen yang dipercayai iaitu memenuhi beberapa kriteria seperti instrumen yang sesuai digunakan berdasarkan persekitaran yang sesuai, keadaan subjek yang diuji dan ketepatan alat pengukuran. Di dalam kajian ini, kaedah yang digunakan bagi memastikan alat pengukuran boleh dipercayai adalah berdasarkan pendekatan teknik uji-uji semula atau test-retest (Ismail 2022). Pengukuran bagi sesuatu

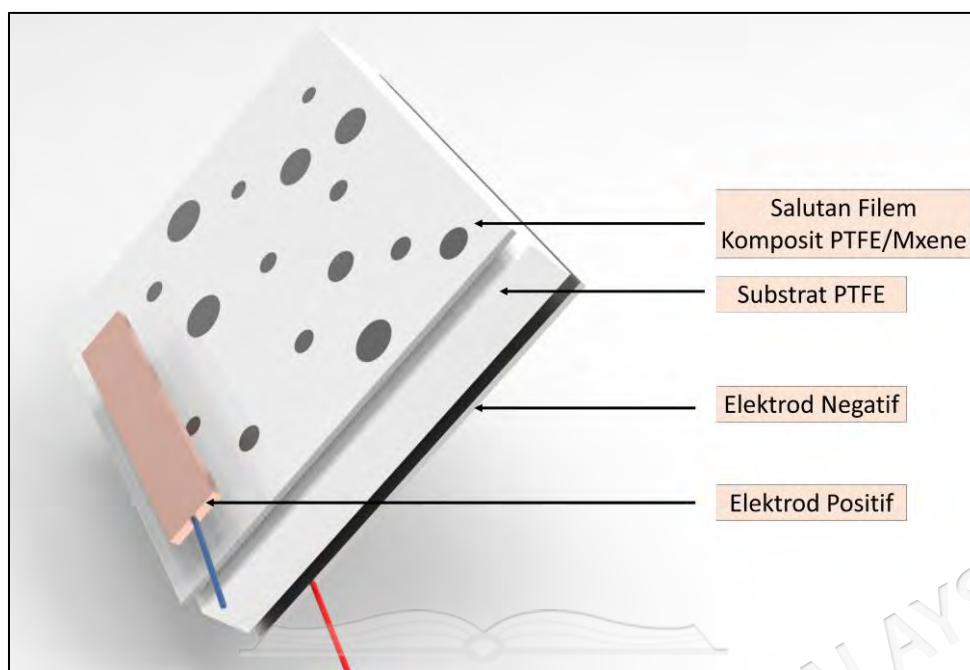
bacaan terutama pengukuran data kuantitatif akan diulang bagi memastikan tiada ralat dan data adalah tekal atau konsisten.

3.1.2 PENSAMPELAN

Kajian ini melibatkan pengumpulan data yang agak kecil. Memandangkan sampel yang diuji tidak melibatkan data pengukuran yang terlalu besar iaitu hampir kesemua data yang diukur akan digunakan apabila data tersebut dianalisis, maka pendekatan pensampelan yang digunakan adalah pensampelan bukan kebarangkalian atau *non-probability sampling*. Pensampelan bukan kebarangkalian atau juga dikenali sebagai pensampelan tidak rawak ini meletakkan syarat yang mana setiap unsur atau bahan uji tidak mempunyai kebarangkalian yang sama untuk dipilih. Pensampelan bukan kebarangkalian ini digunakan oleh kerana prosedur pensampelan melibatkan hanya kepada suatu kumpulan sasaran kajian sahaja seperti sampel yang telah siap diproses bagi salutan lapisan PTFE-MXene atau sampel yang telah siap melalui proses pemesinan CNC. Pendekatan pensampelan bukan kebarangkalian dengan sub-kategori pensampelan tujuan atau *purposive sampling* (Berawi 2017) adalah sesuai bagi kajian ini berdasarkan ketetapan sasaran yang dibuat bagi setiap sampel uji atau bahan uji.

3.2 KAJIAN FILEM KOMPOSIT PTFE/MXENE

Fasa fabrikasi peranti TENG merupakan fasa yang pertama di dalam kajian ini. Terdapat beberapa topik yang diperincikan pada bahagian ini. Bahagian pertama yang diperincikan adalah mengenai bahan-bahan dan kaedah yang digunakan dalam menghasilkan peranti TENG. Perincian mengenai bahan-bahan penyediaan iaitu PTFE dan MXene diterangkan dalam bahagian 3.2.1. Manakala, 3.2.2 memperincikan mengenai kaedah fabrikasi TENG. Fabrikasi filem komposit PTFE/MXene telah diterangkan pada bahagian 3.2.3 dan pencirian filem komposit perincian pada bahagian 3.2.4. Kajian ini dijalankan bagi mencapai objektif pertama kajian iaitu menilai kesan campuran salutan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan Mxene pada substrat PTFE dalam penghasilan penjanaan voltan, arus dan kuasa. Rajah 3.2 menunjukkan lukisan skematik bagi reka bentuk peranti TENG yang ingin dihasilkan.



Rajah 3.2 Lukisan skimetik bagi peranti TENG yang dihasilkan

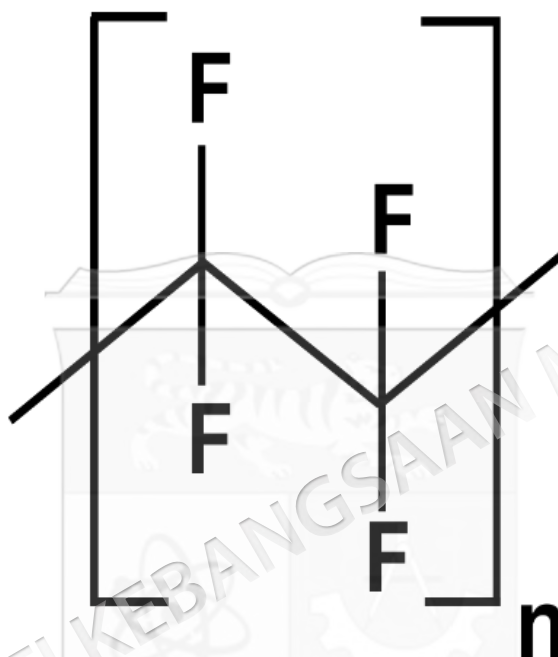
3.2.1 Bahan-bahan Penyediaan

Bahan-bahan kimia yang telah digunakan untuk menghasilkan filem nipis dalam peranti penuai adalah *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan MXene. Penerangan lanjut berkenaan bahan-bahan yang digunakan diterangkan secara terperinci dalam bahagian seterusnya. Kesemua bahan merupakan bahan komersial yang diperoleh daripada pembekal dan digunakan terus tanpa melakukan sebarang rawatan. Bahan PTFE akan di terangkan pada bahagian 3.2.1. Manakala, MXene akan terangkan pada bahagian 3.2.2.

1. *Polytetrafluoroethylene* (PTFE)

Polytetrafluoroethylene (PTFE) merupakan sebuah polimer berprestasi tinggi yang terkenal dengan sifat kimia yang luar biasa seperti kadar geseran yang rendah dan kestabilan haba yang baik. PTFE terdiri daripada gabungan antara atom karbon dan fluorin seperti yang di tunjukkan pada Rajah 3.3 yang menjadikannya terkenal dengan sifat lekatan yang rendah dan memperoleh ciri pembersihan diri. Selain itu, ia juga mempunyai tahap rintangan yang luar biasa terhadap bahan kimia termasuk asid dan bes menjadikannya bahan yang dipilih dalam pelbagai industri dan digunakan dalam

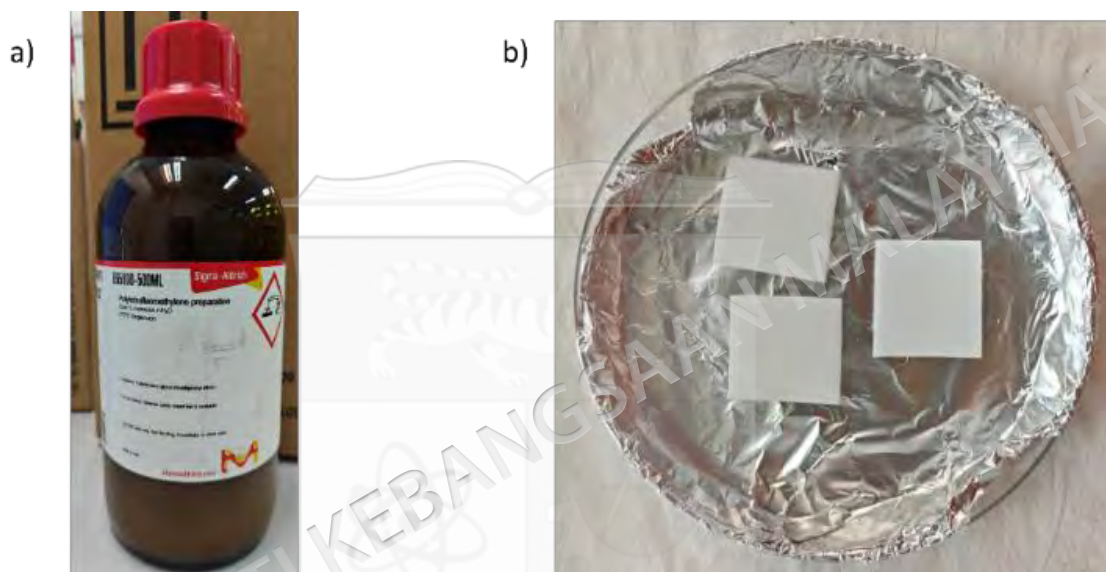
pelbagai aplikasi. PTFE juga mempunyai sifat ketahanan yang tinggi terhadap persekitaran kerana ia mempunyai takat lebur yang tinggi, tenaga permukaan yang rendah dan kestabilan strukturnya. Sifatnya yang unik menjadikannya bahan yang penting dalam pelbagai aplikasi di mana bahan yang kukuh, tidak bertindak balas dan geseran yang rendah diperlukan.



Rajah 3.3 Struktur formula kimia bagi *polytetrafluoroethylene* (PTFE)

Dalam kajian ini, terdapat dua jenis PTFE yang telah digunakan iaitu larutan PTFE dan kepingan PTFE. Jenis larutan PTFE yang digunakan dalam kajian ini ialah PTFE dengan 60 wt% penyebaran dalam H₂O yang diperoleh daripada Sigma-Aldrich seperti yang di tunjukan pada Rajah 3.4 (a). Larutan PTFE digunakan sebagai matrik bagi menghasilkan salutan komposit dan digunakan sebagai pengikat diantara substrat PTFE dan MXene. Selain itu, larutan PTFE juga digunakan sebagai pelarut MXene bagi menghasilkan salutan MXene yang lebih homogen ketika proses salutan. Manakala, kepingan PTFE digunakan sebagai substrat peranti penjana nano seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.4 (b) dan kepingan PTFE ini diperoleh daripada syarikat Rugaval Rubber Sdn. Bhd. Kepingan PTFE digunakan sebagai substrat peranti kerana sifatnya yang sangat elektronegatif, yang membolehkannya menghasilkan penjanaan tenaga lebih tinggi melalui interaksi dengan titisan air berbanding bahan polimer lain. Kepingan PTFE yang digunakan adalah berukuran 2 mm panjang x 2 mm lebar dan

terdapat 2 jenis ketebalan yang digunakan iaitu 2 mm dan 1 mm. Saiz panjang dan lebar tersebut dipilih kerana ia merupakan saiz paling kecil yang sesuai digunakan bagi menghasilkan peranti TENG melalui kaedah fabrikasi penyelidikan ini. Sementara itu, pemilihan ketebalan dibuat berdasarkan nilai ketebalan paling nipis yang sesuai digunakan dalam proses pemesinan CNC untuk membentuk struktur biomimetik dan salutan MXene. Dua jenis ketebalan digunakan bagi mengkaji kesan ketebalan terhadap tenaga yang dijana oleh peranti yang dihasilkan.



Rajah 3.4 (a) polytetrafluoroethylene (PTFE) dengan 60 wt% penyebaran dalam H_2O dan (b) Kepingan PTFE

2. MXene

MXene ialah logam dua dimensi yang terdiri daripada nitrida dan karbonitrida. Bahan ini telah mendapat perhatian kerana sifat konduksi dan mekanikal bahan ini. MXene kebiasaannya dihasilkan melalui proses *etching* pada bahagian yang terpilih di fasa MAX. MXene mempunyai struktur berlapis dengan lapisan karbida logam yang terikat dengan kumpulan berfungsi. Struktur ini memberikan ke pengaliran elektrik yang sangat baik, menjadikan MXene menjanjikan calon untuk pelbagai aplikasi dalam penyimpanan tenaga, elektronik fleksibel dan perisai gangguan elektromagnet. Selain itu, luas permukaan MXene yang tinggi juga membolehkan interaksi yang cekap diantara nanozarah dengan ion dan molekul. Dalam kajian ini, MXene yang digunakan adalah berjenis hidrofobik MXene untuk komposit dan diperolehi daripada syarikat

Sigma-Aldrich seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.5 (a). MXene ini merupakan sejenis Hidrofobik MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ dengan pengubahsuaian permukaan oleh bahan *alkylammonium* dan struktur kimia bagi bahan ini adalah seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.5 (b). MXene telah digunakan sebagai bahan pengisi bagi komposit salutan MXene yang dihasilkan. Bahan ini digunakan bagi mempertingkatkan prestasi filem nipis dari segi interaksi bahan dan mempertingkatkan konduksian peranti.



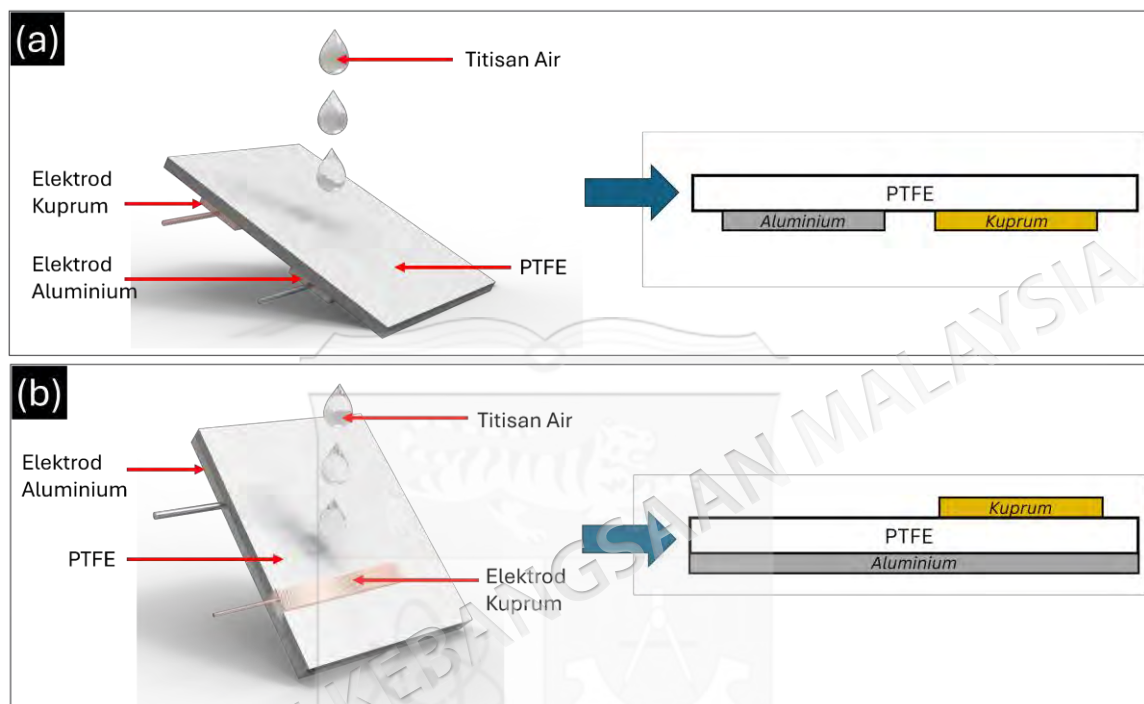
Rajah 3.5 (a) Serbuk dan (b) Formula struktur kimia bagi hirofobik MXene

3.2.2 Konfigurasi Elektrod Pada Peranti TENG

Fasa pertama kajian ini melibatkan penggunaan PTFE sebagai substrat di mana kepingan PTFE dipotong dengan dimensi 2 mm panjang $\times$ 2 mm lebar. Terdapat dua kaedah melekatkan elektrod bagi fabrikasi peranti iaitu kaedah konfigurasi A dan kaedah konfigurasi peranti B. Kaedah konfigurasi peranti A adalah berdasarkan reka bentuk yang dihasilkan oleh Chung et al. (2018) dimana kedua-dua elektrod telah diletakkan di bawah sampel secara selari (Rajah 3.6 (a)). Manakala, kaedah konfigurasi peranti B adalah berdasarkan kajian yang dijalankan oleh Wu et al. (2020) dimana elektrod disusun secara sandwich, PTFE di apit dengan elektrod negatif dan positif. Tetapi saiz yang digunakan pada positif elektrod (kuprum) adalah bersaiz kecil bagi mendedahkan permukaan pada interaksi air dan PTFE (Rajah 3.6 (b)).

Kedua-dua kaedah konfigurasi ini telah dipilih kerana prestasinya yang memberangsangkan dalam penjanaan tenaga. Prestasi yang baik pada kaedah ini telah

dibuktikan melalui kajian yang lepas. Walau bagaimanapun, masih tiada kajian yang membandingkan kaedah konfigurasi yang terbaik diantara dua kaedah ini. Oleh itu, kedua kaedah konfigurasi ini telah di uji bagi melihat kaedah yang terbaik dalam penjanaan tenaga yang tinggi dalam peranti TENG.



Rajah 3.6 Perbezaan kaedah konfigurasi elektrod yang digunakan (a) Elektrod disusun secara selari di bawah PTFE dan (b) Elektrod di susun secara sandwich

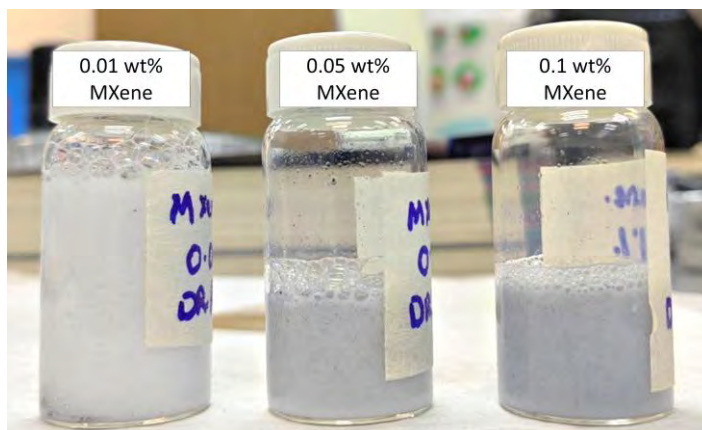
Kaedah fabrikasi peranti yang terbaik kemudiannya diuji dengan kombinasi elektrod yang berbeza. Pita pengalir telah digunakan sebagai elektrod untuk menghasilkan tenaga. Terdapat 2 jenis pita pengalir yang telah digunakan sebagai elektrod iaitu pita pengalir aluminium (Al) dan pitar pengalir kuprum (Cu). Kedua-dua pita ini mempunyai ketebalan yang sama iaitu 0.05 mm, yang merupakan ketebalan paling nipis bagi pita pengalir yang sesuai digunakan dalam proses fabrikasi peranti TENG dalam kajian ini. Pita pengalir yang terlalu nipis berisiko tinggi untuk terkoyak, manakala pita yang terlalu tebal pula boleh menjejaskan sistem penjanaan tenaga pada peranti yang dihasilkan. Pita pengalir ini telah dipilih sebagai elektrod kerana ia merupakan bahan yang biasa digunakan sebagai elektrod dalam teknologi penjanaan tenaga. Pita pengalir yang digunakan dianggarkan mempunyai fungsi kerja sebanyak ~ 4.65 eV bagi kuprum dan ~ 4.28 eV bagi aluminium.

Walaupun, kombinasi elektrod yang terbaik dalam aplikasi TENG berasaskan titisan air masih belum dikaji dan data mengenai kombinasi yang terbaik diperlukan bagi memperoleh prestasi penjanaan yang efisien. Pita pengalir ini telah di kombinasi kepada 3 jenis kombinasi iaitu kombinasi pita pengalir Al-Al, Cu-Cu, dan Al-Cu untuk menguji kombinasi elektrod yang terbaik bagi menjana tenaga yang paling tinggi. Kombinasi elektrod yang terbaik seterusnya di uji dengan saiz panjang elektrod positif yang berbeza iaitu dengan variasi saiz panjang 2 mm, 4 mm dan 6 mm untuk menguji kesan saiz elektrod terhadap penjanaan tenaga yang dihasilkan.

Akhir sekali, berdasarkan kaedah fabrikasi, kombinasi dan saiz elektrod yang terbaik, pengaruh ketebalan substrat terhadap penjanaan tenaga juga telah diuji dengan menggunakan 2 jenis ketebalan kepingan PTFE iaitu 1 mm dan 2 mm. Berdasarkan ujian yang dilakukan, prestasi TENG dengan kombinasi reka bentuk yang terbaik secara keseluruhan telah dipilih untuk melaksanakan proses salutan PTFE/MXene pada permukaan peranti TENG untuk meningkatkan prestasi penjanaan tenaga yang dihasilkan.

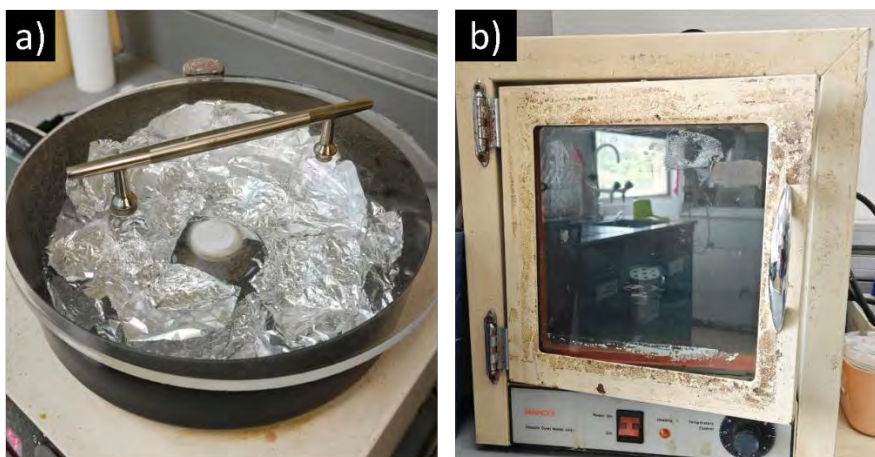
3.2.3 Proses Salutan Komposit PTFE/MXene

Larutan salutan komposit dihasilkan dengan menggunakan larutan PTFE sebagai matrik dan hidrofobik MXene sebagai bahan pengisi bagi menghasilkan filem komposit. Terdapat 3 jenis larutan komposit MXene yang telah dihasilkan iaitu dengan komposisi 0.01 wt%, 0.05 wt% dan 0.1 wt% MXene. Komposisi telah dipilih berdasarkan kemampuannya untuk memberikan peningkatan pada kadar penjanaan tenaga. Pra ujian telah dijalankan bagi mengenal pasti pemilihan komposisi julat ini. Hal ini kerana kandungan MXene yang berlebihan berpotensi untuk menguarangkan prestasi TENG, begitu juga dengan kandungan MXene yang tidak mencukupi. Fabrikasi peranti dimulakan dengan menghasilkan larutan komposit di mana serbuk MXene yang telah ditimbang mengikut komposisi telah dimasukkan ke dalam bikar yang berisi 10 mL larutan PTFE. Larutan ini dikacau secara magnetik selama 2 jam bagi memperoleh larutan yang lebih homogen. Larutan yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.7.

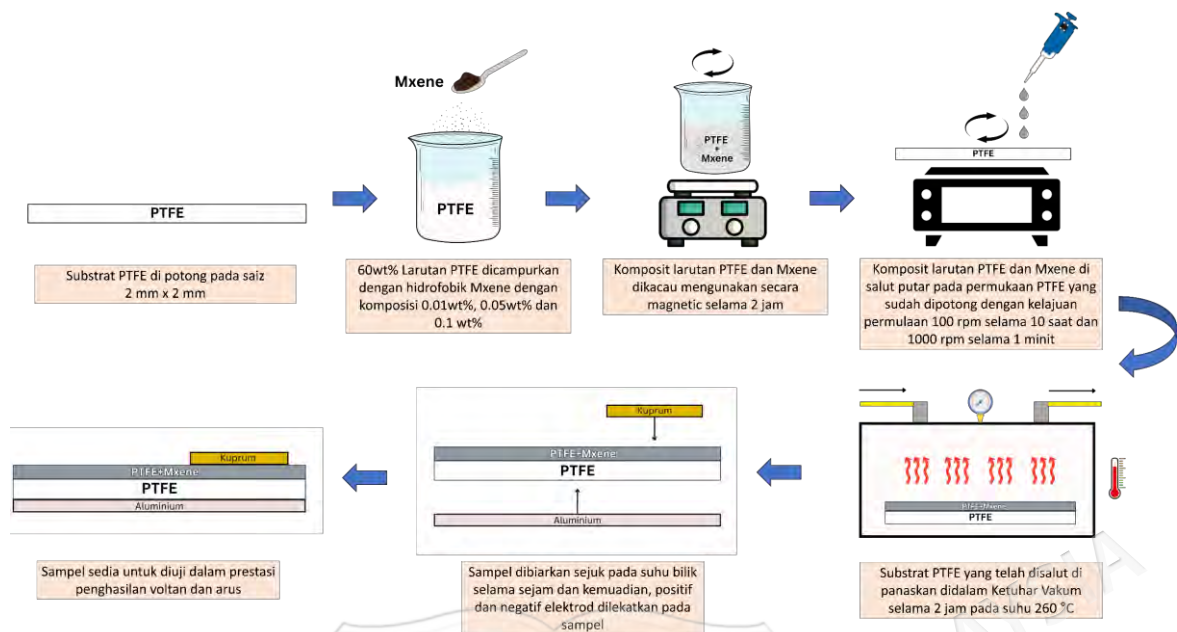


Rajah 3.7 Larutan komposit MXene dengan komposisi 0.01 wt%, 0.05 wt% dan 0.1wt%

Larutan yang dihasilkan ini telah digunakan sebagai salutan pada substrat PTFE. Substrat PTFE di salut dengan menggunakan kaedah salutan putaran di mana salutan dihasilkan dengan menitiskan 100 μL larutan komposit PTFE/MXene pada permukaan PTFE dengan menggunakan pipet pada permukaan PTFE dan diputar menggunakan alat salut putar pada kelajuan permulaan 100 rpm selama 10 saat dan 1000 rpm selama 1 minit. Proses salut putar ditunjukkan pada Rajah 3.8 (a). Selepas disalut putar, sampel akan dipanaskan dalam Ketuhar Vakum model 5831 (Rajah 3.8 (b)) selama 2 jam pada suhu 260 $^{\circ}\text{C}$ dan tekanan Vakum 25 Hg bagi proses persinteran salutan komposit MXene pada permukaan substrat PTFE. Sampel yang telah selesai proses persinteran akan dibiarkan sejuk pada suhu bilik. Sampel kemudiannya dilekatkan dengan pita pengalir yang dilengkapi dengan wayar kuprum untuk bertindak sebagai elektrod pada peranti dan bagi proses yang seterusnya. Gambar rajah skematik bagi proses fabrikasi adalah seperti yang di tunjukkan pada Rajah 3.9.



Rajah 3.8 (a) Salut Putar (b) NAPCO Ketuhar Vakum model 5831



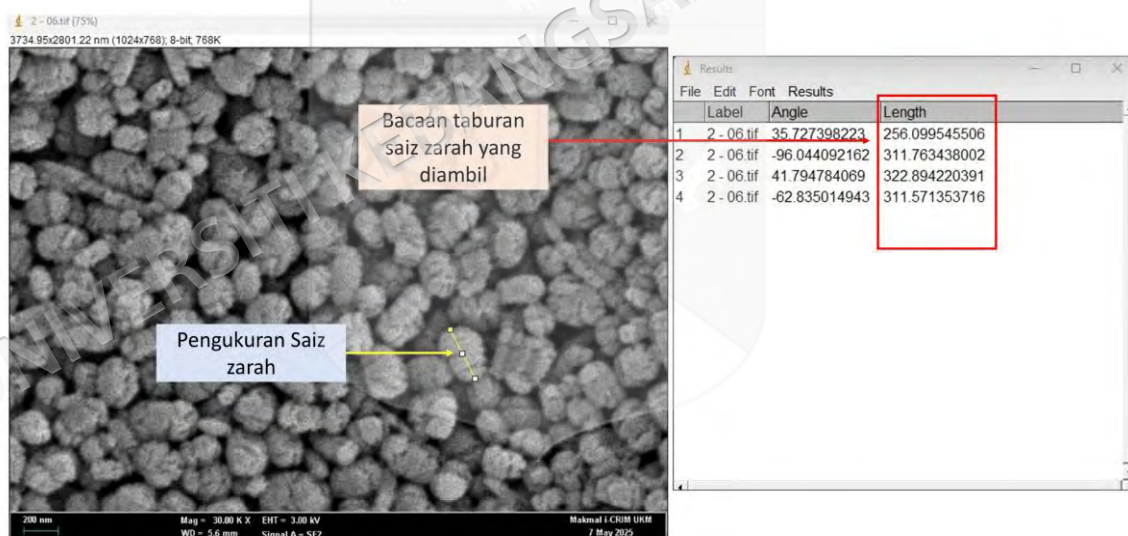
Rajah 3.9 Proses fabrikasi filem PTFE/MXene bagi menghasilkan peranti penjana nano titisan air

3.2.4 Pencirian Salutan Komposit PTFE/MXene

Peranti penjana nano yang telah selesai difabrikasi kemudiannya dicirikan dengan menggunakan beberapa alat pencirian seperti Mikroskopi Imbasan Elektron Pancaran Medan (FESEM), Mikroskopi Daya Atom (AFM), Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR), dan Pembelauan Sinar-X (XRD). Terdapat 2 ujian yang dilakukan iaitu kualitatif dan kuantitatif. Ujian FTIR merupakan ujian kuantitatif yang dijalankan bagi melihat perbezaan ikatan kimia yang terhasil pada setiap larutan komposit PTFE/MXene yang dihasilkan dengan 3 komposisi yang berbeza iaitu PTFE/MXene 0.01wt%, PTFE/MXene 0.05wt% dan PTFE/MXene 0.1wt%. AFM juga merupakan ujian kuantitatif yang dijalankan bagi menilai ketebalan salutan yang terbentuk pada permukaan peranti TENG yang dihasilkan. FESEM merupakan ujian kualitatif dan dijalankan untuk melihat morfologi yang terbentuk pada permukaan peranti TENG dan melihat hasil salutan PTFE/MXene yang terhasil pada permukaan PTFE. Setiap komposisi yang digunakan berpotensi untuk memberikan morfologi yang berbeza.

Sehubungan itu, rajah FESEM yang terhasil juga telah digunakan bagi mengukur taburan saiz zarah untuk menentukan kehadiran fenomena pergumpalan pada

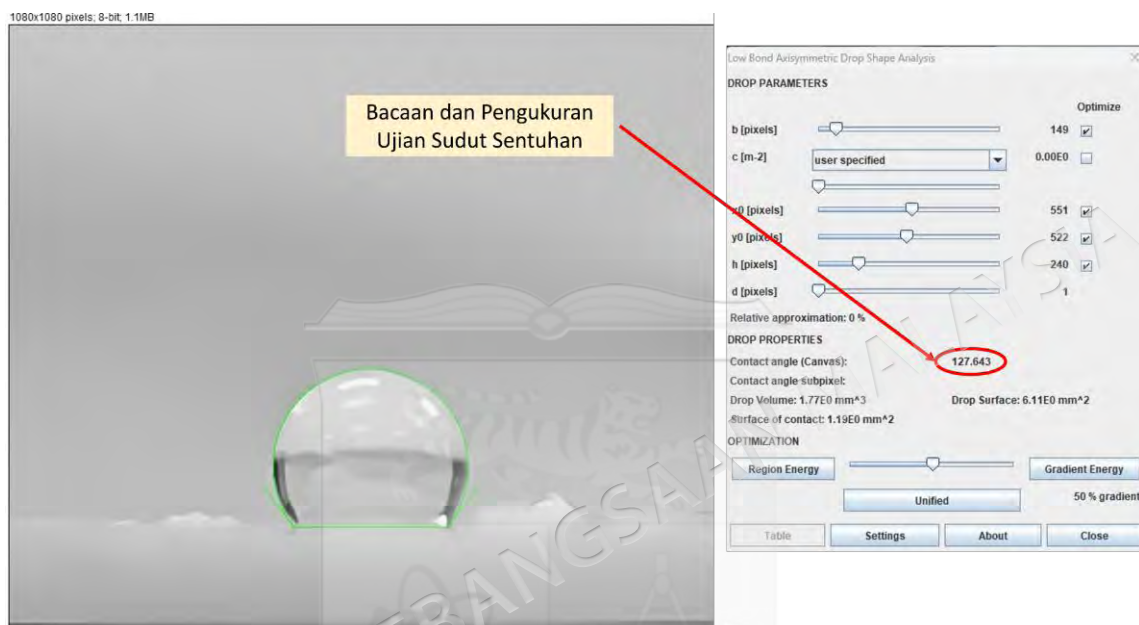
salutan yang dihasilkan. Taburan saiz zarah di ukur dengan menggunakan kaedah pintasan garis dalam perisian ImageJ seperti kaedah yang dinyatakan oleh Sathishkumar et al. (2024). Kaedah ini dilakukan dengan mengambil 120 bacaan diameter panjang zarah pada setiap permukaan morfologi salutan dan bacaan telah direkodkan seperti yang di tunjukkan pada Rajah 3.10. Bacaan yang telah direkodkan kemudian telah digunakan untuk menghasilkan graph histogram bagi proses pengiraan min dan sisihan piawai (*standard deviation* (SD)) melalui perisian origin. Data min digunakan bagi mengenal pasti purata saiz yang terhasil pada salutan. Manakala, data sisihan piawai digunakan bagi mengenal pasti kehadiran penggumpalan pada permukaan salutan yang terhasil. Seterusnya, ujian XRD dijalankan bagi melihat struktur hablur yang terhasil pada permukaan PTFE tanpa salutan dan dibandingkan dengan struktur hablur PTFE dengan salutan PTFE/Mxene. Pencirian ini dapat menunjukkan kehadiran MXene yang terdapat pada permukaan peranti TENG secara menyeluruh. Ujian XRD merupakan ujian kuantitatif.



Rajah 3.10 Kaedah pengambilan bacaan taburan saiz zarah melalui perisian ImageJ

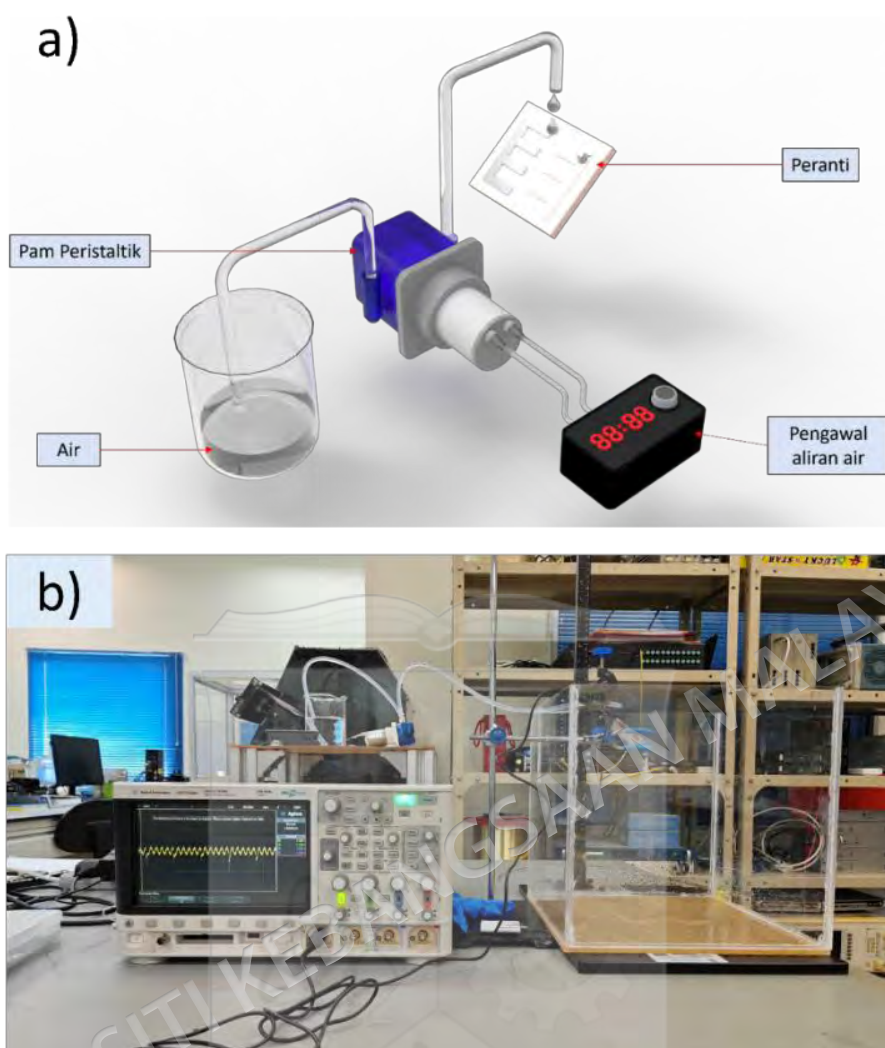
Ujian sudut sentuhan air (WCA) juga telah dijalankan untuk melihat sifat kebolehbasaan permukaan peranti TENG yang telah di ubah suai dengan salutan PTFE/MXene. Ujian ini penting bagi melihat sifat hidrofobisiti yang terdapat pada permukaan. Ujian sudut sentuhan dijalankan dengan menggunakan kaedah seperti yang di gunakan oleh Ahmed, Suhaimi, et al. (2023) dan Suhaimi et al. (2021). Kaedah ini mengukur WCA berdasarkan teknik *sessile drop* pada keadaan suhu bilik. Bagi

memperoleh bacaan yang tepat, titisan air sebanyak 5 μL dititiskan pada permukaan sampel dengan menggunakan pipet mikro dan imej telah ditangkap serta-merta. Setiap sampel dinilai dari 3 sudut yang berbeza dan imej dianalisis menggunakan perisian ImageJ. Ujian ini merupakan ujian kuantitatif. Rajah 3.11 menunjukkan kaedah yang digunakan dalam mengambil bacaan sudut sentuhan melalui perisian ImageJ.

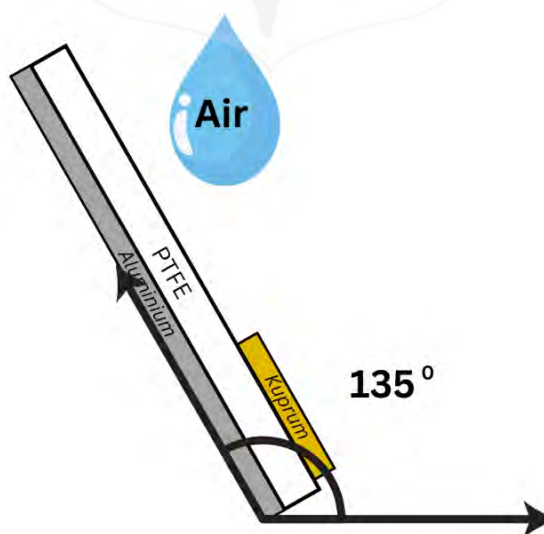


Rajah 3.11 Proses pengambilan bacaan sudut sentuhan melalui perisian ImageJ

Ujian penuaian tenaga pada peranti yang di buat juga telah dilaksanakan dalam fasa ini. Terdapat 2 bacaan yang di dihasilkan dalam ujian penuaian tenaga iaitu voltan dan arus. Ujian penuaian titisan air yang dijalankan adalah seperti yang di tunjukkan pada Rajah 3.12. Titisan air dititiskan ke permukaan filem dengan kadar yang konsisten iaitu pada ketinggian titisan air 9 cm daripada sampel. Kesemua sampel juga diletakkan pada sudut 135° ketika ujian titisan dijalankan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.13. Kadar aliran air yang digunakan pada kesemua sampel juga adalah sama iaitu pada 70 ml/min bagi menguji tindak balas yang dihasilkan seperti voltan atau arus apabila titisan air menyentuh permukaan aktif peranti. Kadar aliran ini telah di kawal melalui alat pengawalan air yang telah dilengkapi pada pam peristaltik bagi memperoleh kadar aliran yang konsisten. Kadar daya yang terhasil dianggarkan pada 0.64 μN untuk setiap titisan. Penerangan mengenai ujian penuaian yang lebih terperinci akan dibincangkan pada bahagian 3.4.



Rajah 3.12 Merujuk kepada (a) gambaran skematik bagi ujian titisan air dan (b) gambaran keseluruhan susunan operasi bagi ujian titisan air pada peranti



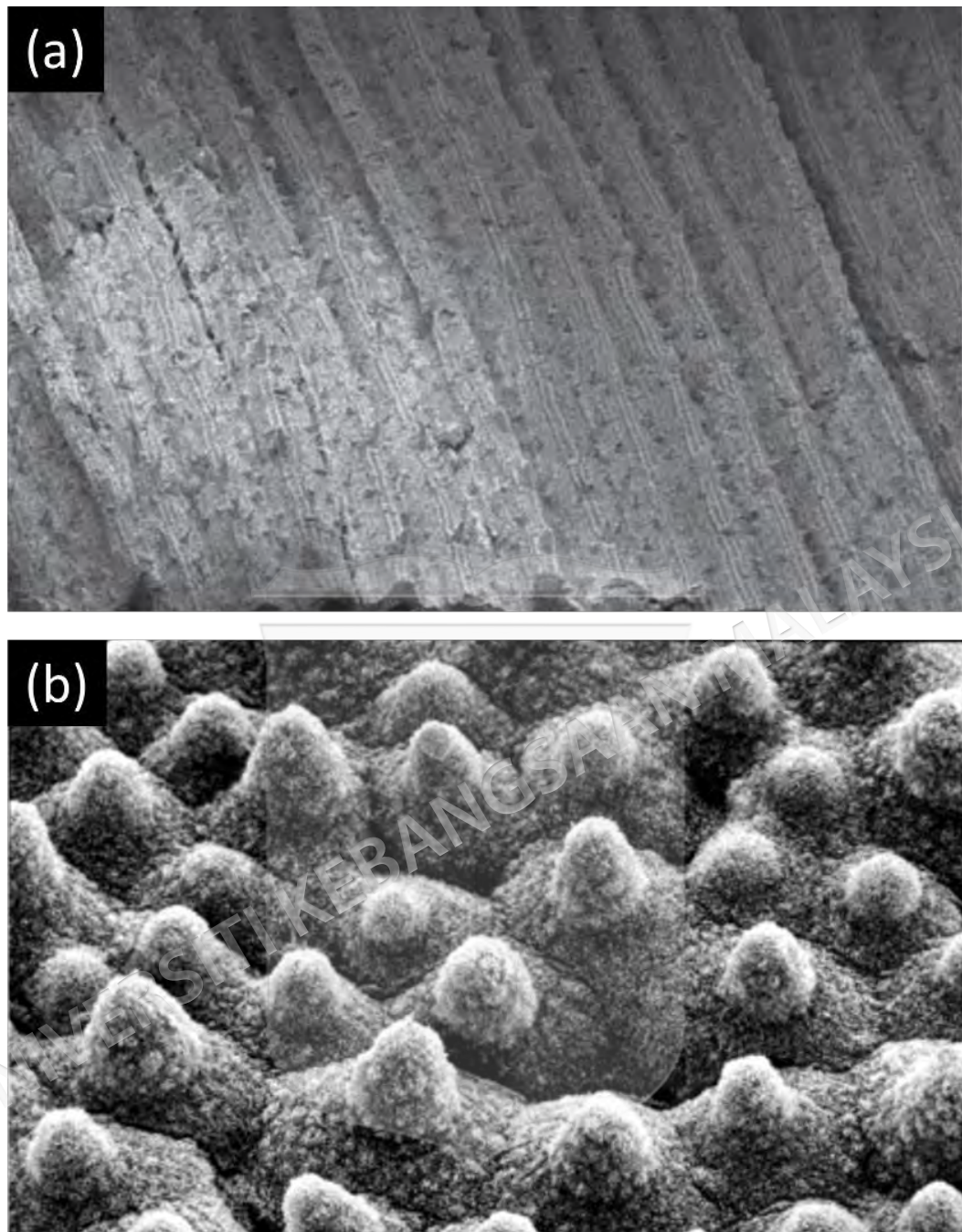
Rajah 3.13 Lukisan skematik sudut jatuhan air ketika ujian dijalankan

3.3 FABRIKASI STRUKTUR MIKRO BIOMIMETIK

Fasa kedua kajian ini melibatkan reka bentuk dan proses fabrikasi struktur mikro bagi meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik peranti dengan meniru sifat permukaan yang terdapat pada alam sekitar. Luas permukaan diperlukan bagi meningkatkan interaksi air pada peranti untuk meningkatkan kadar pemindahan cas dan meningkatkan penuaian tenaga. Manakala, peningkatan dalam sifat hidrofobik dapat membantu dalam memberikan proses sentuhan dan lepasan titisan air yang lebih efisien dalam penjanaan tenaga. Fasa ini terbahagi kepada 3 topik iaitu topik pertama mengkaji mengenai struktur yang terdapat pada alam semula jadi, kedua adalah proses bagi menghasilkan struktur tersebut, dan ketiga ialah pencirian struktur yang dihasilkan. Fasa kajian struktur telah diterangkan pada topik 3.3.1, kaedah fabrikasi struktur dibincangkan dalam topik 3.3.2 dan pencirian struktur diperincikan pada topik 3.3.3. Fasa kedua kajian ini telah dilakukan bagi mencapai objektif kedua kajian iaitu fabrikasi struktur biomimetik pada permukaan PTFE meningkatkan luas permukaan peranti dan sifat hidrofobik peranti serta menilai kesannya terhadap penjanaan voltan, arus, dan kuasa.

3.3.1 Kajian Permukaan Alam Semula Jadi Dan Pengiraan Luas Permukaan

Kajian teori mengenai struktur mikro biomimetik ini merangkumi pemerhatian pada morfologi dan topografi permukaan yang terdapat pada alam semula jadi. Fasa ini dijalankan bagi menentukan struktur mikro yang sesuai digunakan bagi menghasilkan struktur yang dapat meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik pada permukaan peranti. Hasil kajian kepustakaan mendapati terdapat dua struktur alam semula jadi yang mampu memberikan peningkatan dalam luas permukaan dan sifat hidrofobik iaitu struktur daun padi Rajah 3.14 (a) dan dahan keladi seperti pada Rajah 3.14 (b). Kedua struktur ini telah dipilih kerana reka bentuk ini berpotensi dalam memberikan peningkatan pada penjanaan tenaga dengan memberikan peningkatan pada sifat yang diinginkan. Kajian lepas juga menyatakan struktur ini mampu memberikan sifat hidrofobik yang baik dan memperoleh luas permukaan yang tinggi (Patankar 2004; Wu et al. 2011).

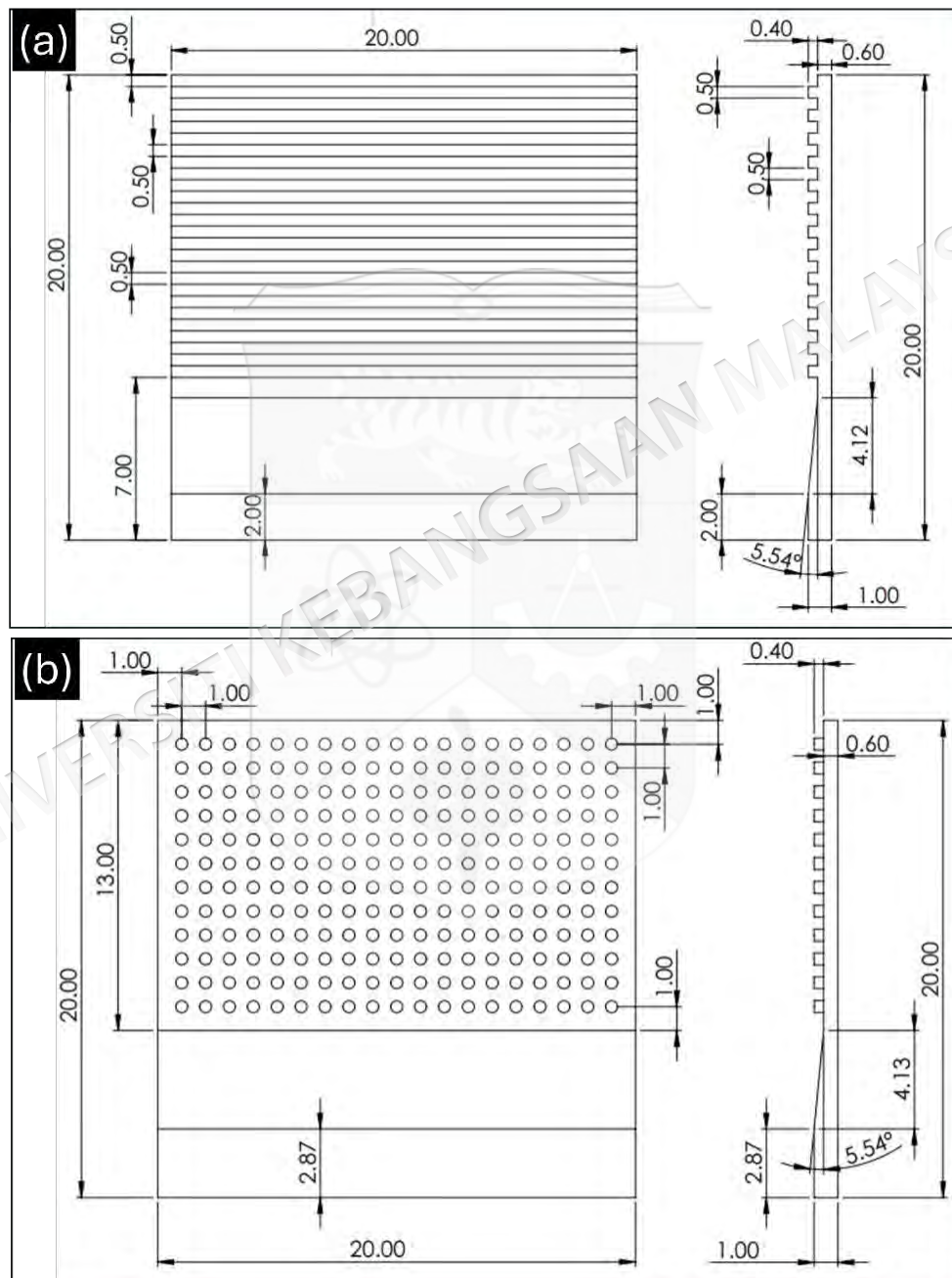


Rajah 3.14 Struktur permukaan (a) Daun Padi dan (b) Daun Keladi

Sumber: (Patankar 2004; Wu et al. 2011)

Walau bagaimanapun, disebabkan limitasi daripada pemesinan CNC iaitu alatan untuk menghasilkan struktur mikro. Reka bentuk ini telah di ubah bagi kesesuaian alatan pemesinan CNC yang digunakan. Berikut Rajah 3.15 merupakan reka bentuk CAD yang telah di hasilkan untuk pemesinan struktur CNC pada permukaan peranti TENG. Berdasarkan dapatan daripada keputusan ini iaitu kualitatif (imej) dan data kuantitatif (struktur reka bentuk CAD), pengiraan luas permukaan struktur ini telah dikira dan

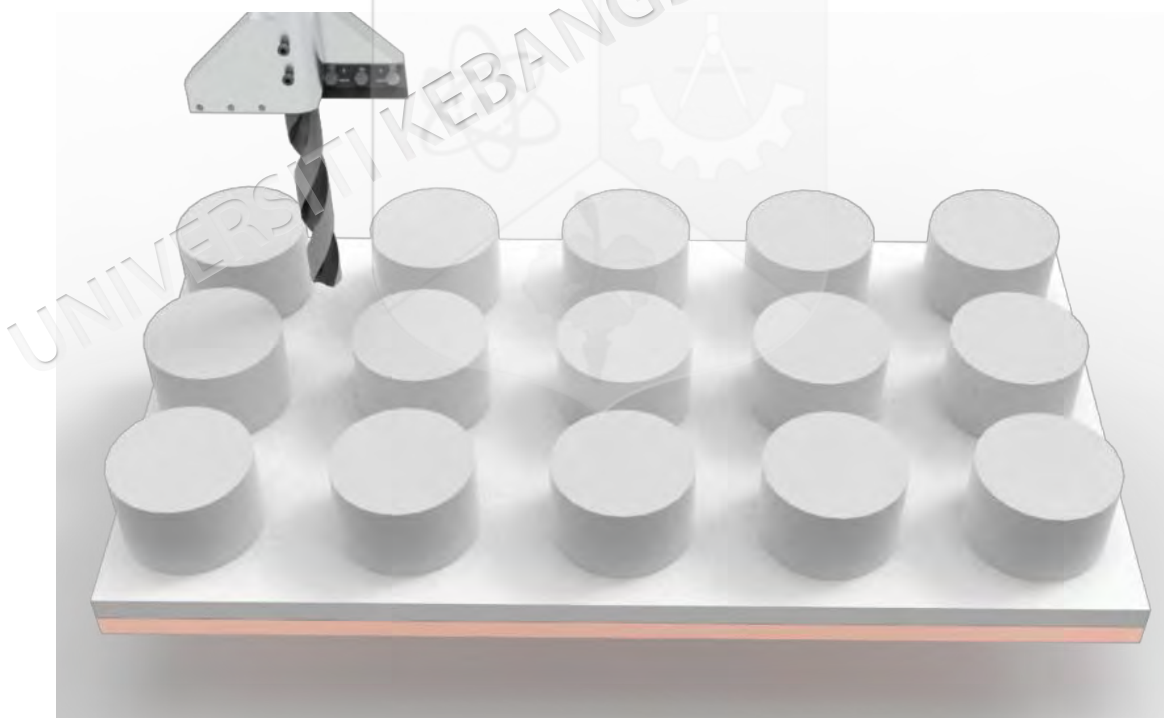
dinilai bagi mengenal pasti peratusan peningkatan pada luas permukaan. Hasil daripada bahagian ini memberikan data kualitatif khususnya rumusan yang struktur pada permukaan alam semula jadi yang mampu dalam meningkatkan luas permukaan sesuatu bahan. Luas permukaan yang tinggi berpotensi memberikan interaksi yang lebih baik diantara air dan substrat.



Rajah 3.15 Lukisan skimetik reka bentuk biomimetik (a) struktur alur dan (b) struktur tiang mikro

3.3.2 Proses Pemesinan Struktur Mikro Biomimetik

Pembuatan struktur mikro biomimetik bagi meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik merangkumi dua proses. Proses pertama adalah dengan mereka bentuk struktur mikro dengan menggunakan perisian reka bentuk CAD seperti yang telah di tunjukkan pada Rajah 3.16. Reka bentuk dalam perisian CAD ini diperlukan bagi proses pemesinan permukaan dapat dijalankan. Bagi fasa yang kedua, reka bentuk CAD yang dihasilkan kemudiannya dimodelkan ke dalam perisian CAM untuk proses fabrikasi permukaan. Fabrikasi struktur ini dilakukan pada permukaan peranti TENG PTFE tanpa salutan bagi menguji kesan struktur mikro terhadap luas permukaan, sifat hidrofobik dan penjanaan tenaga. Proses ini dilakukan dengan menggunakan alat pemesinan kawalan berangka komputer (CNC) dengan parameter kadar suapan 200 rpm dan kadar gelendong 5000 rpm seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.14. Pemotong *endmill* yang digunakan dalam kajian ini ialah berjenis *endmill* segi empat sama dengan diameter 0.5mm.



Rajah 3.16 Gambar skematik kaedah pemesinan kawalan berangka komputer (CNC)

Parameter ini telah ditentukan melalui pra-ujian dan mendapati parameter ini mampu memperoleh pemotongan yang tepat dalam menghasilkan struktur mikro dan

mempunyai penghasilan burr yang rendah. Pembentukan burr yang tinggi dalam pemotongan berpotensi mengganggu struktur yang dihasilkan. Kesemua proses pemesinan telah dilakukan dengan penyumberan luar. Kaedah ini telah dipilih kerana ia merupakan proses yang tepat dan pantas dalam menghasilkan struktur mikro. Selain itu, proses ini juga lebih murah dan mudah dilaksanakan jika dibandingkan dengan kaedah yang lain.

3.3.3 Pencirian Struktur Permukaan Peranti

Permukaan sampel yang telah menjalani pemesinan mikro dicirikan dengan pencirian mikroskop dan sudut sentuhan bagi melihat struktur permukaan dan sudut sentuhan yang terhasil selepas proses pemesinan. Pencirian mikroskop yang telah dijalankan dalam topik ini adalah untuk melihat struktur pemesinan yang dihasilkan adalah tepat dengan reka bentuk CAD yang di buat. Ujian pemerhatian pada permukaan ini merupakan ujian kualitatif yang hanya memperoleh data berdasarkan imej mikroskop yang terhasil. Model mikroskop yang digunakan dalam ujian ini adalah Dino-Lite Digital Microscope. Seterusnya, ujian sudut sentuhan telah dijalankan dengan menitiskan 5 μ L air pada permukaan untuk melihat sifat kebolehbasaan permukaan selepas proses pemesinan struktur mikro. Imej titisan air pada permukaan telah diambil dan dinilai dengan menggunakan perisian ImajeJ bagi memperoleh ukuran sudut sentuhan yang telah dihasilkan.

3.4 KAJIAN PENGUKURAN PRESTASI TENG DENGAN KOMBINASI SALUTAN PTFE/MXENE DAN STRUKTUR MIKRO TERHADAP PELBAGAI MEDIUM AIR

Fasa ketiga kajian ini ialah ujian penuaian tenaga peranti triboelektrik titisan air pada peranti dengan medium air yang berbeza. Pada fasa ini, Struktur mikro yang memperoleh prestasi terbaik telah di salut dengan komposisi salutan PTFE/MXene yang terbaik bagi menghasilkan peranti TENG yang mempunyai kombinasi struktur mikro dan salutan PTFE/MXene. Kaedah salut putar telah digunakan untuk menyalut permukaan berstruktur mikro dengan menggunakan parameter yang sama seperti yang telah dibincangkan pada bahagian 3.2.3. Sampel ini kemudiannya di uji dengan medium air yang berbeza untuk melihat kesan perbezaan medium air terhadap penjaan tenaga yang dihasilkan. Terdapat 4 medium air yang berbeza telah digunakan dalam kajian ini

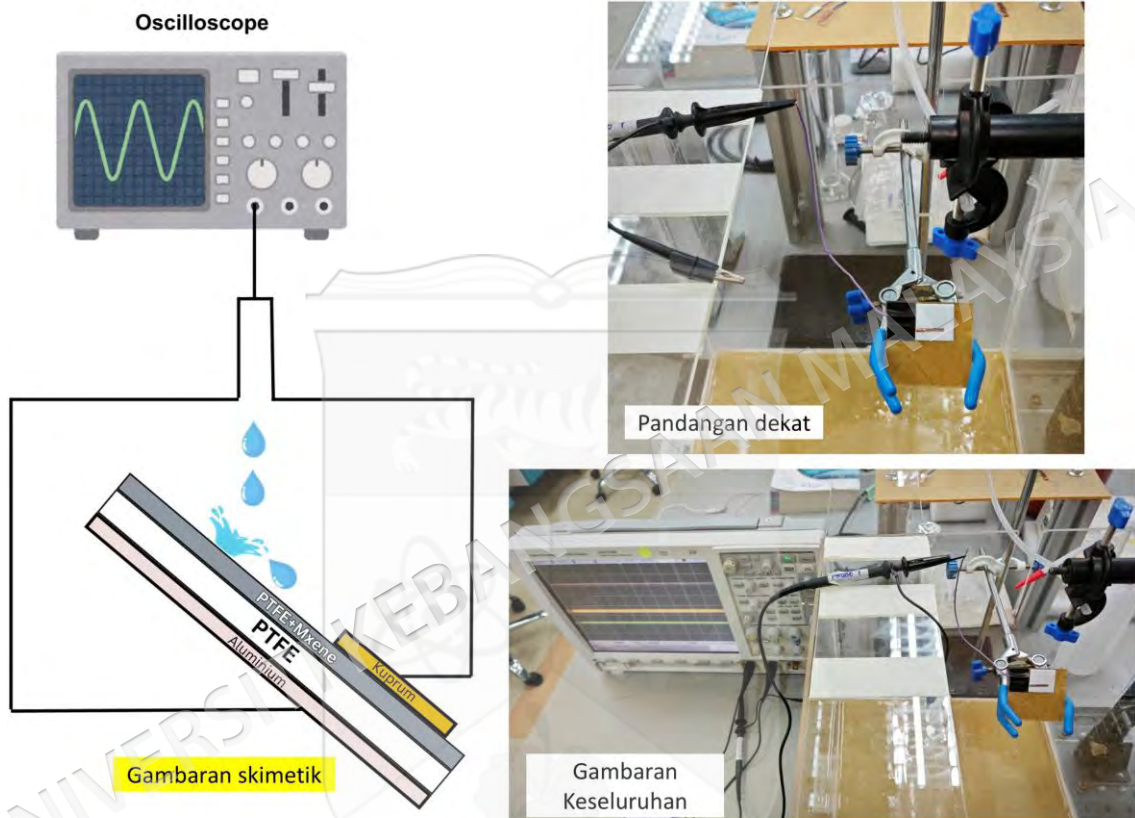
iaitu air paip, air laut, air natrium klorida (NaCl) 0.9%, dan air hujan. Variasi air yang telah digunakan ini telah menjalani ujian XRF terlebih dahulu untuk melihat komposisi unsur yang terdapat pada air yang digunakan. Pengukuran penuaian tenaga dilakukan dengan menggunakan alat osiloskop bagi memperoleh bacaan voltan dan arus yang dihasilkan. Terdapat 4 sub-topik dalam bahagian ini dimana 3.4.1 menerangkan mengenai ujian pengukuran voltan dan 3.4.2 menerangkan mengenai ujian pengukuran arus. Manakala, bahagian 3.4.3 menerangkan mengenai pengiraan penjana purata kuasa. Bahagian ini juga menjalankan pencirian terhadap medium air yang digunakan bagi mengenal pasti mineral atau ion yang terdapat pada air dan akan dibincangkan pada bahagian 3.4.4. Ujian yang dijalankan pada fasa ini adalah untuk mencapai objektif ketiga kajian iaitu menilai prestasi elektrik penjana nano triboelektrik bagi ujian titisan air paip, air laut, air NaCl 0.9% dan juga air hujan pada permukaan peranti yang dihasilkan dengan gabungan struktur pemesian mikro dan lapisan campuran PTFE-MXene.

3.4.1 Ujian Mengukur Voltan

Peralatan ini telah disambungkan kepada peranti ketika titisan air dijatuhkan pada permukaan sampel bagi mendapatkan voltan dan arus yang terhasil. Analisis voltan dan arus yang diperoleh dianalisis dan diplot pada graf bagi menilai prestasi penuaian yang dihasilkan oleh peranti. Hasil kajian pada fasa ini akan memperoleh data di dalam bentuk kuantitatif. Rajah 3.17 menunjukkan rajah skematik bagi pengukuran voltan ujian titisan air yang dilaksanakan. Dalam pengukuran voltan, litar telah disambungkan secara selari pada osiloskop dan data diperoleh berdasarkan puncak yang dihasilkan pada osiloskop.

Bacaan diambil selama 10 saat, dengan kadar alir air 70 ml/min di mana air dialirkan dengan menggunakan pam pestaltik. Ketinggian sampel dengan aliran air adalah 9 cm dan sampel berada 135 ° ketika ujian dijalankan. Seterusnya, saiz titisan air yang dihasilkan adalah beranggaran ~5 mm diameter untuk setiap titisan. Dengan saiz titisan ini dan jarak ketinggiannya jatuh, dapat dianggarkan kadar daya yang dihasilkan untuk setiap titisan adalah pada 0.64 μN . Kesemua ujian yang dilakukan telah menggunakan parameter yang sama bagi mengelakkan tidak selarian dalam

pengambilan bacaan tenaga. Ini kerana setiap perubahan seperti sudut jatuhan air, kelajuan aliran air dan ketinggian jatuhan air mampu untuk mempengaruhi bacaan penjana tenaga. Sehubungan itu, semua parameter ini dipilih kerana ia mampu menghasilkan kadar penjana tenaga yang lebih stabil dan konsisten semasa ujian dijalankan.



Rajah 3.17 Ujian pengukuran voltan penuaian tenaga

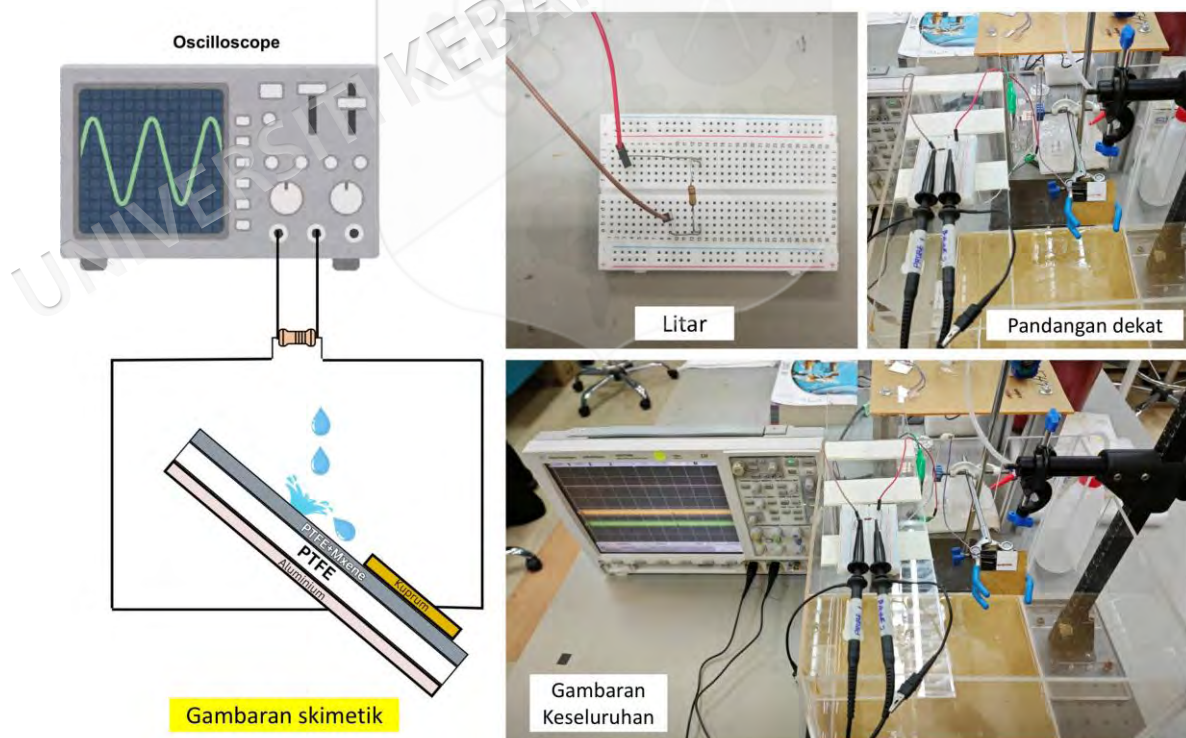
3.4.2 Ujian Mengukur Arus

Ujian arus di ukur dengan menggunakan kaedah yang dikenali sebagai kaedah perintang shunt atau kaedah hukum ohm di mana parameter dan susunan alat adalah seperti pengukuran voltan, tetapi dengan penambahan sambungan litar tambahan (Kamilya et al. 2019). Litar yang dihasilkan ini telah dilengkapi dengan perintang 100 kOhm bagi mengukur kadar penurunan voltan untuk memperoleh nilai arus seperti yang di tunjukkan pada Rajah 3.18. Litar disambungkan pada peranti TENG dan 2 *probe* telah di sambungkan pada perintang. Rajah skimetik bagi kaedah penyambungan litar adalah seperti yang di tunjukan pada Rajah 3.19. *Probe* pertama disambungkan pada bahagian

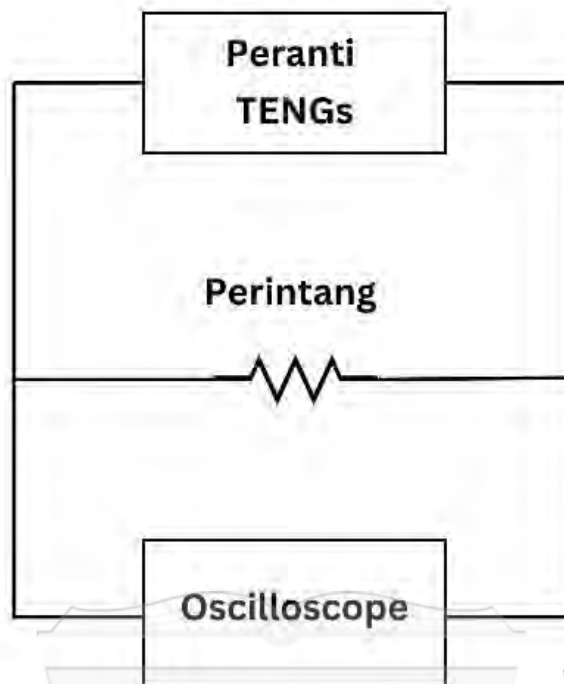
positif kaki perintang dan *probe* kedua disambung pada kebahagian kaki negatif perintang. Dengan menggunakan fungsi matematik yang terdapat pada osiloskop, bacaan voltan pada *probe* pertama telah di tolakkan dengan bacaan pada *probe* yang kedua untuk memperoleh bacaan kadar voltan yang melalui perintang. Kadar penurunan voltan yang diperoleh merupakan kadar arus yang dihasilkan oleh peranti. Kadar arus dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan *Ohm's Law* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

$$V = IR \quad \dots(3.1)$$

Dimana, V adalah voltan, I adalah arus dan R merupakan nilai bagi perintang yang digunakan. Perintang yang digunakan adalah sama bagi kesemua ujian yang dijalankan. Dengan menggunakan persamaan 3.1, nilai kadar perubahan voltan yang diperoleh dan nilai perintang yang digunakan telah dimasukkan ke dalam persamaan bagi memperoleh arus yang dihasilkan. Bacaan voltan dan arus yang telah diperoleh telah di analisis.



Rajah 3.18 Ujian pengukuran arus penuaian tenaga



Rajah 3.19 Rajah skematik litar pengukuran arus

3.4.3 Ujian Mengukur Kuasa

Sehubungan itu, purata penjanaan kuasa juga telah dikira berdasarkan jumlah voltan yang melalui perintang dengan menggunakan persamaan 3.2. Persamaan yang digunakan untuk mengira purata penjanaan kuasa adalah seperti berikut:

$$P_{avg} = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad \dots(3.2)$$

Dimana V_{RMS} ialah merupakan punca min kuasa dua voltan dan R merupakan perintang. Nilai V_{RMS} dapat diperoleh daripada persamaan 3.3 di mana nilai V_{pp} merupakan nilai puncak ke puncak voltan yang diperoleh daripada osiloskop. Nilai V_{RMS} diperlukan adalah untuk menyatakan voltan berkesan melalui isyarat AC osiloskop yang boleh menjadi perbandingan terus dengan voltan DC dari segi penghantaran kuasa (Heo et al. 2024).

$$V_{RMS} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} \quad \dots(3.3)$$

3.4.4 Pencirian Medium Air

Dalam bahagian ini pencirian telah dilakukan pada medium air yang digunakan iaitu air laut, air NaCl, air paip dan juga air hujan. Sumber air paip diperoleh daripada sumber paip, dan air laut telah diperoleh daripada Pantai Morib Banting, Selangor. Manakala, air NaCl 0.9% diperoleh daripada syarikat RinsCap NS dan air hujan diambil daripada tadahan di perkarangan institut kejuruteraan mikro dan nano elektronik (IMEN), UKM, selangor. Kesemua air yang digunakan telah di pilih berdasarkan situasi persekitaran yang ingin diaplikasikan. Air paip dikaji untuk aplikasi seperti pada saluran paip di dalam perumahan dan longkang. Manakala, air hujan dikaji untuk aplikasi penjanaan tenaga dengan menggunakan air hujan seperti meletakkan peranti pada bumbung perumahan bagi alternatif kepada tenaga solar. Seterusnya, air laut dikaji bagi aplikasi yang terdedah pada persekitaran air laut seperti untuk digunakan pada bot, kapal layar atau pelantar minyak. Akhir sekali, air NaCl 0.9% pula telah dikaji sebagai aplikasi seperti pada alat-alat dalam bio perubatan. Setiap medium air yang dikaji mempunyai kandungan ion dan bahan yang berbeza. Oleh itu, pencirian terhadap medium air ini diperlukan bagi mengenal pasti kandungan ini. Oleh itu, pencirian dilakukan dengan menggunakan pendarfluor Sinar-X (XRF) bagi melihat kandungan bahan yang terdapat di dalam medium air yang digunakan. Dengan meneliti kandungan bahan ini, faktor yang mempengaruhi penuaian tenaga ini dapat dikenal pasti.

3.5 RUMUSAN

Dalam bab ini, kaedah yang digunakan dalam kajian untuk menghasilkan peranti TENG titisan air telah dijelaskan dengan terperinci. Kajian ini merangkumi tiga fasa utama, iaitu penyediaan filem komposit PTFE-MXene, fabrikasi struktur mikro biomimetik, serta penggabungan kedua-dua rawatan permukaan tersebut untuk pengujian menggunakan empat jenis medium air yang berbeza. Semua parameter yang dikaji bagi pembangunan peranti TENG titisan air ini telah dirumuskan dalam Jadual 3.1. Hasil kajian menunjukkan bahawa peranti TENG titisan air dengan salutan PTFE/MXene dan struktur biomimetik berjaya dihasilkan dengan baik dan berupaya berfungsi sebagai penjana nano triboelektrik.

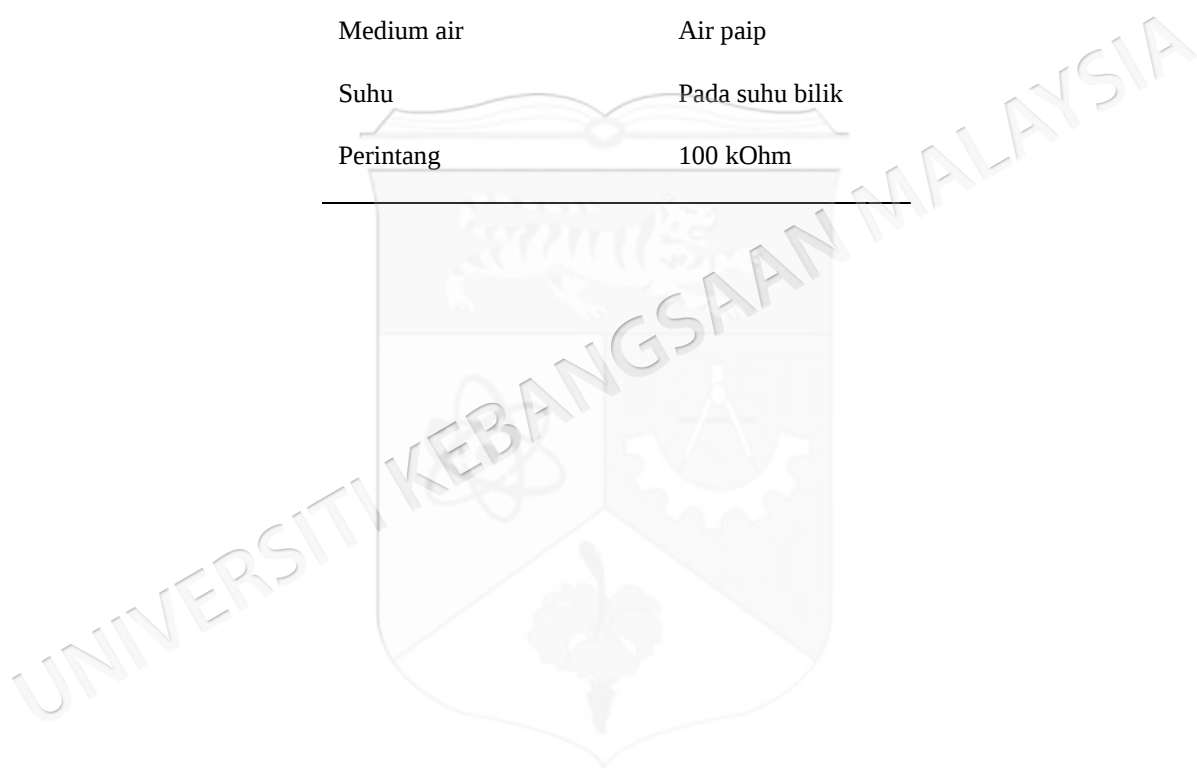
Jadual 3.1 Rumusan parameter fabrikasi peranti

Fasa kajian	Pemboleh ubah	Parameter
Kajian Filem Komposit PTFE/MXene	Kaedah fabikasi peranti TENG	Konfigurasi elektrod - Konfigurasi A (Elektrod disusun secara selari) - Konfigurasi B (Elektrod disusun secara sandwic)
		Kombinasi Bahan elektrod - Al-Al - Cu-Cu - Al-Cu
		Saiz Panjang elektrod positif 2 mm 4 mm 6 mm
		Ketebalan Substrat 1 mm 2 mm
		Komposisi filem komposit PTFE/MXene 0.01 wt% MXene 0.05 wt% MXene 0.1 wt% MXene
Fabrikasi Struktur Mikro Biomimeti	Bentuk Struktur Mikro Alam Semula Jadi	- Daun Padi (Struktur Alur) - Daun Keladi (Struktur Tiang Mikro)
Kajian TENG dengan Kombinasi Salutan PTFE/Mxene dan Struktur Mikro Terhadap Pelbagai Medium Air	Kombinasi Penggabungan Medium Air	Berdasarkan ciri prestasi penjanaan tenaga terbaik: - Komposisi filem komposit PTFE/MXene terbaik - Struktur mikro alam semula jadi terbaik - Air Paip - Air Hujan - NaCl 0.9% - Air Laut

Selain itu, semua parameter dan kaedah pengukuran prestasi penjanaan tenaga turut dikekalkan secara konsisten bagi setiap ujian yang dijalankan. Hal ini kerana perubahan pada parameter seperti jarak titisan, sudut pengujian, kadar aliran dan daya titisan air boleh mempengaruhi prestasi penjanaan tenaga bagi sesuatu peranti TENG. Oleh itu, penggunaan parameter ujian yang seragam membolehkan bacaan voltan, arus dan tenaga diperoleh dengan lebih tepat. Rumusan parameter pengujian penjanaan tenaga yang digunakan turut diperincikan dalam Jadual 3.2. Hasil pengukuran menunjukkan bahawa peranti yang dihasilkan mampu menjana tenaga dengan baik. Kesemua hasil kajian, perbincangan dan analisis diterangkan dalam Bab IV dan Bab V.

Jadual 3.2 Rumusan parameter ujian penjanaan tenaga

Parameter kajian penjanaan tenaga	
Sudut jatuhan titisan air	135°
Ketinggian jatuhan air	9 cm
Kadar pengaliran	70 ml/min
Masa bacaan di ambil	10 saat
Saiz titsan air	~5 mm diameter
Kadar daya air jatuh	0.64 μ N
Medium air	Air paip
Suhu	Pada suhu bilik
Perintang	100 kOhm



BAB IV

FABRIKASI PERANTI TENG DAN SALUTAN PTFE/MXENE DENGAN PARAMETER DAN KOMPOSISI YANG BERBEZA

4.1 PENDAHULUAN

Bab ini membincangkan ujian terhadap parameter yang mempengaruhi prestasi peranti TENG dari segi voltan, arus dan juga kuasa. Bab ini akan melaporkan hasil yang diperolehi daripada bahagian 3.2, bab III dan seterusnya akan menjawab objektif pertama kajian, iaitu untuk menilai kesan campuran salutan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan MXene pada substrat PTFE dalam penghasilan penjanaan voltan, arus dan kuasa. Terdapat beberapa parameter yang telah diubah untuk melihat kesan perubahan parameter dalam reka bentuk peranti. Sehubungan itu, kesan salutan juga di uji dengan menggunakan komposisi bahan salutan yang berbeza. Bab IV ini terbahagi kepada dua bahagian iaitu bahagian yang pertama ujian parameter-parameter peranti termasuk kesan perbezaan reka bentuk, kesan perbezaan elektrod dan saiz elektrod dan kesan perbezaan ketebalan PTFE dalam pembuatan peranti TENG yang dibincangkan dalam topik 4.2. Manakala, bahagian yang kedua pula adalah mengkaji kesan salutan PTFE/MXene terhadap prestasi penjanaan TENG. Topik 4.3 membincangkan mengenai analisis larutan campuran PTFE/MXene yang telah di hasilkan dengan peratusan berat MXene yang berbeza iaitu 0.01%wt, 0.05%wt dan 0.1wt%. Larutan campuran PTFE/MXene telah di analisis dengan menggunakan alat pencirian FTIR, manakala salutan yang dihasilkan telah di cirikan dengan menggunakan FESEM dan XRD. FESEM dijalankan bagi melihat morfologi salutan. Manakala, XRD dan FTIR dilaksanakan bagi melihat kehadiran dan ikatan salutan PTFE/MXene pada permukaan peranti TENG yang dihasilkan. Selain itu, ciri hidrofobik salutan juga di uji menggunakan perisian ImajeJ dengan mengukur sudut sentuhan yang terhasil. Seterusnya, topik 4.4 membincangkan mengenai prestasi triboelektrik berdasarkan

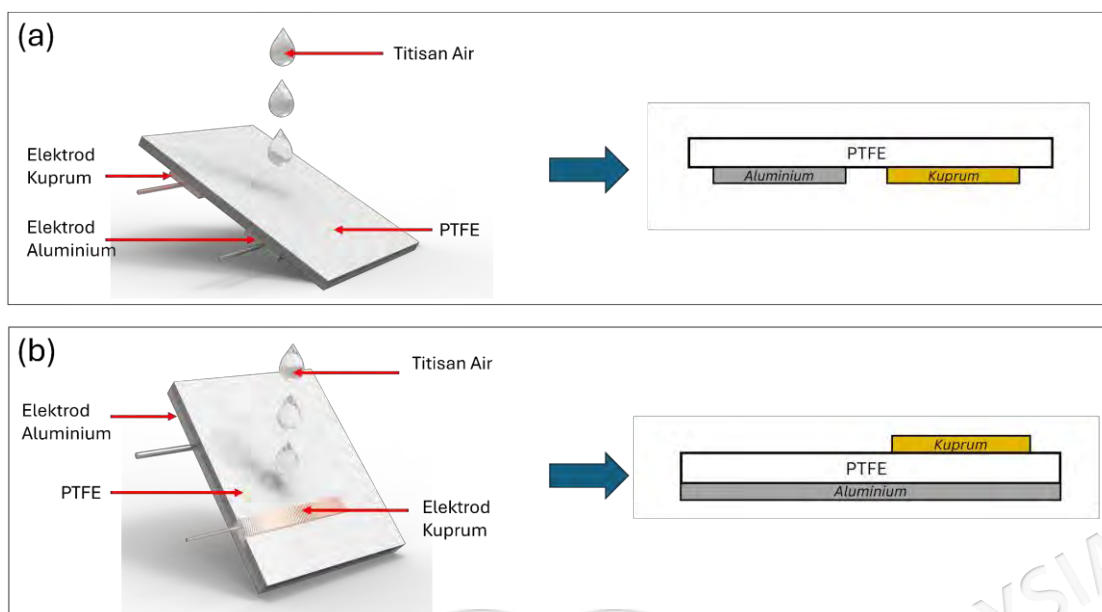
kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa pada peranti TENG bersalut PTFE/MXene dengan komposisi yang berbeza. Akhir sekali, topik 4.5 menerangkan mengenai rumusan.

4.2 FABRIKASI PERANTI

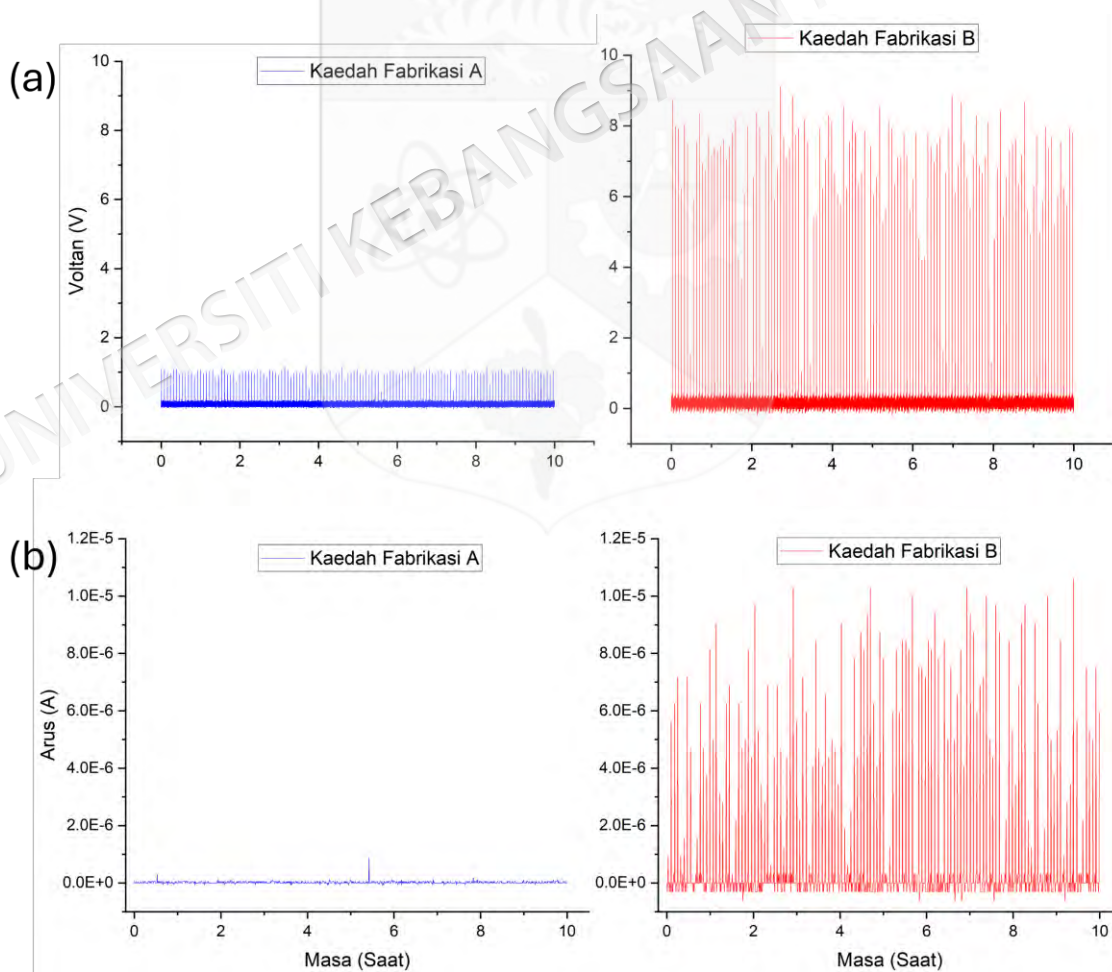
Pada bahagian ini, terdapat 4 bahagian yang telah dibincangkan iaitu yang pertama ialah kesan parameter konfigurasi elektrod terhadap penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dibincangkan pada topik 4.2.1. Seterusnya, ialah kesan penggunaan tiga jenis kombinasi elektrod termasuk Al-Al, Cu-Cu dan Al-Cu yang dibincangkan pada topik 4.2.2. Kombinasi elektrod yang terbaik ini telah di pilih dan di uji dengan variasi saiz elektrod positif yang berbeza untuk melihat pengaruhnya dalam penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dibincangkan pada topik 4.2.3. Manakala, topik 4.2.4 pula membincangkan mengenai kesan ketebalan PTFE pada peranti TENG dengan dua saiz yang berbeza iaitu 1 mm dan 2 mm yang berdimensi 2mm x 2mm. Akhir sekali, 4.2.5 menerangkan mengenai dapatan keseluruhan dan rumusan bagi bahagian ini.

4.2.1 Kesan Perbezaan Konfigurasi Elektrod

Terdapat dua kaedah konfigurasi enlektrod peranti TENG yang telah diuji dimana kaedah konfigurasi A adalah berdasarkan reka bentuk yang dihasilkan oleh Chung et al. (2018) dimana kedua-dua elektrod telah diletakkan di bawah sampel secara selari seperti yang ditunjukkan pada rajah 4.1 (a). Manakala, kaedah konfigurasi B adalah berdasarkan kajian yang dijalankan oleh Wu et al. (2020) dimana elektrod disusun secara sandwich, PTFE di apit dengan elektrod negatif di bahagian bawah dan positif dibahagian atas seperti yang ditunjukkan pada rajah 4.1(b). Tetapi saiz yang digunakan pada positif elektrod (kuprum) adalah bersaiz kecil bagi mendedahkan permukaan pada interaksi air dan PTFE. Rajah 4.2 menunjukkan keputusan voltan dan arus yang diperoleh berdasarkan perbezaan reka bentuk yang dihasilkan.



Rajah 4.1 Perbezaan konfigurasi elektrod yang digunakan (a) Elektrod di susun secara selari di bawah PTFE dan (b) Elektrod di susun secara sandwich



Rajah 4.2 Kesan perbezaan konfigurasi elektrod terhadap (a) Voltan dan (b) Arus

Fenomena penjanaan terhasil berasaskan proses yang melibatkan sentuhan elektrifikasi dan elektrostatik induksi di antara permukaan pepejal-cecair. Apabila titisan air jatuh dan menggelongsor pada permukaan PTFE, triboelektrik terjana yang disebabkan oleh pemindahan cas daripada titisan air ke permukaan PTFE. Pemindahan cas berlaku disebabkan oleh sifat keelektronegatifan yang terdapat pada sifat PTFE yang menyebabkan permukaan PTFE memperoleh elektron dan menjadikannya bercas negatif. Manakala, titisan air menjadi bercas positif kerana memberikan elektron (Potu et al. 2024). Pemisahan cas ini menyebabkan penghasilan tenaga elektrostatik, di mana cas terkumpul antara bahagian atas PTFE dan titisan air, lalu membentuk medan elektrik yang mendorong pergerakan elektron merentasi elektrod. Pada keadaan ini, cas elektron akan terus mengalir merentasi elektrod sehingga mencapai keseimbangan. Cas yang teraruh akan kekal di tempatnya ketika keadaan air bersentuhan dengan permukaan PTFE. Apabila titisan air bergerak dan terlepas daripada permukaan PTFE, pengaruh elektrostatik akan menjadi lemah dan mengganggu keseimbangan cas, menyebabkan elektron mengalir semula melalui elektrod bagi mengimbangi ketidakseimbangan cas yang berlaku. Pergerakan elektron merentasi elektrod ini akan menghasilkan tenaga (voltan, arus dan kuasa) triboelektrik yang terdapat pada peranti. Kitaran yang berterusan ini membolehkan penjanaan tenaga yang berpanjangan dan mampan (Liu et al. 2024).

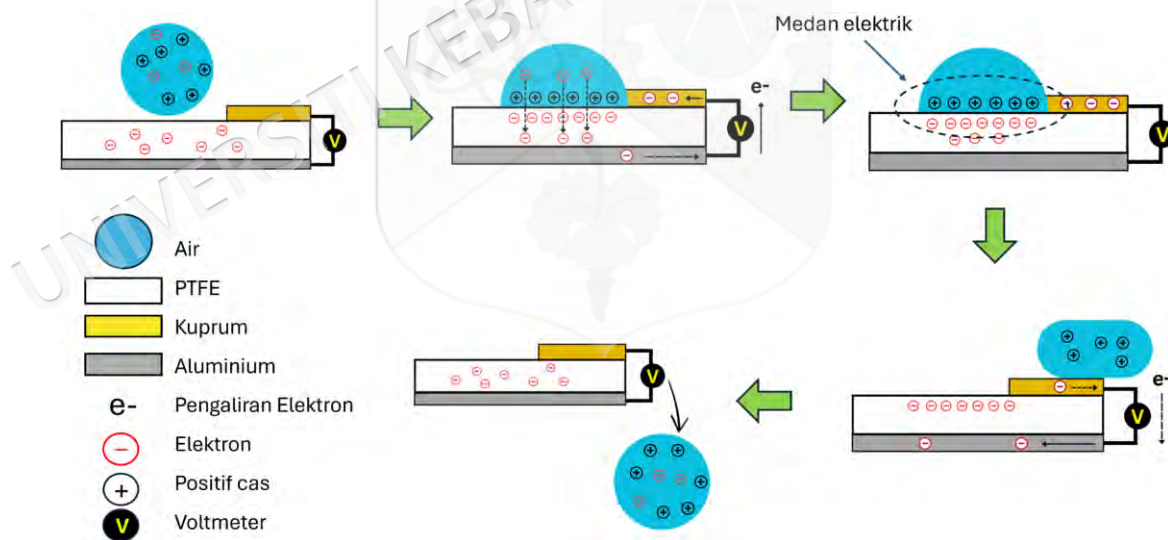
Berdasarkan dua kaedah konfigurasi elektrod yang digunakan, ciri voltan dan arus telah memberikan prestasi yang berbeza. Ujian ini telah dijalankan dengan jarak diantara titisan air dan substrat pada ketinggian 9 mm dan kedudukan sampel adalah 135° pada titisan air. Sehubungan itu, titisan air dijalankan selama 10 saat dengan kadar aliran air 70 ml/min. Keputusan ujian menunjukkan bahawa kaedah konfigurasi B telah menghasilkan voltan yang lebih tinggi berbanding kaedah konfigurasi A dimana purata voltan yang diperoleh daripada kaedah B adalah sebanyak 8.81 V berbanding yang dihasilkan daripada kaedah A dimana yang hanya memperoleh purata sebanyak 1.64 V. Manakala, purata arus yang terhasilkan daripada kaedah B juga lebih tinggi iaitu pada 11.6 μA berbanding kaedah A yang memperoleh purata arus pada 0.6 μA . Berdasarkan pengiraan yang dibuat, purata penjanaan kuasa yang terhasil pada peranti ini juga berbeza dimana kaedah B mampu menghasilkan purata kuasa sebanyak 1.68 μW iaitu lebih tinggi berbanding kaedah A yang hanya memperoleh 4.5×10^{-3} μW purata kuasa.

Jadual 4.1 menunjukkan perbandingan perbezaan kaedah konfigurasi elektrod terhadap purata penjanaan voltan, arus dan kuasa.

Jadual 4.1 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap kaedah konfigurasi elektrod yang berbeza

Konfigurasi Elektrod	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)
Kaedah konfigurasi A	1.64	0.6	4.5e^{-3}
Kaedah konfigurasi B	8.81	11.6	1.68

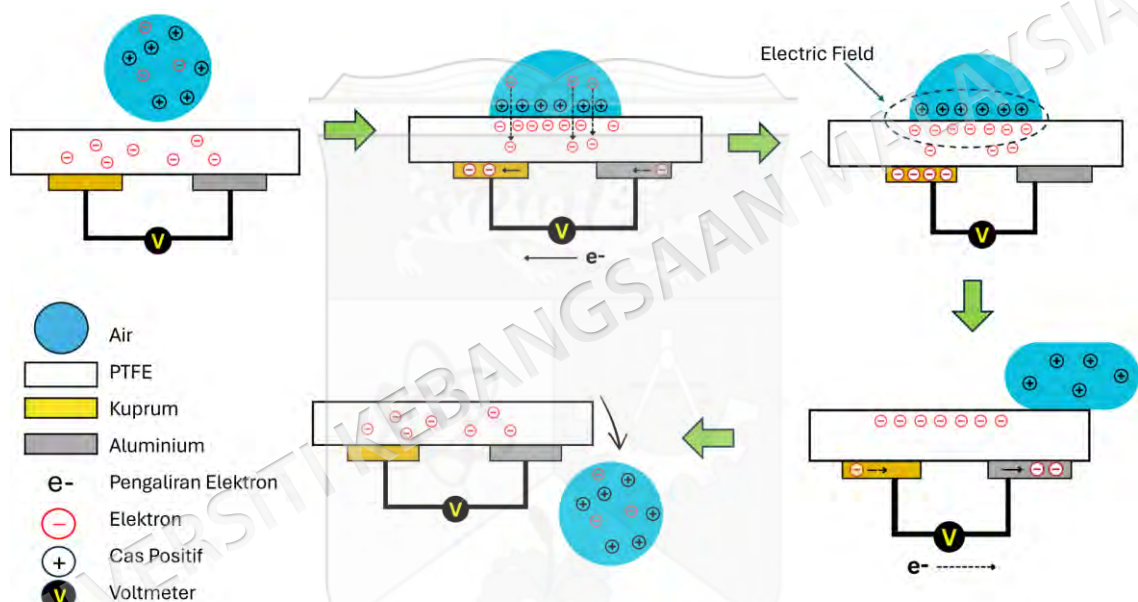
Berdasarkan keputusan yang diperoleh, ia menunjukkan bahawa konfigurasi elektrod dalam menghasilkan peranti TENG memainkan peranan yang penting dalam penjanaan tenaga. Seperti yang dilihat pada kaedah B, kaedah ini memperoleh kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih tinggi berbanding yang dihasilkan daripada kaedah A. Fenomena ini terjadi apabila elektrod yang diletakkan pada kedua-dua bahagian secara sandwic iaitu atas dan bawah dapat memaksimumkan perbezaan potensi antara elektrod dan memberikan iduksi elektrostatik yang lebih kuat. Rajah 4.3 menunjukkan lukisan skematik bagi fenomena penjanaan tenaga melalui konfigurasi B.



Rajah 4.3 Fenomena pemindahan cas titisan air pada konfigurasi B

Induksi elektrostatik memainkan peranan yang penting kerana dapat mempengaruhi penghasilan cas terkutub pada permukaan TENG yang dapat mendorong peningkatan cas iduksi (Jo et al. 2020). Kesan ini akan menguatkan dan menstabilkan medan elektrik antara elektrod dan menghasilkan perbezaan potensi yang

lebih besar dalam Peranti B. Perkara ini akan mendorong pemindahan yang lebih tinggi dan pengumpulan cas lebih cekap apabila permukaan TENG berinteraksi dengan titisan air. Selain itu, konfigurasi ini juga dapat meningkatkan kesan kapasitif antara titisan air dan lapisan triboelektrik. Kesan kapasitif merujuk kepada keupayaan peranti untuk menyimpan dan melepaskan cas elektrik. Peningkatan kesan kapasitif dapat memberikan kadar pemindahan cas yang lebih besar dan kadar pelepasan cas yang lebih tinggi pada elektrod (Liu et al. 2024). Oleh itu, struktur sandwic dapat memberikan pengasingan dan pengumpulan cas dari kedua-dua belah dengan baik yang membawa kepada pengumpulan cas yang lebih besar dan arus keluaran yang lebih tinggi.



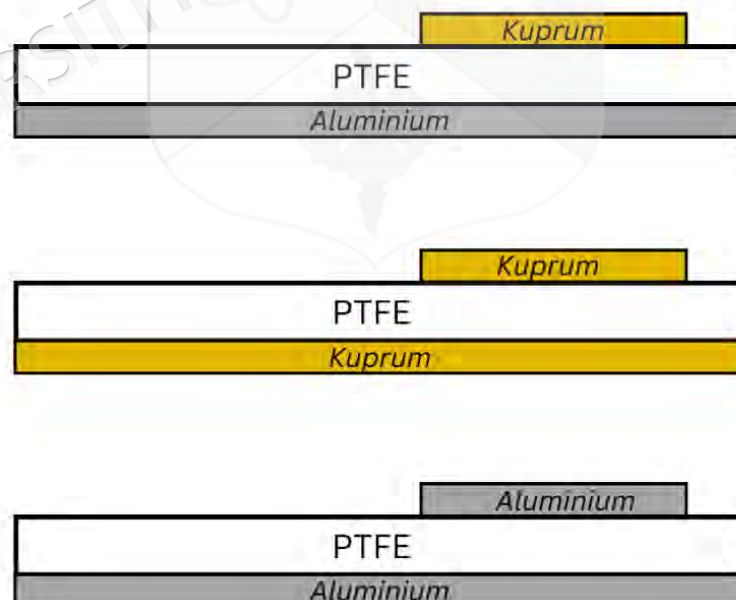
Rajah 4.4 Fenomena pemindahan cas titisan air pada konfigurasi A

Manakala, Kaedah A di mana kedua-dua elektrod diletakkan hanya di bahagian bawah secara selari berpotensi mengehadkan kecekapan pengumpulan cas, yang membawa kepada prestasi penjanaan tenaga yang lebih rendah (Kim et al. 2020). Perkara ini berlaku disebabkan oleh kedua-dua elektrod yang berada di bahagian bawah akan menyebabkan pengagihan medan elektrik menjadi lemah dan kurang berkesan yang membawa kepada pengurangan pergerakan elektron pada kedua elektrod yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4.4. Ketiadaan elektrod pada bahagian atas akan menyebabkan proses pemisahan cas terkutub menjadi terhad dan membawa kepada pengumpulan cas yang tidak lengkap dan menyebabkan pengurangan dalam output tenaga secara keseluruhan. Penemuan ini selari dengan kajian yang dijalankan

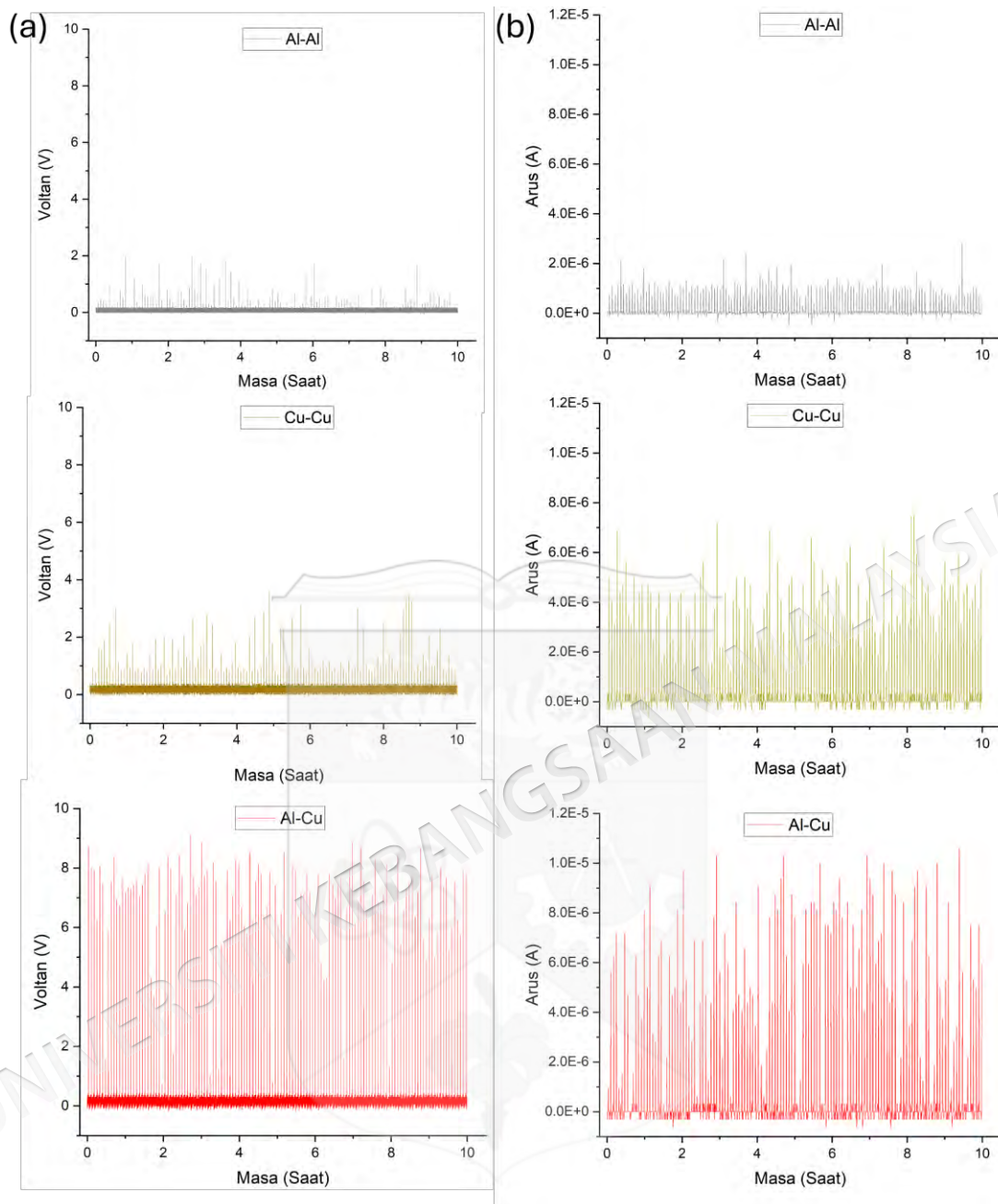
oleh Liu et al. (2024), yang melaporkan terdapat peningkatan empat kali ganda dalam penjanaan voltan dan arus apabila menggunakan konfigurasi elektrod berlapis. Selain daripada konfigurasi elektrod, pemilihan dan gabungan bahan elektrod juga memainkan peranan yang penting dalam mempengaruhi kadar penjanaan tenaga.

4.2.2 Kesan Perbezaan Bahan Elektrod

Berdasarkan konfigurasi elektrod terbaik, iaitu susunan secara sandwic yang menunjukkan kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih tinggi berbanding konfigurasi selari, tiga kombinasi bahan elektrod telah diuji menggunakan konfigurasi ini bagi menilai prestasi kombinasi bahan elektrod yang memberikan penjanaan voltan, arus dan kuasa yang terbaik. Terdapat tiga kombinasi bahan elektrod yang telah digunakan dalam kajian iaitu elektrod peti pengalir Al-Al, Cu-Cu, dan Al-Cu (Rajah 4.5). Ujian titisan air terhadap elektrod yang berbeza telah dilaksanakan dengan sudut parameter 135° , ketinggian 9 cm daripada sampel dan kadar kelajuan air 70 ml/min. Rajah 4.6 menunjukkan hasil keputusan ujian titisan air selama 10 saat dalam memperoleh bacaan arus dan voltan.



Rajah 4.5 Kombinasi bahan elektrod yang digunakan iaitu Al-Al, Cu-Cu, Al-Cu



Rajah 4.6 Kesan perbezaan bahan elektrod terhadap (a) Voltan dan (b) Arus

Dalam ujian ini, kombinasi Al-Cu memperoleh penjanaan voltan tertinggi dengan purata voltan 8.81 V jika dibandingkan dengan kombinasi elektrod yang lain iaitu dengan purata voltan 4.19 V pada kombinasi Cu-Cu. Kombinasi yang terendah adalah kombinasi Al-Al yang hanya menghasilkan purata voltan sebanyak 2.11 V. Corak keputusan yang sama telah diperoleh dalam purata penjanaan arus dimana kombina Al-Cu menghasilkan purata arus tertinggi jika dibandingkan dengan kombinasi elektrod yang lain iaitu sebanyak 11.6 μA . Manakala kombinasi Cu-Cu dan Al-Al hanya

menghasilkan purata arus sebanyak 8.1 μA dan 6.13 μA . Penjanaan kuasa yang dihasilkan pada peranti ini juga berbeza dimana Al-Cu mampu menghasilkan purata kuasa terbanyak iaitu pada 1.68 μW , diikuti oleh Cu-Cu iaitu pada 0.82 μW dan yang terendah ialah Al-Al iaitu pada 0.47 μW . Jadual 4.2 menunjukkan perbandingan perbezaan kombinasi bahan elektrod terhadap purata penjanaan voltan, arus dan kuasa.

Jadual 4.2 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap kombinasi bahan elektrod yang berbeza

Kombinasi elektrod	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)
Al-Al	2.11	6.13	0.47
Cu-Cu	4.19	8.1	0.82
Al-Cu	8.81	11.6	1.68

Berdasarkan keputusan yang diperoleh, pemilihan bahan elektrod dalam menghasilkan peranti TENG memainkan peranan yang penting dalam mempengaruhi penjanaan voltan, arus dan kuasa dengan ketara yang disebabkan oleh kekoduksian elektrik dan fungsi kerja (*work function*) pada kombinasi elektrod yang dihasilkan pada sesuatu peranti TENG. Fenomena ini dapat dilihat apabila kedua-dua elektrod diperbuat daripada bahan yang sama seperti aluminium-aluminium (Al-Al) atau kuprum-kuprum (Cu-Cu). Kombinasi positif dan negatif elektrod yang sama menghasilkan perbezaan potensi yang minimum dan penjanaan yang terhasil adalah semata-mata daripada sifat bahan elektrod sendiri (Nasri et al. 2024).

Berdasarkan keputusan Al-Al dan Cu-Cu, ia dapat dilihat bahawa Cu-Cu, memperoleh penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih tinggi berbanding Al-Al. Perkara ini disebabkan oleh kekonduksian elektrik yang terdapat pada kuprum lebih tinggi berbanding aluminium yang menyebabkan penjanaan tenaga yang terhasil dalam peranti TENG ini lebih tinggi. Kekonduksian yang lebih tinggi dapat memberikan pengaliran elektron yang lebih cekap dalam peranti, mengurangkan rintangan dalaman dan dengan itu meningkatkan penjanaan semasa dan kecekapan penuaian tenaga secara keseluruhan. Terdapat juga kajian lepas yang melaporkan bahawa peranti yang menggunakan elektrod kuprum menghasilkan penjanaan tenaga yang lebih tinggi berbanding elektrod aluminium, dan hal ini juga telah dikaitkan dengan sifat konduktiviti kuprum yang lebih baik (Jiao et al. 2022).

Manakala, penggunaan kombinasi bahan elektrod yang berbeza seperti aluminium dan kuprum (Al–Cu), ia telah memperkenalkan pengaruh faktor yang baru dan telah meningkatkan penjanaan tenaga berbanding penggunaan elektrod tunggal (Al–Al dan Cu–Cu). Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan kesan sinergistik yang tidak simetri dalam fungsi kerja dan penghasilan variasi dalam penghalangan Schottky. Dalam operasi TENG, perbezaan dalam fungsi kerja elektrod akan menjana kecerunan pada potensi yang akan menggalakkan pengangkutan cas secara berarah dan meningkatkan proses pengasingan cas semasa proses pemisahan sentuhan diantara peranti TENG dan titisan air (Potu et al. 2024). Fenomena yang terhasil ini berkait rapat dengan ciri penghalangan schottky pada antara muka diantara logam elektrod (Al dan Cu) dan substrat dielektrik (PTFE). Teori penghalangan schottky dapat di lihat melalui Persamaan 5.1 berikut:

$$\Phi_B \propto |\Phi_M - \Phi_s| \quad \dots (4.1)$$

Dimana Φ_B , merujuk kepada ketinggian penghalang schottky, Φ_M merupakan fungsi kerja bagi logam dan Φ_s adalah potensi permukaan. Berdasarkan persamaan ini dapat dilihat bahawa Φ_B adalah berkadar langsung dengan Φ_M yang menunjukkan semakin tinggi fungsi kerja bagi logam, semakin tinggi penghalang schottky yang dihasilkan (Meng, Lee, et al. 2024). Fungsi kerja yang lebih rendah mempunyai potensi yang lebih rendah untuk bergerak, manakala, fungsi kerja yang tinggi boleh memegang elektron dengan lebih kuat. Melalui fungsi kerja ini, penghalang schottky memainkan peranan yang penting dalam memberikan pergerakan elektron secara berarah dengan menjadikan fungsi kerja yang lebih tinggi pengumpul elektron dan fungsi kerja yang lebih rendah sebagai sumber elektron (Tung 2014).

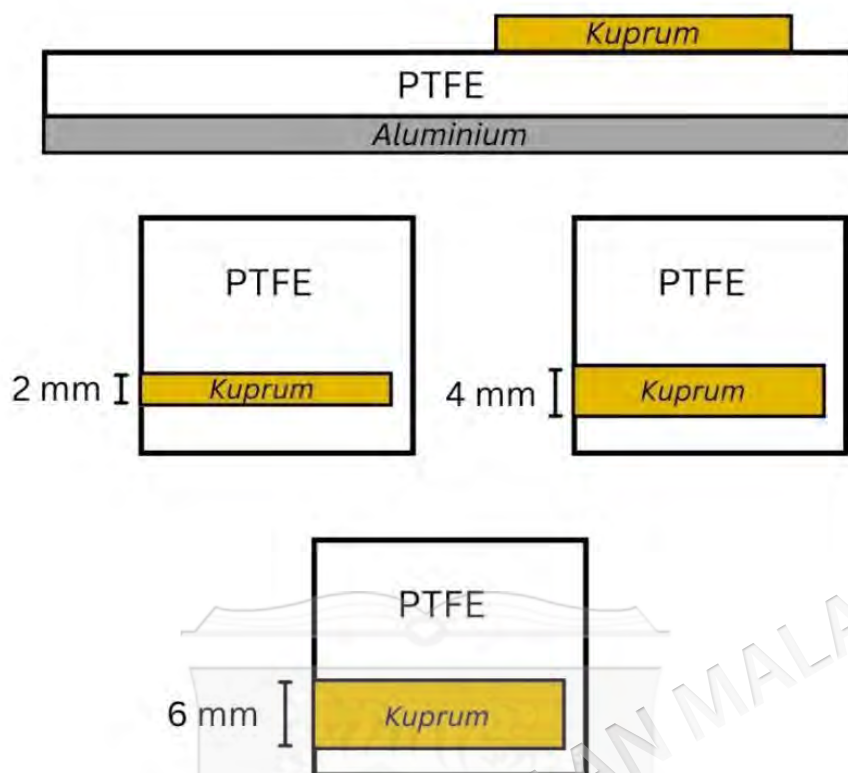
Antara muka Cu–PTFE, mempunyai fungsi kerja yang lebih tinggi (~ 4.65 eV), perkara ini akan membentuk kawasan penyerapan elektron dan dapat menyokong penstabilan dan pengekalan cas antara muka apabila digunakan sebagai elektrod atas. Sebaliknya, pada antara muka Al-PTFE, fungsi kerja aluminium yang lebih rendah (~ 4.28 eV) memudahkan proses pengaliran elektron ke dalam kawasan pengaliran PTFE (Ciniero et al. 2023; Han et al. 2024). Perbezaan ini akan menyebabkan elektron berpindah dari aluminium ke kuprum yang didorong oleh perbezaan dalam fungsi kerja

diantara kedua-dua logam elektrod. Apabila digabungkan dalam konfigurasi Al–Cu, perbezaan ketinggian penghalangan Schottky yang wujud dapat memudahkan pengangkutan cas secara keseluruhan yang disebabkan oleh kewujudan kecerunan potensi dalaman merentasi lapisan PTFE. Kecerunan potensi dalaman yang terhasil kemudiannya menggalakkan pergerakan cas berarah dan meningkatkan kecekapan pemindahan cas pada antara muka elektrod-PTFE. Keadaan ini telah memberikan peningkatan output elektrik pada kombinasi bahan elektrod yang berbeza berbanding konfigurasi bahan elektrod secara tunggal (Jo et al. 2020).

Mekanisme teori ini juga selari dengan penemuan kajian, di mana pasangan elektrod Al–Cu menunjukkan penjanaan voltan, arus, dan kuasa yang tertinggi berbanding konfigurasi lain yang diuji (Al-Al dan Cu-Cu). Penggunaan bahan elektrod yang tidak simetri dapat meningkatkan medan elektrik dalaman yang memudahkan pemisahan cas yang lebih cekap serta pengangkutan pembawa cas semasa proses triboelektrik. Hasilnya, konfigurasi Al-Cu mencapai kecekapan penukaran tenaga yang lebih baik berbanding sistem logam secara tunggal (Nguyen et al. 2023). Oleh itu, gabungan elektrod dengan fungsi kerja yang berbeza merupakan strategi yang berkesan untuk meningkatkan prestasi TENG berasaskan titisan air melalui peningkatan pada perbezaan potensi dalaman dan sifat penghalangan Schottky.

4.2.3 Kesan Perbezaan Saiz Elektrod

Selain daripada kombinasi bahan elektrod, saiz lebar elektrod yang digunakan juga mampu mempengaruhi penjanaan tenaga yang dihasilkan. Dalam ujian ini, kombinasi bahan elektrod yang terbaik iaitu Al-Cu telah di pilih bagi menjalani ujian dalam saiz panjang elektrod yang berbeza untuk melihat kesan saiz elektrod terhadap penjanaan voltan, arus dan kuasa. Kajian ini telah menguji tiga saiz panjang elektrod yang berbeza iaitu 2 mm, 4 mm dan 6 mm dengan lebar yang sama iaitu pada 15 mm seperti yang di tunjukkan pada Rajah 4.7. Kesemua sampel yang dihasilkan di uji dengan parameter titisan air yang sama iaitu pada sudut 135°, dengan ketinggian diantara sampel dan sumber air pada 9 cm dan kadar kelajuan air pada 70 ml/min.

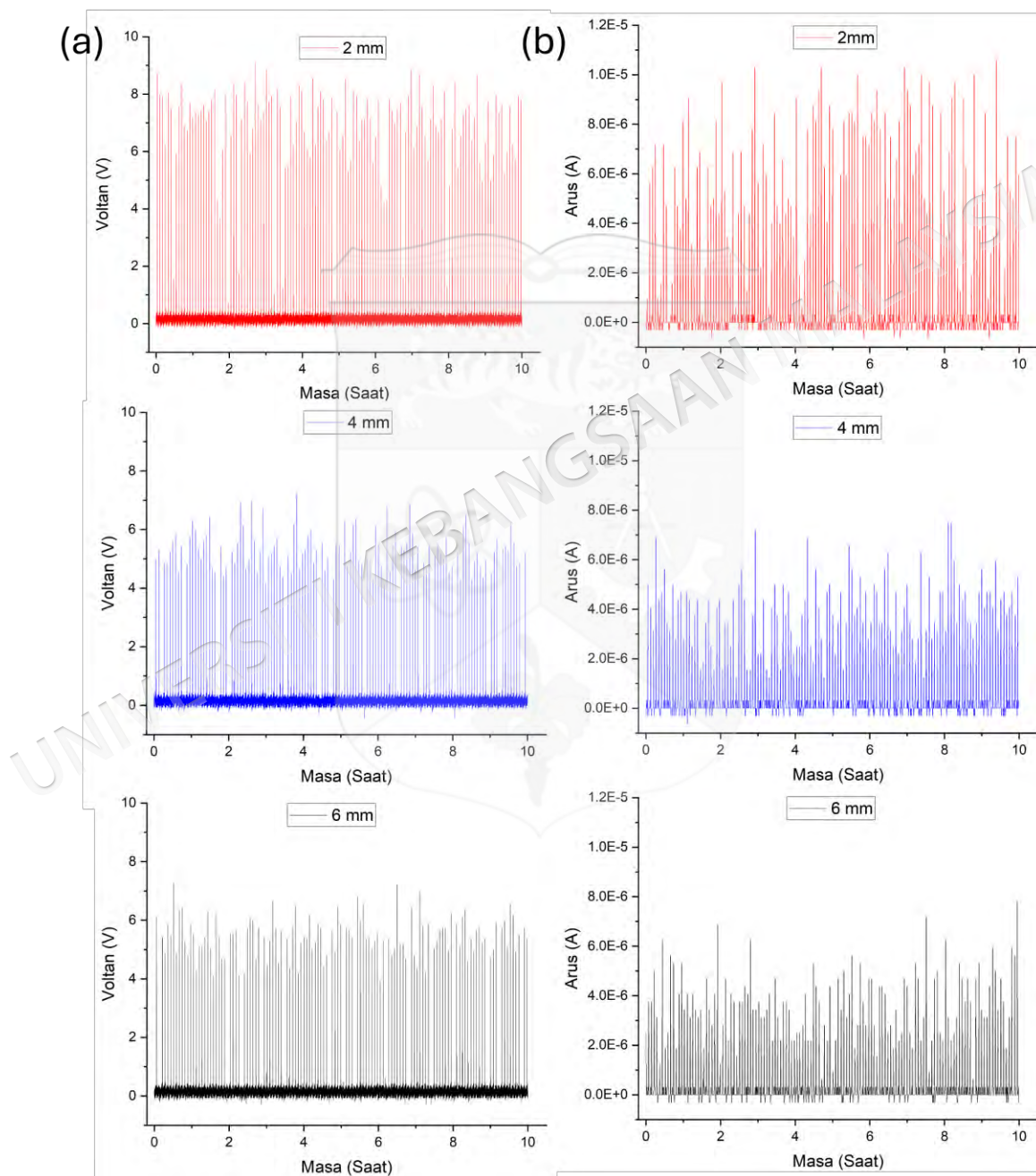


Rajah 4.7 Perbezaan saiz elektrod iaitu 2 mm, 4mm, dan 6 mm pada positif kuprum dengan kombinasi Al-Cu yang digunakan.

Rajah 4.8 menunjukkan hasil keputusan penjanaan voltan dan arus yang diperoleh daripada ujian titisan air selama 10 saat. Berdasarkan keputusan ujian yang dijalankan, saiz panjang elektrod 2 mm memperoleh purata penjanaan voltan yang tertinggi berbanding saiz panjang elektrod yang lain. Saiz panjang elektrod 2 mm mampu memperoleh purata penjanaan voltan sebanyak 8.81 V berbanding 4 mm dan 6 mm yang hanya mampu memperoleh purata sebanyak 6.16 V dan 5.81 V. Selain daripada penjanaan voltan, purata arus yang dijana daripada panjang elektrod 2 mm juga mempunyai bacaan yang tertinggi iaitu pada 11.6 μA di ikuti oleh panjang elektrod 4 mm iaitu pada 8.5 μA dan purata arus yang terendah adalah pada panjang elektrod 6 mm iaitu pada 8.0 μA . Penjanaan kuasa yang dihasilkan juga menunjukkan corak yang sama iaitu 2 mm memperoleh purata penjanaan kuasa terbanyak pada 1.68 μW , diikuti oleh 4 mm pada 0.9 μW dan yang terendah ialah 6 mm iaitu pada 0.8 μW . Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diperhatikan bahawa semakin panjang saiz elektrod yang digunakan, semakin rendah kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan. Jadual 4.3 menunjukkan perbandingan perbezaan saiz panjang positif elektrod terhadap purata penjanaan voltan, arus dan kuasa.

Jadual 4.3 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap panjang positif elektrod yang berbeza

Panjang elektrod	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)
2 mm	8.81	11.6	1.68
4 mm	6.16	8.5	0.9
6 mm	5.81	8.0	0.8



Rajah 4.8 Kesan perbezaan saiz elektrod positif kuprum dengan kombinasi Al-Cu yang berbeza 2 mm, 4mm, dan 6 mm terhadap (a) Voltan dan (b) Arus

Lebar elektrod 2 mm menghasilkan kadar penjanaan yang lebih tinggi dan lebih stabil berbanding elektrod 4 mm dan 6 mm adalah disebabkan oleh kesannya terhadap kepekatan medan elektrik, kecekapan pemindahan cas, dan interaksi antara permukaan PTFE dan titisan air. Elektrod yang bersaiz lebih kecil dapat menghasilkan medan elektrik yang lebih tertumpu dan kuat yang dapat membantu dalam peningkatan pemindahan cas dan perbezaan potensi (Niu et al. 2014). Peningkatan pada saiz elektrod boleh menyebabkan medan elektrik tersebar dan mengurangkan kecekapan pemindahan cas yang membawa kepada penjanaan kuasa yang tidak stabil. Fenomena yang diterangkan ini dapat dilihat melalui persamaan berikut (4.2):

$$E \approx \frac{V}{d} \quad \dots (4.2)$$

Dimana E , merupakan kekuatan medan magnet, V merupakan kadar voltan dan d merupakan jarak pemisahan. Berdasarkan prinsip triboelektrik dan elektrostatik ini, saiz elektrod yang lebih kecil akan memperoleh nisbah tepi-ke-tepi (*edge-to-edge*) yang lebih tinggi. Keadaan ini meningkatkan medan elektrik pada bahagian pinggir elektrod dan mewujudkan kekuatan medan elektrik yang tinggi pada kawasan setempat (Wang, Zhang, et al. 2023). Perkara ini dapat dibuktikan melalui persamaan 4.2 yang menunjukkan E berkadar songsang dengan d . Oleh itu, semakin rendah jarak pemisah yang digunakan, semakin tinggi kekuatan medan magnet yang dihasilkan. Kekuatan magnet ini mempengaruhi kadar penjanaan dengan meningkatkan tegasan Maxwell yang dapat memberikan kadar pemindahan cas yang lebih cekap di antara permukaan PTFE dan titisan air (Ahmed, Abdullah, et al. 2023). Selain itu sifat kemuatan (capacitance) juga mampu mempengaruhi sifat penjanaan seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.3:

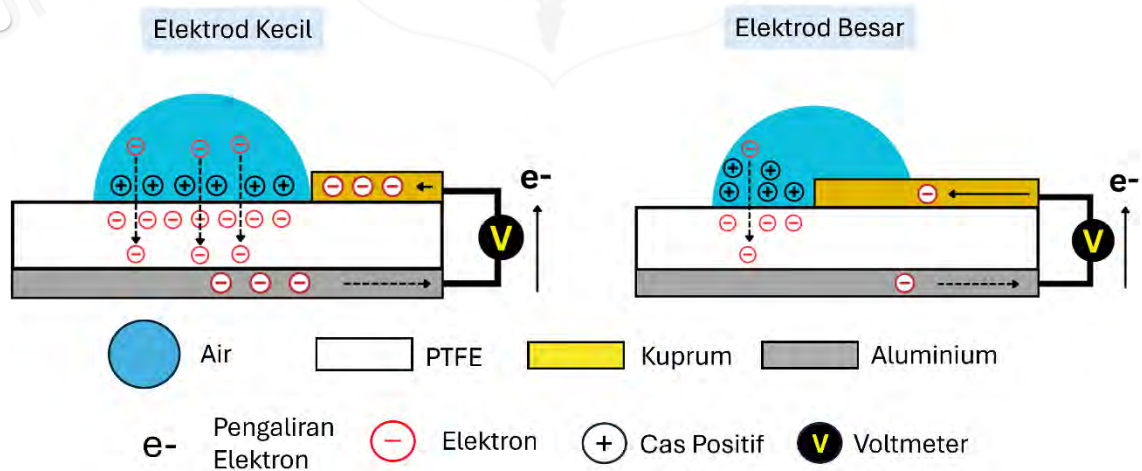
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad \dots (4.3)$$

ϵ_r merupakan pemalar dielektrik, ϵ_0 ialah kebolehtepatan vakum, A ialah kawasan sentuhan berkesan dan d ialah ketebalan lapisan dielektrik. Daripada persamaan ini, kawasan elektrod yang lebih kecil (A) membolehkan kadar kemuatan menjadi rendah (C). Manakala, berdasarkan hubungan perbezaan potensi yang di

tunjukan pada persamaan 4.4, dimana (Q) merupakan pemindahan cas. Kemuatan yang lebih rendah akan menghasilkan potensi yang lebih tinggi. Oleh itu, penggabungan kedua persamaan ini menunjukkan bukti teori penerangan berkenaan penghasilan outpun voltan yang lebih tinggi dan stabil pada elektrod bersaiz 2 mm berbanding saiz yang lebih besar iaitu pada 4 mm dan 6 mm (Kulandaivel et al. 2025; Wang 2015).

$$V = \frac{Q}{C} \quad \dots (4.4)$$

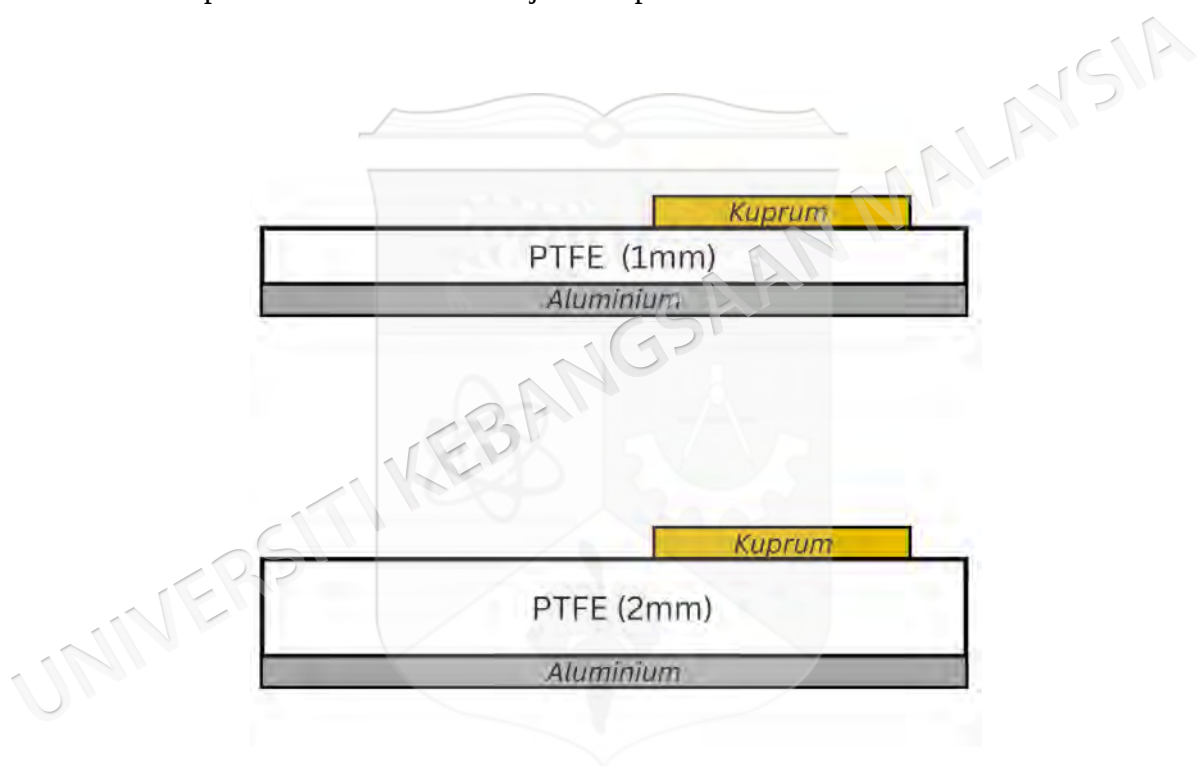
Sehubungan itu, elektrod yang bersaiz lebih besar turut meliputi sebahagian besar permukaan PTFE, yang menyebabkan kawasan terdedah untuk interaksi dengan titisan air berkurangan, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.9. Gangguan dalam interaksi antara titisan air dan permukaan PTFE menyebabkan pertukaran cas triboelektrik semula jadi menjadi tidak efisien, yang akhirnya menjejaskan penjanaan tenaga serta mengurangkan kestabilannya (Naganuma et al. 2023). Keadaan ini membawa kepada penjanaan cas yang tidak konsisten serta julat voltan yang lebih rendah bagi elektrod bersaiz lebih besar. Oleh itu, elektrod dengan lebar 2 mm menunjukkan prestasi paling baik, kerana ia membolehkan pengumpulan cas yang lebih berkesan, menghasilkan keamatan medan elektrik yang lebih tinggi serta mengekalkan kestabilan voltan, arus dan kuasa yang lebih baik berbanding elektrod bersaiz 4 mm dan 6 mm.



Rajah 4.9 Fenomena pemindahan cas titisan air terhadap panjang elektrod positif yang berbeza

4.2.4 Kesan Perbezaan Ketebalan PTFE

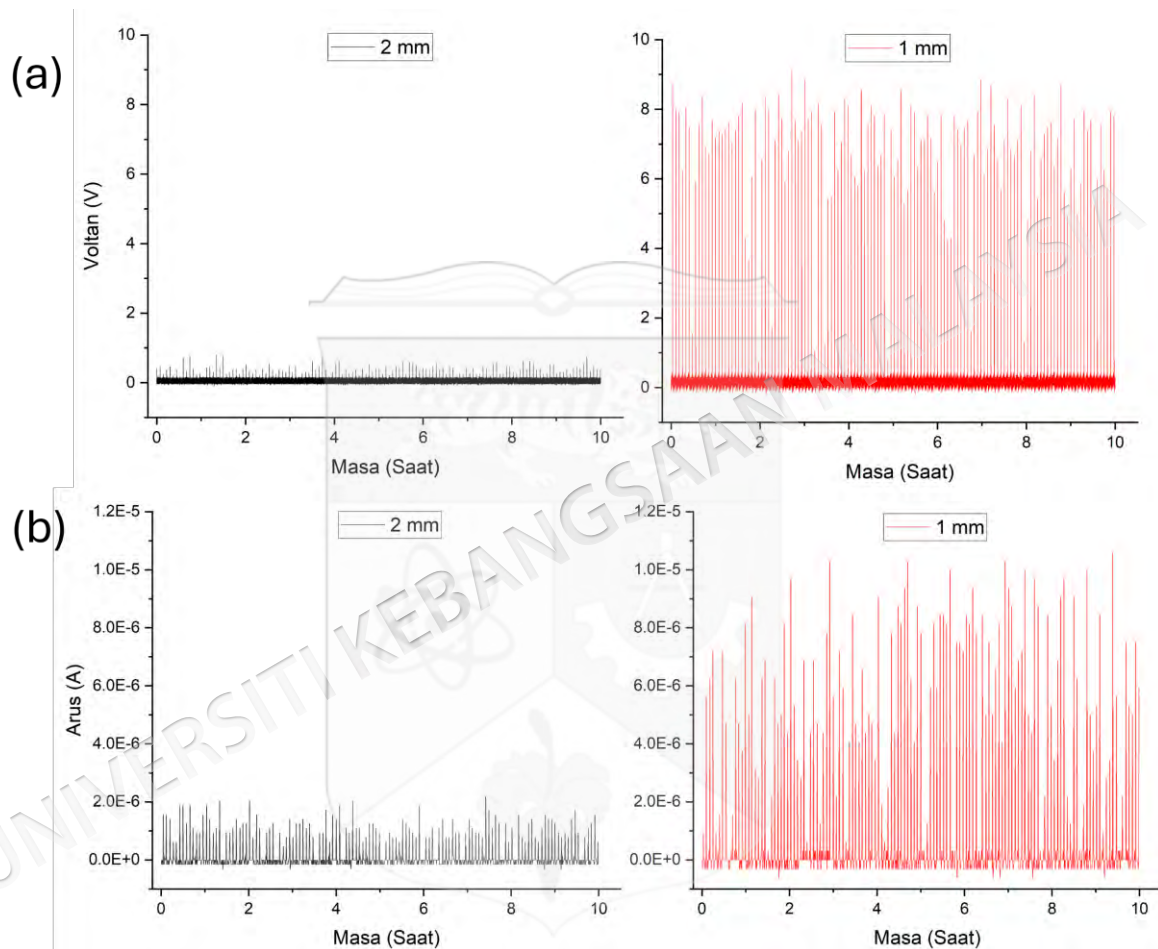
Dalam kajian ini, ketebalan PTFE juga dapat mempengaruhi kadar penjanaan tenaga yang dihasilkan. Terdapat dua jenis ketebalan PTFE yang digunakan dalam kajian ini iaitu 1 mm dan 2 mm. Berdasarkan konfigurasi elektrod, kombinasi bahan elektrod dan panjang elektrod yang terbaik, parameter ini telah digabungkan dan diuji dengan dua ketebalan yang berbeza untuk melihat pengaruhnya dalam penjanaan tenaga seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4.10. Kesemua sampel yang dihasilkan telah di uji dengan parameter titisan air pada sudut sampel 135° , dengan ketinggian diantara sampel dan sumber air pada 9 cm dan kadar kelajuan air pada 70 ml/min.



Rajah 4.10 Perbezaan ketebalan substrat PTFE iaitu 1 mm dan 2 mm yang di gunakan

Rajah 4.11 menunjukkan hasil keputusan penjanaan voltan dan arus yang diperoleh daripada ujian titisan air selama 10 saat untuk kesan perbezaan ketebalan PTFE. Berdasarkan ujian titisan air yang dijalankan, ketebalan PTFE 1 mm memperoleh bacaan voltan dan arus yang lebih tinggi berbanding PTFE berketebalan 2 mm. PTFE dengan berketebalan 1 mm memperoleh purata voltan yang lebih tinggi iaitu sebanyak 8.81V berbanding PTFE yang berketebalan 2 mm yang hanya memperoleh purata voltan 1.16 V. Sehubungan itu, purata arus yang diperoleh daripada ketebalan 1 mm juga lebih tinggi iaitu pada 11.6 μA berbanding 2 mm yang hanya memperoleh purata

arus pada 2.5 μA . Sehubungan itu, penjanaan kuasa 1 mm juga lebih tinggi iaitu pada 1.68 μW , berbanding 2 mm iaitu pada 7.8e^{-2} μW . Berdasarkan keputusan yang diperoleh, ketebalan dapat mempengaruhi kadar penjaan tenaga TENG. Jadual 4.4 menunjukkan perbandingan perbezaan ketebalan substrat PTFE terhadap purata penjanaan voltan, arus dan kuasa.



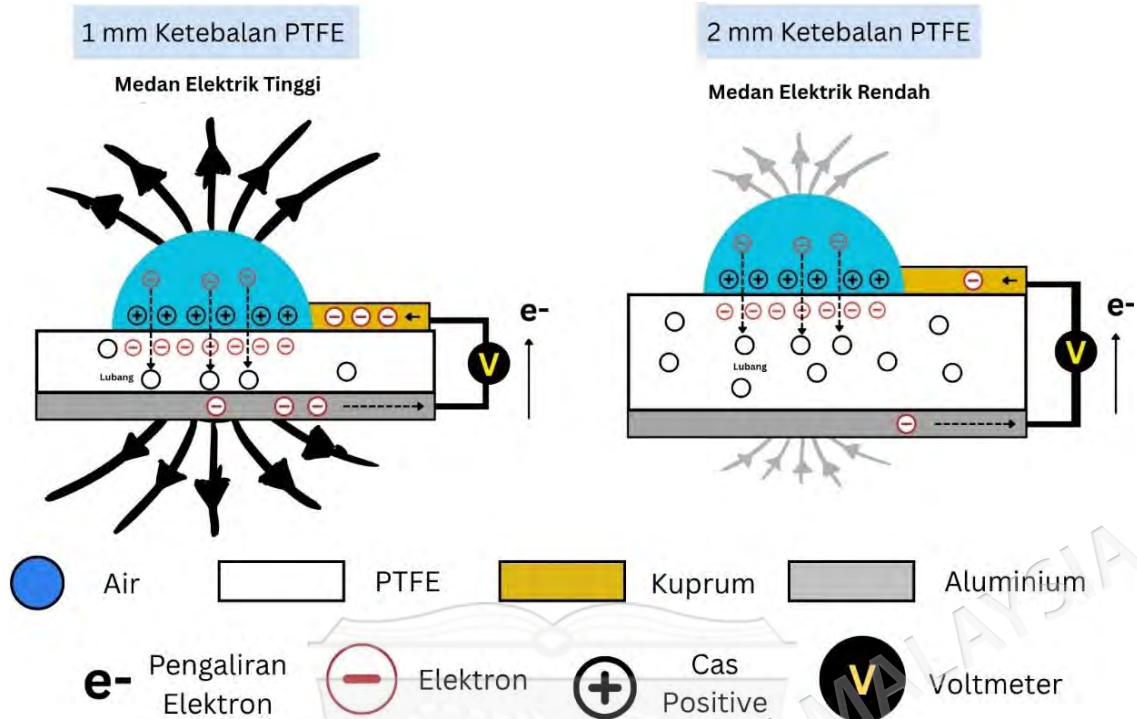
Rajah 4.11 Kesan perbezaan ketebalan PTFE (a) Voltan dan (b) Arus

Jadual 4.4 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap ketebalan substrat PTFE yang berbeza

Ketebalan PTFE	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)
1 mm	8.81	11.6	1.68
2 mm	1.16	2.5	7.8e^{-2}

Keadaan ini berlaku kerana ketebalan PTFE secara langsung mempengaruhi kekuatan medan elektrik, memandangkan PTFE berfungsi sebagai lapisan dielektrik dalam nanogenerator triboelektrik (TENG). Lapisan dielektrik yang lebih nipis, seperti substrat PTFE setebal 1 mm, membolehkan penembusan medan elektrik yang lebih baik serta mengurangkan kesan perlindungan cas dalaman (Gao et al. 2019). Keadaan ini memudahkan interaksi yang lebih cekap antara permukaan triboelektrik dan elektrod. Perkara ini berlaku disebabkan oleh substrat yang lebih nipis menghasilkan medan elektrik yang lebih kuat merentasi bahan akibat jarak pemisahan yang berkurang, dan ini meningkatkan pergerakan cas pada permukaan elektrod dengan lebih berkesan. Menurut Persamaan 4, medan elektrik (E) merentasi dielektrik adalah berkadar songsang dengan ketebalannya (d), seperti yang dinyatakan oleh $E=V/d$ (Yang et al. 2022). Oleh itu, medan elektrik yang lebih kuat yang terhasil daripada penggunaan substrat yang lebih nipis dapat meningkatkan kecekapan aruhan cas. Keadaan ini seterusnya menghasilkan output yang lebih tinggi dari segi voltan, arus, dan penjanaan tenaga (Liu et al. 2022).

Sebaliknya, penggunaan lapisan PTFE yang lebih tebal, seperti substrat 2 mm, menyebabkan medan elektrik dalam peranti TENG menjadi lebih lemah. Keadaan ini berlaku akibat peningkatan jarak pemisahan serta kesan perlindungan cas dalaman yang lebih ketara (Yang et al. 2022). Keadaan ini berlaku apabila lapisan PTFE yang lebih tebal menyebabkan terperangkapnya cas dalaman yang lebih besar dalam bahan dielektrik. Keadaan tersebut mengurangkan jumlah cas yang teraruh dan dipindahkan ke litar luaran semasa interaksi dengan titisan air. Hal ini seterusnya menurunkan kecekapan pengaruh elektrostatik antara permukaan dielektrik dan elektrod, lalu mengehadkan aruhan cas pada permukaan. Oleh itu, peranti menghasilkan voltan, arus, dan kuasa keluaran keseluruhan yang lebih rendah (Yang et al. 2022). Rajah 4.12 menunjukkan pengaruh ketebalan PTFE terhadap tingkah laku pemindahan cas serta kesannya terhadap output tenaga. Rajah tersebut menjelaskan bagaimana perubahan dalam ketebalan PTFE mempengaruhi kekuatan medan elektrik, kecekapan pemindahan cas, dan prestasi keseluruhan peranti TENG.



Rajah 4.12 Fenomena pemindahan cas titisan air terhadap ketebalan substrat PTFE yang berbeza

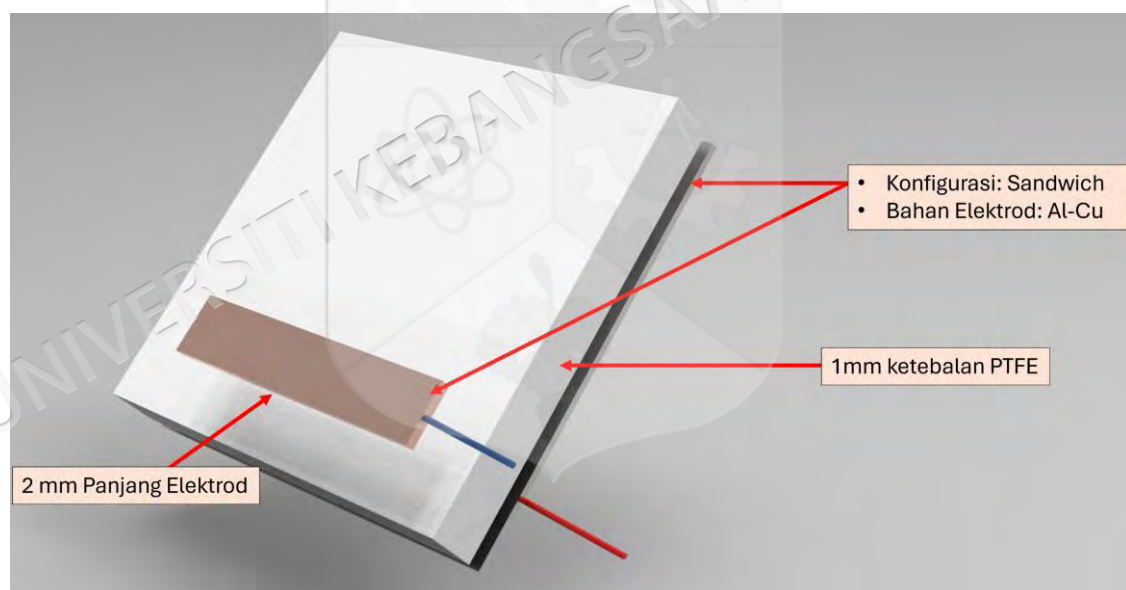
Pembuktian teori ini dapat dilihat dengan lebih jelas melalui perspektif sifat dielektrik, pemalar dielektrik PTFE didapati kekal stabil walaupun pada ketebalan yang berbeza. Namun demikian, ketebalan lapisan dielektrik memainkan peranan penting dalam menentukan kapasiti yang berkesan sistem TENG. Apabila lapisan dielektrik menjadi lebih nipis, kemuatan berkesan (C) akan meningkat. Hubungan asas ini dapat dijelaskan melalui persamaan kapasitor (4.7) seperti yang ditunjukkan:

$$Q = C \times V \quad \dots (4.7)$$

Di mana Q ialah jumlah cas yang disimpan, C ialah kemuatan dan V ialah voltan terpakai dimana C berkadar terus dengan Q . Peningkatan kemuatan membolehkan lebih banyak cas disimpan pada permukaan dielektrik bagi penyimpanan kadar voltan. Pengaruh ketebalan dielektrik terhadap kemuatan dapat dijelaskan dengan lebih mendalam melalui model kapasitor plat selari seperti yang ditunjukkan dalam persamaa berikut $C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$ (Persamaan 4.5) (Wang 2015). Berdasarkan persamaan ini, dapat dilihat bahawa kemuatan (C) adalah berkadar songsang dengan ketebalan dielektrik (d).

Lapisan dielektrik yang lebih nipis menyebabkan peningkatan kemuatan berkesan (C) dalam sistem peranti. Peningkatan kemuatan ini meningkatkan kecekapan pengaruh elektrostatik semasa kitaran sentuhan dan pemisahan TENG dengan membolehkan penyimpanan cas (Q) yang lebih besar serta mengurangkan penurunan voltan merentasi lapisan dielektrik. Keadaan ini seterusnya meningkatkan prestasi output elektrik keseluruhan peranti (Hasan et al. 2022; Kulandaivel et al. 2025). Oleh itu, prestasi penjanaan yang lebih tinggi yang diperoleh daripada substrat PTFE setebal 1 mm berbanding substrat 2 mm dapat dikaitkan dengan gabungan beberapa faktor seperti keamatan medan elektrik yang lebih kuat, interaksi cas permukaan yang lebih berkesan, serta pemindahan cas yang lebih cekap merentasi lapisan dielektrik. Kelebihan ini menjadikan PTFE dengan ketebalan 1 mm sebagai pilihan yang sesuai untuk digunakan sebagai bahan utama dalam peranti TENG yang dihasilkan.

4.2.5 Rumusan Fabrikasi Peranti



Rajah 4.13 Lukisan skimetik bagi parameter peranti yang digunakan

Berdasarkan semua ujian parameter yang dijalankan, iaitu konfigurasi elektrod, jenis bahan elektrod, panjang elektrod, dan ketebalan substrat PTFE, didapati bahawa setiap parameter memainkan peranan penting dalam menentukan prestasi peranti TENG yang dihasilkan. Pemilihan parameter yang sesuai dapat meningkatkan kecekapan penjanaan tenaga peranti. Keputusan yang diperoleh menunjukkan bahawa konfigurasi elektrod

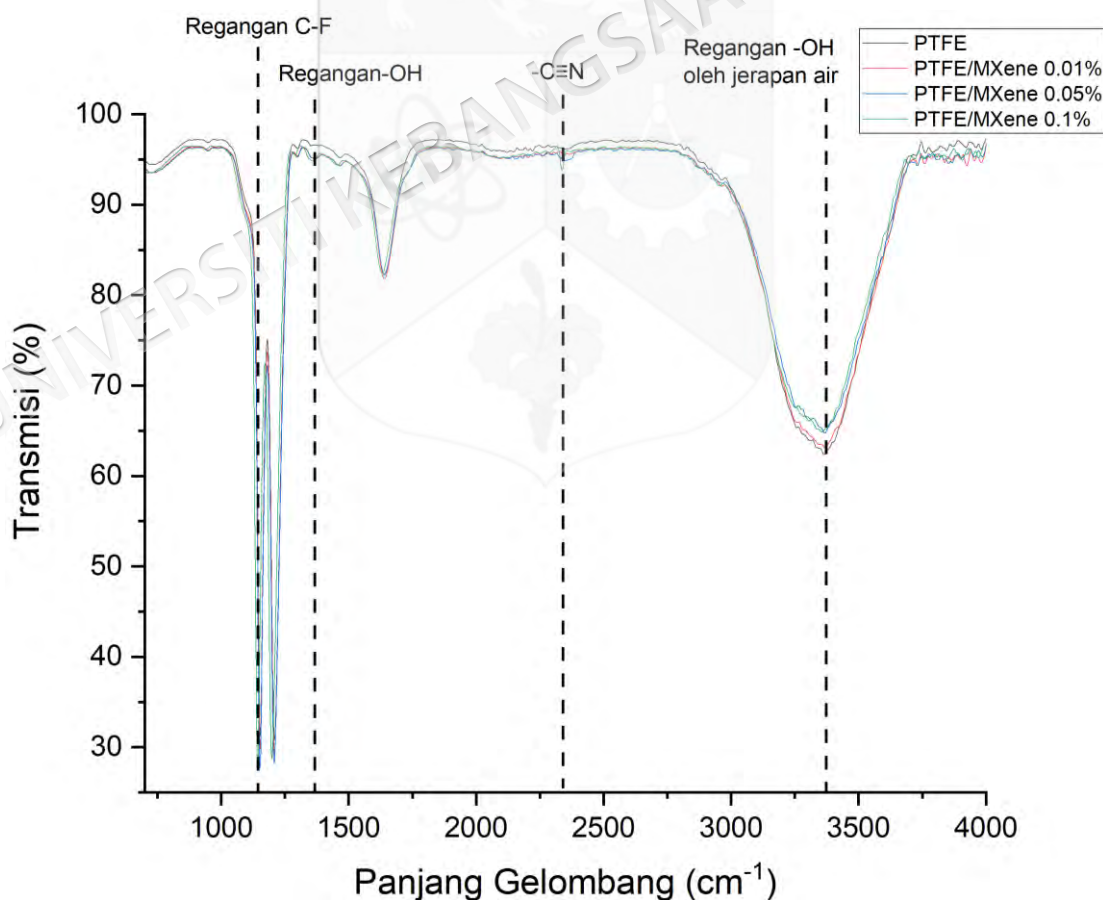
secara sandwic, dengan penggunaan kombinasi bahan elektrod Al–Cu bersaiz 2 mm serta substrat PTFE setebal 1 mm, memberikan prestasi penjanaan tenaga yang paling efisien. Nilai purata penjanaan yang dicapai ialah 8.81 V bagi voltan, 11.6 μ A bagi arus, dan 1.68 μ W bagi kuasa. Oleh itu, parameter ini telah dipilih sebagai asas dalam proses fabrikasi peranti untuk peringkat kajian seterusnya. Rajah 4.13 menunjukkan lukisan skimetik bagi peranti yang dihasilkan.

4.3 PENCIRIAN CAMPURAN DAN SALUTAN PTFE/MXENE

Berdasarkan ujian parameter reka bentuk yang telah di kaji pada bahagian 4.2, parameter reka bentuk yang terbaik telah di pilih dan menjalani proses rawatan salutan PTFE/MXene bagi meningkatkan prestasi penjanaan peranti TENG. Terdapat tiga komposisi larutan PTFE/MXene yang telah dihasilkan iaitu PTFE/Mxene 0.01wt%, PTFE/MXene 0.05wt% dan PTFE/MXene 0.1wt%. Larutan dan salutan yang dihasilkan ini telah dicirikan kepada empat pencirian iaitu FTIR, FESEM, XRD dan sudut sentuhan. Bahagian 4.3.1 telah membincangkan mengenai pencirian ujian FTIR yang dijalankan pada larutan untuk melihat ikatan kimia yang terbentuk daripada larutan PTFE/MXene yang dihasilkan. Keputusan daripada ikatan kimia ini dapat menunjukkan ciri keserasian yang terhasil diantara larutan PTFE dan MXene yang digunakan. Bahagian 4.3.2 pula membincangkan mengenai ujian FESEM yang dijalankan untuk melihat struktur topografi dan morfologi yang terdapat pada salutan PTFE/MXene. Melalui ujian FESEM ini, kehadiran pergumpalan dan perbezaan morfologi yang terhasil pada setiap komposisi salutan dapat di nilai melalui ujian taburan saiz zarah yang dibincangkan pada bahagian 4.3.3. Manakala, bahagian 4.3.4 membincangkan mengenai keputusan pencirian XRD pada salutan PTFE/MXene untuk melihat struktur hablur yang terhasil pada salutan ini. Ujian struktur hablur dapat membuktikan kehadiran MXene dan perubahan pada ciri hablur yang terdapat permukaan peranti TENG. Perkara ini dapat menunjukkan ciri pembentukan filem PTFE/MXene yang terhasil selepas proses persinteran. Akhir sekali, 4.3.5 menerangkan mengenai keputusan ujian sudut sentuhan yang dilakukan untuk melihat sifat kebolehasan salutan PTFE/MXene yang dihasilkan.

4.3.1 Analisis FTIR Bagi Melihat Ikatan Di Antara PTFE dan MXene

Pada bahagian ini, tiga komposisi campuran PTFE iaitu PTFE/MXene 0.01wt%, PTFE/MXene 0.05wt%, and PTFE/MXene 0.1wt% telah di uji dengan menggunakan alat pencirian FTIR untuk mengenal pasti ikatan yang terbentuk dalam larutan yang di hasilkan. Sehubungan itu, pencirian ini juga dilakukan untuk melihat pengaruh kehadiran MXene pada struktur ikatan yang terdapat pada larutan PTFE yang digunakan. Rajah 4.14 menunjukkan plot FTIR yang diperoleh daripada ujian pencirian FTIR yang dilakukan pada larutan PTFE dan larutan campuran PTFE/MXene dengan komposisi campuran yang berbeza. Ciri ikatan pada sesuatu bahan dapat ditentukan melalui corak regang panjang gelombang dan kadar transmisi yang dihasilkan pada spektrum FTIR. Berdasarkan spektrum yang dihasilkan, terdapat tiga ciri regang yang telah ditemui iaitu ikatan regangan Nitrile ($\text{C}\equiv\text{N}$), karbon-florida (C-F), dan hidrosil (-OH).

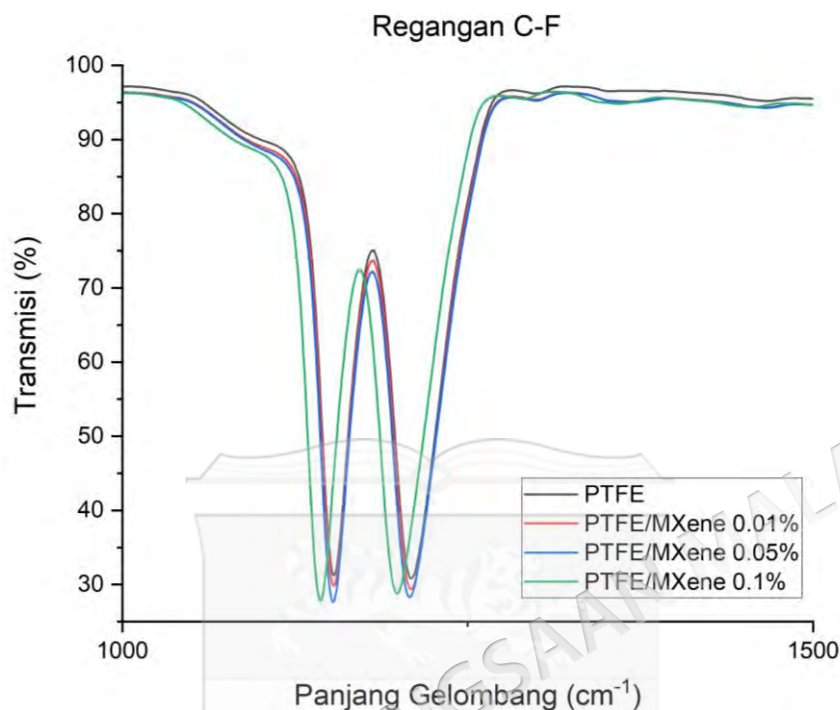


Rajah 4.14 Plot FTIR bagi sampel larutan PTFE, PTFE/MXene 0.01wt%, PTFE/MXene 0.05wt%, and PTFE/MXene 0.1wt%

Ciri rengangan $\text{-C}\equiv\text{N}$ dapat di temui pada panjang gelombang sekitar 2336 cm^{-1} (Weaver et al. 2022). Ciri ikatan ini dapat dilihat hanya terbentuk pada larutan yang mempunyai campuran MXene sahaja. Selain itu, komposisi MXene yang berbeza juga telah memberikan kadar transmisi yang berbeza. Semakin tinggi komposisi MXene yang digunakan, semakin rendah kadar transmin yang telah di peroleh. Perkara ini berlaku disebabkan oleh tidak balas pada permukaan MXene dimana kumpulan berfungsi alkylammonium yang terdapat pada MXene telah mengalami penyahhidrogenan atau pengoksidaan apabila berinteraksi dengan PTFE dan menyebabkan pembentukan $\text{-C}\equiv\text{N}$ (Gan et al. 2020). Kefungsian alkylammonium yang terdapat pada MXene adalah disebabkan oleh MXene yang digunakan merupakan MXene yang telah di rawat dengan menggunakan bahan kimia alkylammonium dan dapat dibuktikan melalui ciri formula linearnya iaitu $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{NH}_3\text{-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$. Seterusnya, $\text{-C}\equiv\text{N}$ juga boleh terbentuk ketika proses pensinteran dimana haba telah menyebabkan penyusunan semula ikatan dan menjana ikatan kumpulan berfungsi yang baharu (Baranov et al. 2019). Oleh itu, pembentukan $\text{-C}\equiv\text{N}$ menunjukkan terdapat interaksi yang baik diantara PTFE dan MXene pada larutan yang dihasilkan. Selain itu, ia juga dapat membuktikan bahawa terdapat kehadiran MXene pada campuran yang digunakan kerana ciri rengang $\text{-C}\equiv\text{N}$ tidak terbentuk pada larutan PTFE tulen.

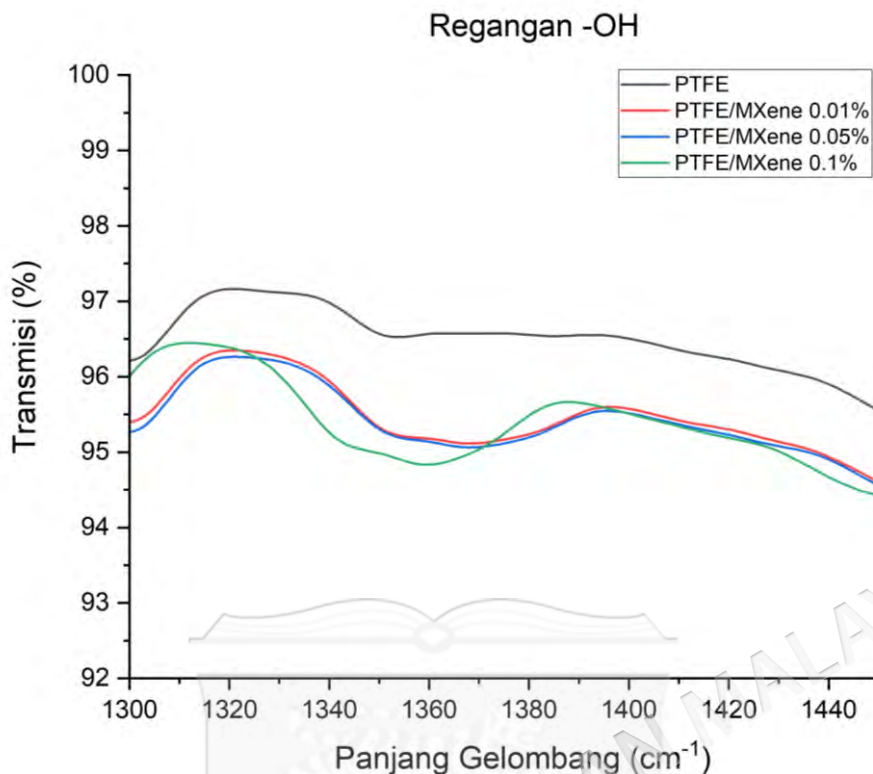
Sehubungan itu, ciri rengangan C-F pula dapat ditemui pada panjang gelombang diantara 1100 cm^{-1} sehingga 1250 cm^{-1} seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4.15. Ikatan yang terhasil ini merupakan ciri utama ikatan PTFE di mana terdapat ikatan yang kuat di antara karbon dan fluorin. Karbon dan fluorin merupakan ciri ikatan asas yang terdapat pada struktur PTFE (Meng, Zhang, et al. 2024). Namun, kehadiran MXene di dalam larutan PTFE telah mengubah struktur ikatan ini. Fenomena ini berlaku disebabkan oleh MXene mempunyai kumpulan berfungsi yang reaktif seperti hidroksil (-OH), Oksigen (-O), dan florida (-F) yang membolehkan bahan ini berinteraksi dengan ikatan C-F pada PTFE dan mengubah strukturnya (Kang et al. 2023). Oleh itu, perkara ini telah menyebabkan perubahan pada puncak spektrum C-F yang telah dihasilkan. Perubahan ini menunjukkan terdapat ikatan yang kuat telah terhasil diantara PTFE dan MXene pada campuran yang dilakukan. Dapatan ini selari dengan spektrum yang dihasilkan dimana semakin tinggi kandungan MXene yang digunakan, semakin rendah

peratusan transmisi yang telah diperoleh pada spektrum C-F yang disebabkan oleh interaksi MXene yang tinggi pada ikatan C-F dalam matrik PTFE.



Rajah 4.15 Gambaran regangan C-F pada panjang gelombang daripada 1500 cm^{-1} hingga 1200 cm^{-1}

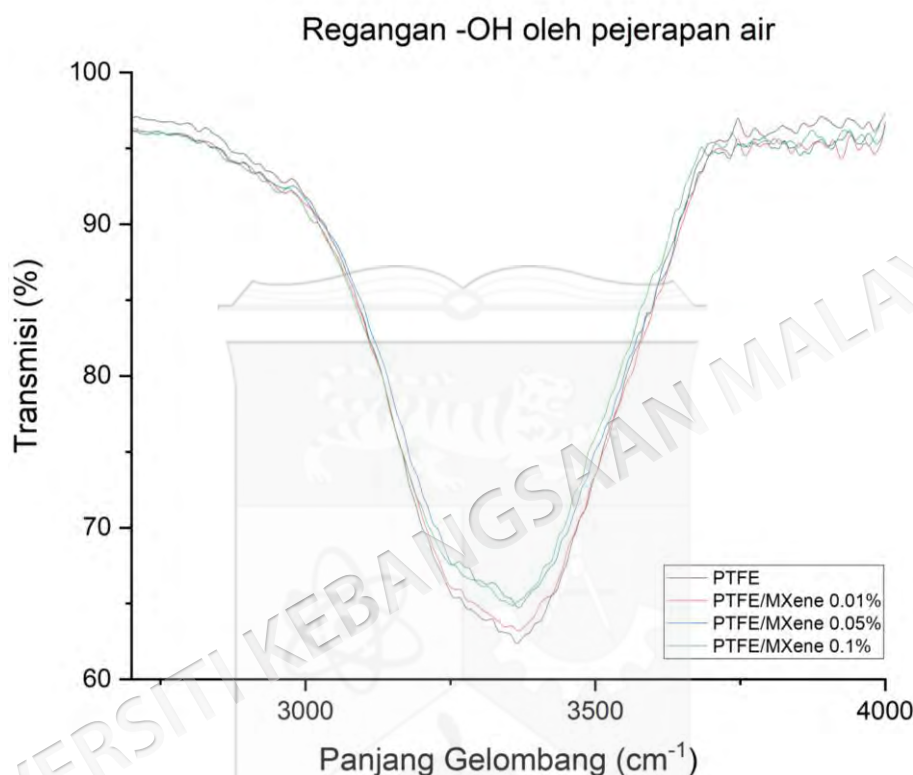
Selain itu, terdapat juga ciri rengang ikatan -OH yang telah ditemui iaitu pada panjang gelombang diantara 1300 cm^{-1} sehingga 1400 cm^{-1} . Ciri ini menunjukkan terdapat kehadiran kumpulan hidroksil (-OH) pada larutan PTFE/MXene yang dihasilkan (Li, Zhou, et al. 2017). Rajah 4.16 menunjukkan terdapat perbezaan pada spektrum FTIR diantara komposisi larutan yang dihasilkan dimana puncak hanya terbentuk pada larutan yang memperoleh kadungan MXene sahaja dan tidak terbentuk pada larutan PTFE tulen. Seterusnya, dapat diperhatikan juga semakin meningkat komposisi MXene yang digunakan, semakin rendah kadar transmisi yang telah terhasil pada spektrum FTIR. Perkara ini menunjukkan terdapat ikatan -OH yang baharu telah terhasil. Fenomena ini disebabkan oleh MXene mempunyai kumpulan berfungsi seperti -OH bagi membolehkannya berinteraksi apabila di campurkan dengan PTFE (Ibragimova et al. 2019). Oleh itu, kehadiran -OH ini telah mewujudkan spektrum baharu pada larutan yang mempunyai MXene. Hal ini dapat dilihat dengan lebih jelas apabila semakin tinggi kadungan MXene yang digunakan, banyak ikatan -OH telah terbentuk diantara PTFE dan MXene (Li, Zhou, et al. 2017).



Rajah 4.16 Gambaran ikatan -OH pada panjang gelombang 1300 cm^{-1} sehingga 1400 cm^{-1}

Akhir sekali, terdapat juga spektrum -OH diperoleh pada panjang gelombang diantara 3000 cm^{-1} sehingga 3500 cm^{-1} seperti yang di tunjukan pada Rajah 4.17. Kehadiran regangan ikatan -OH pada panjang gelombang ini kebiasaanya berkait rapat dengan kadar kelembapan pada bahan. Panjang gelombang ini menunjukkan larutan PTFE tulen mempunyai kadar transmisi yang rendah menunjukkan kehadiran kumpulahan -OH yang kuat. Kejadian ini berkait rapat dengan larutan PTFE yang digunakan dimana larutan yang digunakan merupakan larutan PTFE dengan 60%wt penyebaran pada air (H_2O). Pembentukan ikatan -OH yang kuat ini disebabkan oleh kehadiran ikatan hidrogen diantara PTFE dan air. Namun, kehadiran MXene pada larutan ini telah mengurangkan ikatan ini dan menghasilkan spektrum yang lebih rendah. Fenomena ini berlaku disebabkan oleh MXene telah mengubah struktur yang terdapat pada larutan PTFE dan mengurangkan interaksi air padanya (Mozafari et al. 2021). Kumpulan berfungsi pada MXene dapat mengganggu ikatan hidrogen yang terdapat air-PTFE dan menghalangnya daripada berinteraksi. Perkara ini dapat diperhatikan dengan lebih jelas apabila peningkatan campuran MXene pada larutan PTFE dimana semakin tinggi kadungan MXene yang digunakan, semakin tinggi spektrum -OH yang telah diperoleh.

Peningkatan ini menunjukkan peningkatan kandungan MXene telah mengurangkan ikatan -OH pada larutan PTFE tulen. Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa ikatan yang kuat diantara PTFE dan MXene telah terhasil di dalam larutan PTFE/MXene yang telah dihasilkan. Seterusnya, morfologi struktur salutan yang dihasilkan telah dicirikan dengan menggunakan alat pencirian FESEM.

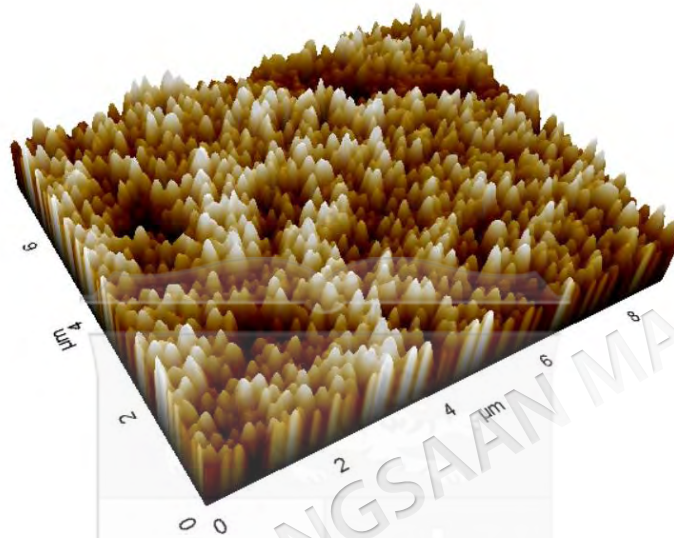


Rajah 4.17 Gambaran dekat ikatan -OH pada panjang gelombang 3000 cm^{-1} sehingga 3500 cm^{-1}

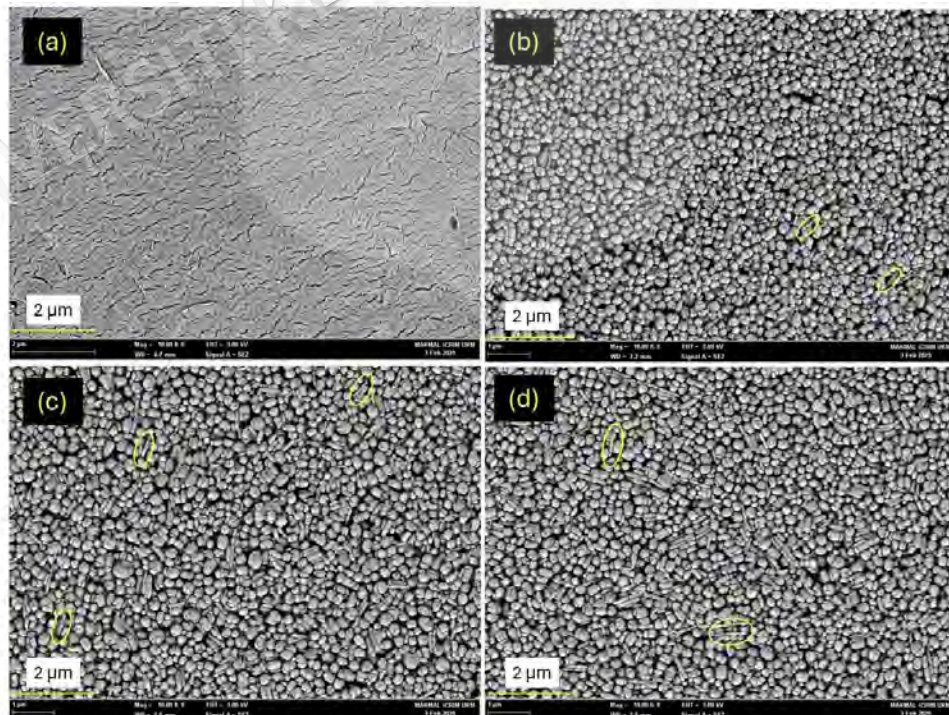
4.3.2 Ujian Ketebalan dan Morfologi Salutan

Pencirian AFM dan FESEM telah dijalankan pada permukaan PTFE tanpa salutan dan PTFE bersalut PTFE/MXene dengan komposisi yang berbeza (0.01wt%, 0.05wt% dan 0.1wt%). Ujian AFM dijalankan bagi melihat ketebalan salutan yang terbentuk pada permukaan peranti TENG yang dihasilkan. Manakala, Ujian FESEM dilakukan untuk melihat perbezaan morfologi yang terhasil pada permukaan yang diuji. Rajah 4.18 menunjukkan profil ketebalan salutan yang diperoleh daripada ujian AFM. Keputusan menunjukkan bahawa semua salutan PTFE/MXene yang dihasilkan mempunyai ketebalan dalam julat 100 nm hingga 150 nm bagi setiap komposisi yang dikaji. Rajah 4.19 menunjukkan imej morfologi bagi permukaan PTFE tanpa salutan dan bersalut

PTFE/MXene. Imej yang diperoleh menunjukkan terdapat perbezaan permukaan yang ketara diantara permukaan bersalut PTFE/MXene dan permukaan tanpa salutan. Permukaan salutan PTFE/MXene menunjukkan morfologi permukaan yang berstruktur dan mempunyai butiran. Manakala, PTFE tanpa salutan pula menunjukkan permukaan yang lebih rata dan tidak berstruktur.



Rajah 4.18 Profil ketebalan salutan PTFE/Mxene menggunakan AFM



Rajah 4.19 Morfologi salutan (a) tanpa salutan, (b) PTFE/MXene 0.01%wt, (c) PTFE/MXene 0.05%wt dan (d) PTFE/MXene 0.1%wt

Terdapat beberapa kelebihan pada permukaan berstruktur dan berbutir berbanding permukaan yang lebih licin. Antara kelebihan permukaan berstruktur ialah ia mampu meningkatkan sifat hidrofobik pada permukaan. Fenomena ini berlaku apabila permukaan ini telah menghasilkan poket udara di antara struktur butiran dan menyebabkan menghalang air untuk merabak pada permukaan. Perkara ini dapat mengurangkan lekatan di antara titisan air dan permukaan yang membolehkan air mudah untuk mengalir. Dalam aplikasi TENG, sifat hidrofobik memainkan peranan yang penting dalam membantu kadar pemisahan dan sentuhan cas apabila air berinteraksi pada permukaan bagi memperoleh penghantaran cas yang lebih cekap. Selain itu, permukaan berstruktur juga mampu meningkatkan kawasan sentuhan yang berkesan pada permukaan yang secara langsung meningkatkan kadar pemindahan cas secara keseluruhan (Huang et al. 2024; Saadatnia et al. 2019).

Walau bagaimanapun, keseimbangan permukaan berstruktur dan pergumpalan zarah perlu di perhatikan kerana kerana pergumpalan yang tinggi boleh mengurangkan kadar pemindahan cas yang disebabkan oleh sifat konduktif pada permukaan tidak sekata. Fenomena ini berlaku apabila pergumpalan zarah menyebabkan pengumpulan cas setempat dan meningkatkan rintangan elektrik dalaman. Perkara ini akan mengganggu pengaliran cas dan mengurangkan kadar penjanaan triboelektrik didalam peranti TENG. Selain itu pergumpalan zarah juga dapat mengganggu keseragaman pada permukaan dan secara langsung mengurangkan kadar sentuhan berkesan diantara titisan air dan permukaan. Kejadian ini boleh menyebabkan pengurangan penjanaan cas secara keseluruhan. Sehubungan itu, permukaan yang terlalu licin juga boleh mengurangkan penjanaan TENG yang disebabkan oleh pengurangan kawasan sentuhan berkesan dan menyebabkan pengurangan kadar sentuhan elektrifikasi (Neagoe et al. 2017). Oleh itu, keseimbangan antara kelicinan dan struktur permukaan adalah penting untuk memaksimumkan prestasi TENG.

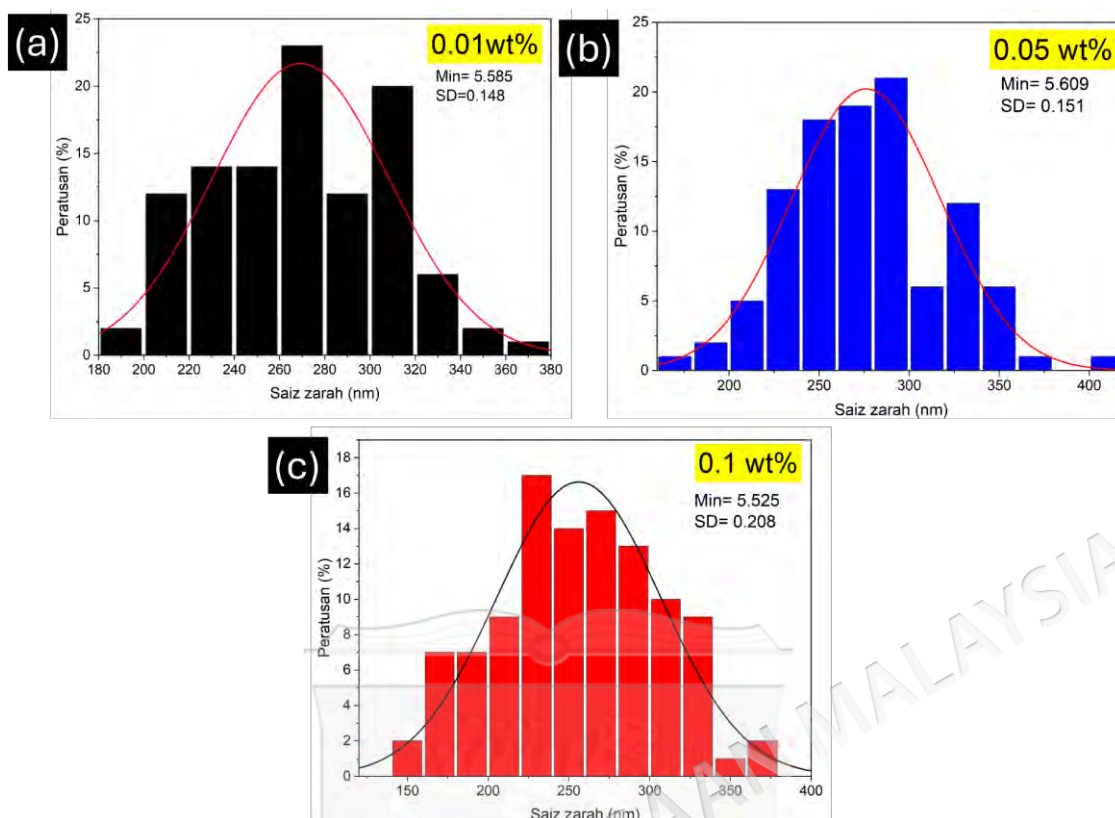
Berdasarkan imej FESEM yang diperoleh, pembentukan permukaan yang berstruktur dan berbutir pada permukaan salutan adalah disebabkan oleh taburan zarah PTFE dan MXene pada morfologi salutan yang dihasilkan. Terdapat dua struktur taburan yang dapat di kenal pasti iaitu struktur taburan sfera dan struktur taburan rod (seperti yang ditunjukkan pada bulatan kuning dalam Rajah 4.19). Struktur taburan sfera

ini boleh diklasifikasikan sebagai matrik PTFE seperti yang di peroleh daripada kajian (Zhao, Sun, et al. 2020). Manakala, struktur rod merupakan bahan pengisi MXene sama seperti yang diperoleh daripada kajian Gao et al. (2021) yang juga memperoleh struktur rod. Perkara ini dapat dibuktikan melalui perbezaan morfologi salutan PTFE/MXene dengan komposisi MXene yang berbeza.

Seperti yang ditunjukkan dalam imej FESEM, peningkatan kandungan MXene menghasilkan pembentukan struktur seperti rod yang lebih jelas, menandakan kehadiran MXene yang lebih tinggi pada permukaan salutan. Namun demikian, jumlah penggunaan MXene perlu dikawal bagi mengelakkan penggumpalan zarah, kerana aglomerasi separa boleh menyebabkan gangguan pengagihan cas yang seragam dan seterusnya mengurangkan prestasi output elektrik peranti TENG yang dihasilkan (Neagoe et al. 2017). Kehadiran aglomerasi ini dapat di nilai melalui analisis taburan saiz zarah yang dijalankan menggunakan perisian ImageJ, seperti yang di bincangkan pada bahagian 4.3.3.

4.3.3 Ujian Taburan Saiz Zarah

Analisis taburan saiz zarah telah dijalankan melalui kaedah pintasan garis dengan mengambil bacaan sebanyak 120 saiz zarah dengan menggunakan perisian ImageJ. Keputusan analisis (Rajah 4.20) menunjukkan kesemua komposisi salutan komposit PTFE/MXene (0.01 wt%, 0.05 wt%, dan 0.1 wt%) mempunyai saiz zarah purata yang hampir sama, iaitu di antara 250 nm hingga 270 nm. Namun, perbezaan yang ketara dapat dilihat pada nilai sisihan piawai (SD) yang menunjukkan tahap keseragaman penyebaran zarah dalam salutan. Salutan komposit PTFE/Mxene 0.01 wt% dan 0.05 wt% menunjukkan nilai SD yang rendah iaitu masing sebanyak 0.148 pada 0.01 wt% dan 0.151 pada 0.05 wt%. Nilai SD yang rendah menandakan taburan saiz zarah yang sempit dan penyebaran yang lebih seragam semasa proses pembentukan salutan. Manakala, salutan 0.1 wt% menunjukkan nilai SD yang lebih tinggi iaitu pada 0.208 yang menandakan taburan saiz zarah yang lebih luas. Perkara ini berkemungkinan disebabkan oleh penggumpalan zarah pada penggunaan MXene yang berlebihan.



Rajah 4.20 Keputusan analisis taburan saiz zarah bagi komposit salutan PTFE/Mxene (a) 0.01wt%, (b) 0.05wt% dan (c) 0.1wt%

Tingkah laku aglomerasi ini berlaku apabila kandungan MXene yang berlebihan menyebabkan peningkatan daya tarikan antara zarah seperti daya tarikan *Van Der Waals* dan interaksi elektrostatik. Keadaan ini boleh mendorong zarah nano MXene untuk berinteraksi dengan rapat antara satu sama lain dan menggalakkan pergumpalan semasa proses pencampuran dengan larutan PTFE (Aleksandrova et al. 2024). Kepekatan MXene yang berlebihan boleh menyebabkan larutan matriks PTFE yang digunakan sebagai pelarut tidak mencukupi untuk menstabilkan dan menyebabkan penyebaran MXene tidak dapat berlaku secara homogen. Keadaan ini menyebabkan pembentukan pergumpalan MXene serta telah menghasilkan morfologi salutan yang tidak seragam selepas proses persinteran seperti yang ditunjukkan pada sampel 0.1wt%.

Namun, pada kepekatan MXene yang lebih rendah, zarah MXene dapat tersebar dengan lebih sekata dan bergabung dengan baik dalam larutan matriks PTFE, seterusnya menghasilkan permukaan salutan yang lebih licin dan seragam (Liu, Ying, et al. 2021). Dapatan ini selari dengan hasil analisis FESEM yang menunjukkan

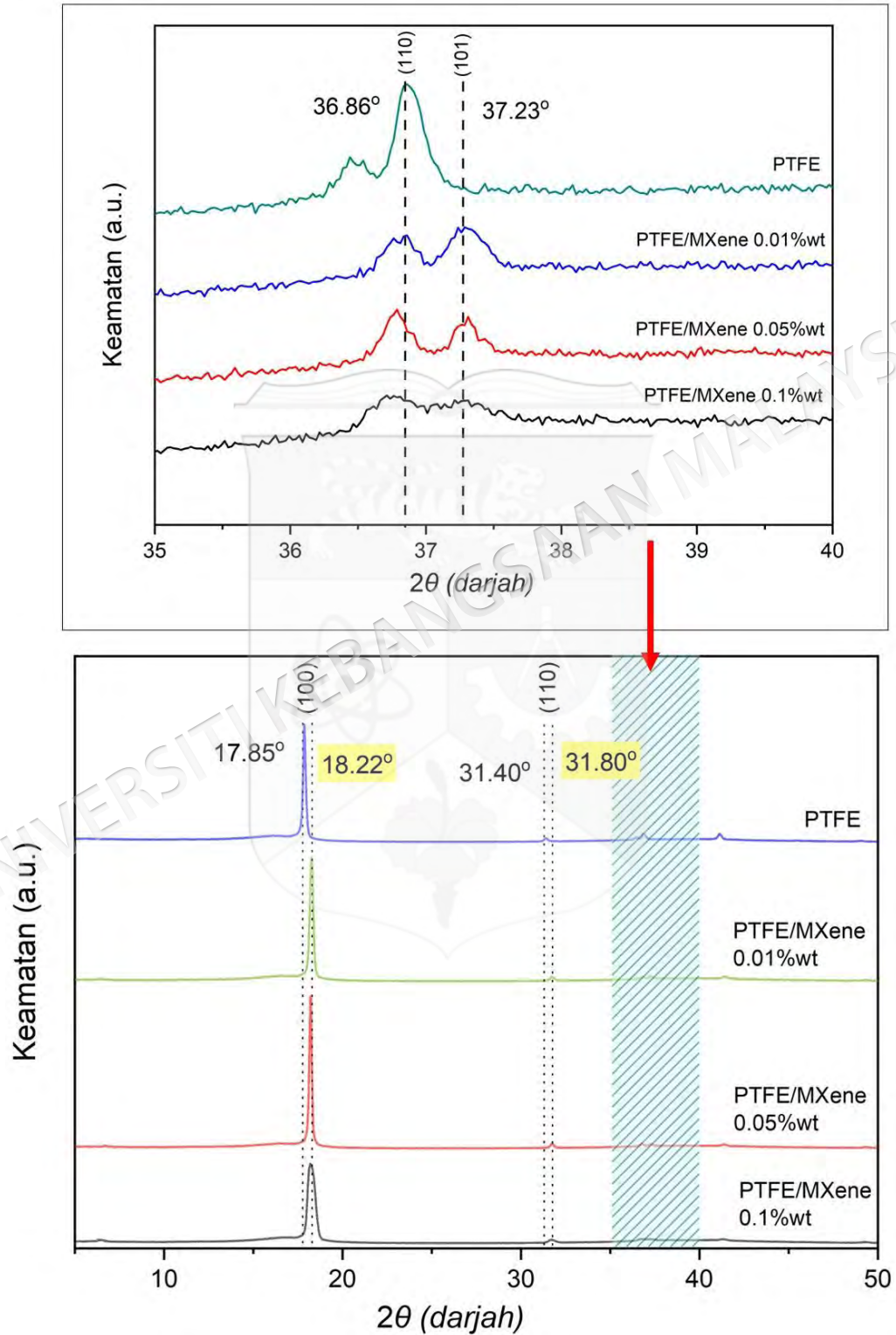
berlakunya separa pergumpalan pada salutan apabila kandungan MXene yang berlebihan digunakan. Oleh itu, ujian ini telah mengesahkan bahawa salutan dengan kepekatan 0.01 wt% telah mencapai tahap penyebaran zarah yang terbaik berbanding komposisi kandungan MXene yang lain. Selain itu, peningkatan dalam penggunaan MXene boleh menyebabkan berlakunya penggumpalan zarah akibat penyebaran MXene yang tidak sekata dalam larutan matriks PTFE. Struktur hablur salutan ini telah di uji dengan menggunakan pencirian XRD bagi mengenal pasti perubahan struktur hablur yang terdapat pada setiap komposisi MXene yang digunakan.

4.3.4 Ujian Pembelauan Sinar-X (XRD)

Ujian XRD telah dijalankan ke atas PTFE tanpa salutan dan salutan PTFE/MXene pada peranti TENG yang dihasilkan. Rajah 4.21 menunjukkan data XRD yang diperolehi daripada ujian pada permukaan salutan PTFE/MXene. Pencirian XRD ini telah dilakukan untuk melihat struktur hablur salutan PTFE/MXene yang terbentuk untuk setiap komposisi salutan yang dihasilkan. Struktur hablur pada salutan dapat ditentukan melalui spektrum XRD yang dihasilkan di mana setiap sudut (2θ darjah) mewakili sifat hablur yang tersendiri. Berdasarkan pencirian XRD yang dilakukan, enam puncak spektrum utama telah dikenal pasti pada 17.85° , 18.22° , 31.40° , 31.80° , 36.86° dan 37.23° yang mewakili ciri utama hablur yang dapat dikaitkan dengan fasa MXene dan PTFE dalam salutan komposit yang dihasilkan.

Puncak pertama dapat diperhatikan pada 37.23° , yang mewakili corak hablur TiO_2 yang terbentuk daripada MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$). Kehadiran TiO_2 ini berkemungkinan besar disebabkan oleh proses pengoksidaan separa (partial oxidation) yang berlaku pada MXene semasa ujian XRD dijalankan (Habib et al. 2019). Berdasarkan kedudukan puncak tersebut, ia dapat dikenal pasti sebagai satah rutil (101), yang lazimnya muncul dalam julat 36.1° hingga 37° (Qiao et al. 2022). Kehadiran puncak ini secara tidak langsung mengesahkan kewujudan MXene dalam salutan PTFE/MXene yang dihasilkan. Seterusnya, keputusan XRD menunjukkan bahawa peningkatan kandungan MXene menyebabkan penurunan keamatan puncak. Fenomena ini berlaku kerana hablur TiO_2 yang terbentuk mempunyai saiz zarah yang kecil dan menghasilkan tahap kehabluran yang lemah. Apabila kandungan MXene bertambah, jumlah zarah TiO_2 turut

meningkat, dan keadaan ini menyebabkan puncak XRD menjadi lebih lebar (*peak broadening*) serta keamatannya semakin menurun (Serafin et al. 2025).



Rajah 4.21 Ujian XRD yang dijalankan pada PTFE tanpa salutan dan salutan PTFE/MXene (0.01wt%, 0.05wt% dan 0.1wt%)

Sehubungan itu, terdapat juga puncak spektrum XRD yang dapat diperhatikan pada sekitar sudut 30° sehingga 40° . Pada PTFE tulen, dapat diperhatikan terdapat puncak spektrum pada sudut 31.4° . Namun, kehadiran MXene telah memberikan peralihan pada sudut spektrum yang lain yaitu pada sudut 31.8° apabila MXene digabungkan ke dalam matriks PTFE. Spektrum XRD yang terbentuk pada sudut 31.8° ini mewakili kehadiran hablur MXene pada satah patulan hablur (110 atau 100). Satah ini mewakili ciri susunan atom yang terdapat pada helaian MXene (Ghidiu et al. 2017). Peralihan daripada 31.4° ke 31.8° ini menunjukkan terdapatnya interaksi antara MXene dan PTFE dan dapatan ini selari dengan kajian terdahulu seperti yang dilaporkan dalam kajian Anasori et al. (2023). Pengurangan puncak keamatan ini dapat dikaitkan dengan perubahan pada struktur hablur MXene yang disebabkan oleh interaksi di antara PTFE dan MXene pada salutan yang dihasilkan. Fenomena ini berlaku disebabkan oleh zarah PTFE daripada larutan telah tersisip pada lapisan MXene dan menyebabkan perubahan jarak pada antara lapisan MXene seperti spektrum yang diperoleh pada PTFE/MXene 0.01wt%. Seterusnya, dapat diperhatikan juga kepekatan MXene yang semakin meningkat dalam salutan telah menyebabkan keamatan puncak pada sudut ini turut meningkat dan menjadi lebih lebar. Corak spektrum yang terhasil ini disebabkan peningkatan kandungan MXene dalam salutan serta berkemungkinan tinggi terdapat pembentukan pergumpalan MXene pada kepekatan yang lebih tinggi.

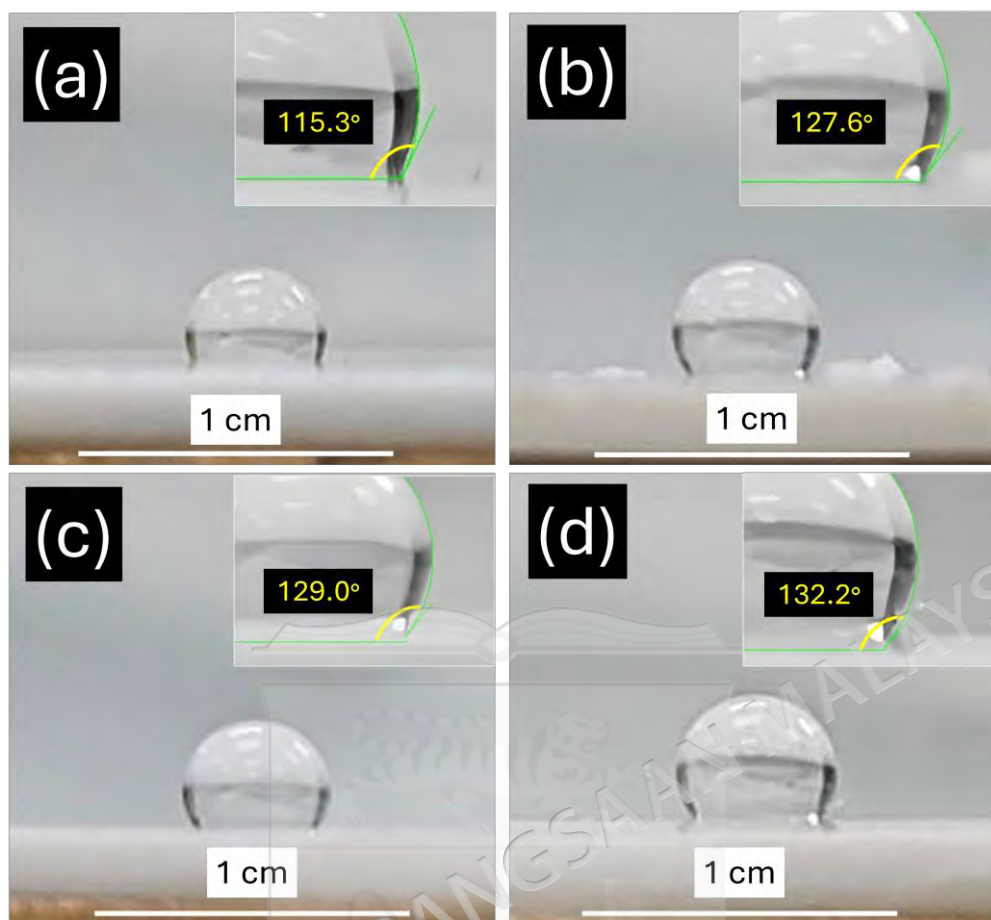
Akhir sekali, dapat diperhatikan terdapat puncak XRD yang ketara pada sudut 17.85° , yang menunjukkan ciri hablur PTFE yang terdapat pada sudut sekitar 17° dan 30° (Hao et al. 2018). Namun, kehadiran MXene dalam PTFE menyebabkan puncak hablur tersebut beralih kepada 18.22° bagi kesemua lapisan komposit PTFE/MXene yang dihasilkan. Peralihan ini menunjukkan bahawa penambahan MXene telah mengubah struktur hablur asal PTFE tulen dan membuktikan terdapat interaksi fizikal dan kimia antara kedua-dua bahan salutan yang digunakan. Selain itu, analisis XRD juga menunjukkan terdapat variasi keamatan puncak PTFE dengan komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza. Variasi dalam puncak keamatan ini disebabkan oleh setiap kandungan MXene yang digunakan mampu memberikan gangguan pada ciri hablur PTFE tulen. Penggunaan MXene yang berlebihan boleh menyebabkan pengurangan puncak keamatan pada sudut spektrum PTFE (18.22°) yang menunjukkan terdapat gangguan yang tinggi pada susunan struktur hablur PTFE tulen. Perubahan ini juga

selari dengan puncak pada 36.68° , di mana puncak tersebut mewakili spektrum hablur PTFE pada satah (110). Melalui puncak ini, dapat diperhatikan juga bahawa peningkatan penggunaan MXene menyebabkan keamatan spektrum semakin berkurang dan lebar spektru semakin meningkat.

Gangguan pada puncak ini berkemungkinan berpunca daripada interaksi antara zarah MXene dan rangkaian struktur molekul yang terdapat pada larutan PTFE. Penggunaan MXene yang lebih tinggi telah memberikan gangguan ini menjadi lebih ketara dan menghasilkan keamatan puncak yang lebih rendah, menandakan perubahan struktur yang lebih besar pada struktur hablur PTFE (Yuan, Han, et al. 2024). Penemuan ini adalah selaras dengan keputusan pencirian FTIR dan FESEM yang dibincangkan pada bahagian 4.3.1 dan 4.3.2. Dapatan tersebut menunjukkan terdapat penggabungan yang baik antara larutan PTFE dan zarah MXene dalam salutan peranti TENG yang dihasilkan serta membuktikan bahawa wujudnya interaksi yang kuat antara kedua-dua bahan tersebut. Salutan komposit yang dihasilkan ini bukan sahaja mengubah struktur hablur PTFE, malah turut menyumbang kepada peningkatan sifat keseluruhan peranti TENG, termasuk peningkatan hidrofobisiti permukaan serta prestasi penjanaan tenaga yang lebih tinggi.

4.3.5 Ujian Sudut Sentuhan

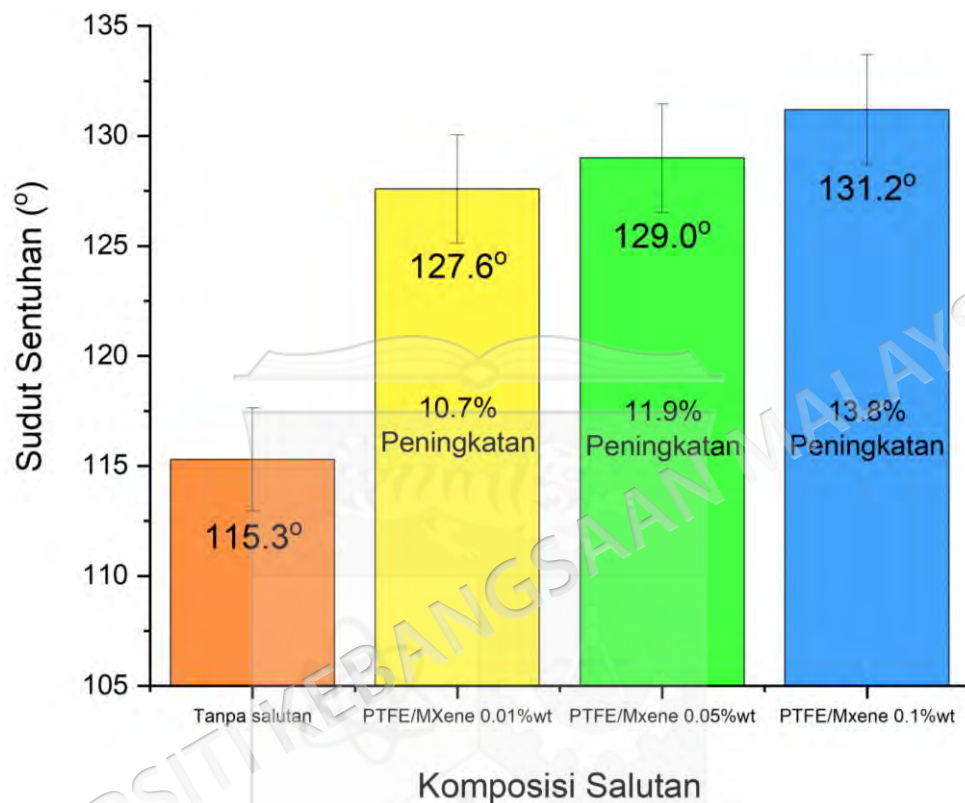
Ujian sudut sentuhan telah dijalankan bagi menguji sifat kebolehasahan titisan air pada permukaan sampel yang dihasilkan. Dalam aplikasi TENG, permukaan yang bersifat hidrofobik memainkan peranan yang penting dalam memberikan kadar sentuhan dan pemisahan yang lebih berkesan apabila titisan air berinteraksi pada permukaan peranti. Sifat hidrofobik dapat ditentukan melalui bacaan sudut sentuhan yang dihasilkan dimana permukaan hidrofobik mempunyai sudut sentuhan air di antara 90° sehingga 150° (Zhang & Xu 2021). Dalam kajian ini, sudut sentuhan telah di ukur dengan menggunakan perisian imageJ. Rajah 4.22 menunjukkan imej ujian sudut sentuhan yang telah dijalankan pada kesemua permukaan. Berdasarkan ukuran sudut sentuhan yang telah dilakukan, kesemua permukaan telah memperoleh permukaan yang bersifat hidrobik. Walau bagaimanapun, terdapat perbezaan pada bacaan sudut sentuhan yang telah dihasilkan.



Rajah 4.22 Ujian sudut sentuhan di mana (a) tanpa salutan, (b) PTFE/MXene 0.01%wt, (c) PTFE/MXene 0.05%wt dan (d) PTFE/MXene 0.1%wt

Rajah 4.23 menunjukkan carta bar menegak bagi sudut sentuhan melawan jenis salutan. Hasil pengukuran sudut sentuhan menunjukkan gabungan komposisi salutan PTFE/MXene 0.1%wt telah memberikan bacaan sudut sentuhan yang tertinggi iaitu sebanyak 131.2°, diikuti oleh salutan berkomposisi PTFE/MXene 0.05%wt dengan memperoleh bacaan sudut sentuhan setinggi 129.0°, dan salutan PTFE/MXene 0.01%wt telah memberikan bacaan sudut sentuhan pada 127.6°. Manakala, sampel PTFE tanpa salutan pula memberikan nilai sudut sentuhan yang terendah iaitu pada 115.3°. Berdasarkan keputusan yang diperoleh, dapat dilihat bahawa kehadiran salutan PTFE/MXene telah meningkatkan sifat hidrofobik pada permukaan peranti TENG yang dihasilkan. Fenomena peningkatan ini dapat dikaitkan dengan kehadiran salutan telah memberikan morfologi permukaan yang lebih kasar berbanding tanpa salutan. Morfologi permukaan ini dapat dilihat melalui imej FESEM yang telah diambil dan dibincangkan pada bahagian 4.3.2. Imej FESEM menunjukkan sampel yang bersalut PTFE/MXene mempunyai struktur permukaan yang berbutir dan berstruktur

berbanding PTFE tanpa salutan yang kelihatan lebih rata dan tidak berliang. Selain itu, imej juga menunjukkan komposisi salutan PTFE/MXene 0.1wt% mempunyai struktur yang lebih kasar berbanding komposisi salutan yang lain menyebabkannya mampu memperoleh bacaan sudut sentuhan yang tertinggi.

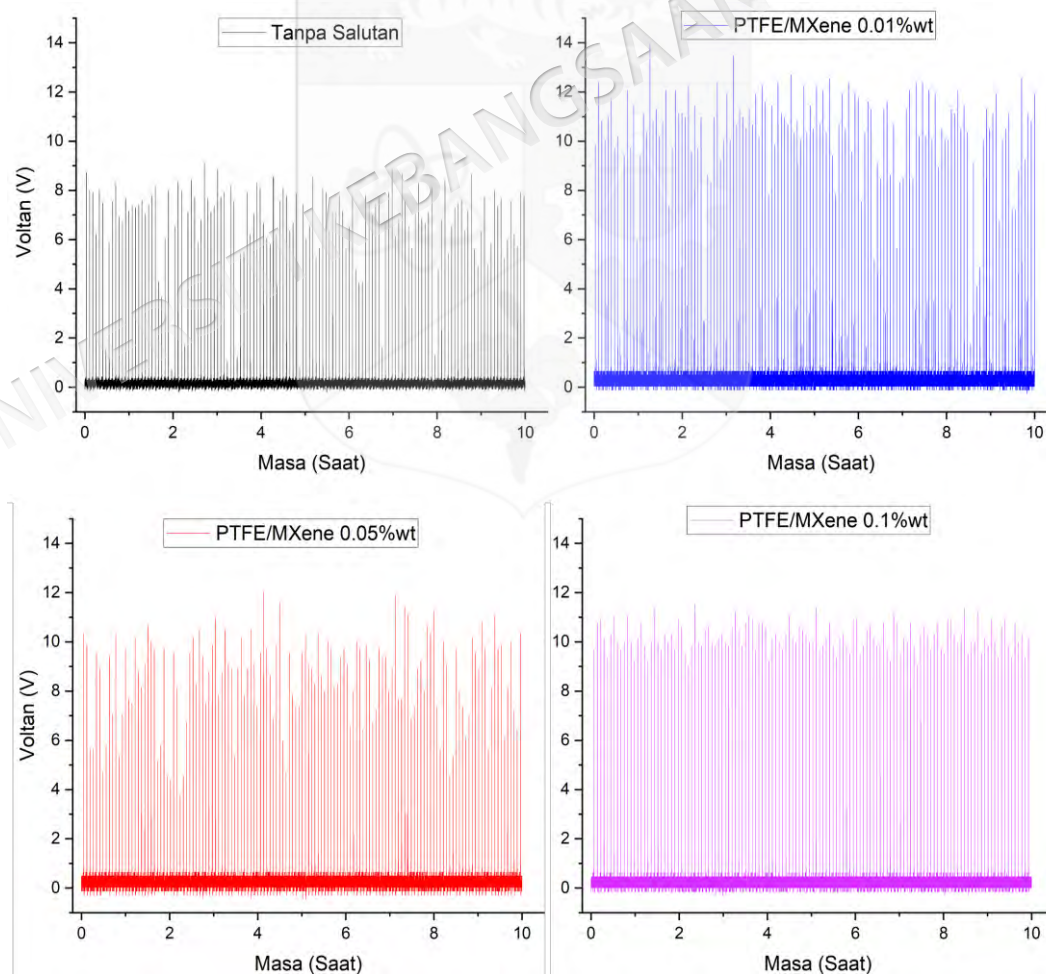


Rajah 4.23 Plot ujian sudut sentuhan bagi komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza

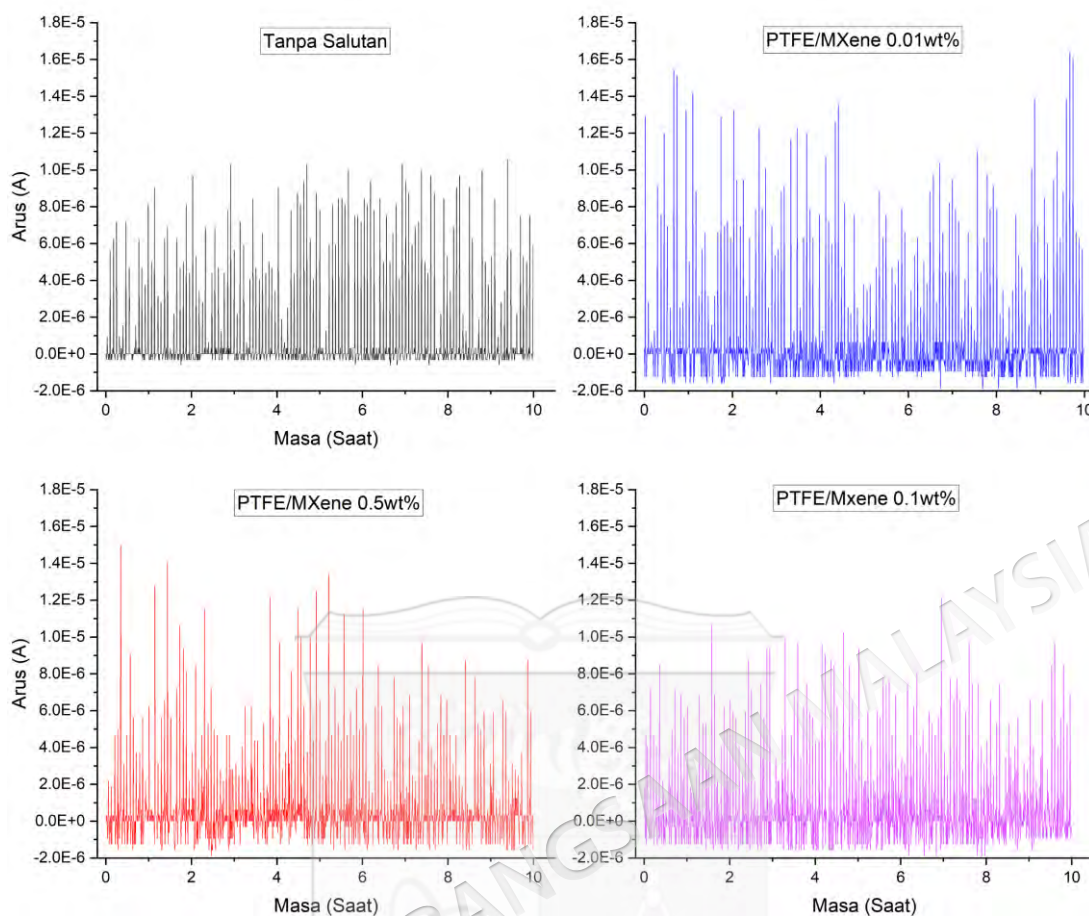
Struktur permukaan yang kasar boleh menyebabkan pengurangan kawasan sentuhan di antara titisan air dan permukaan peranti yang membawa kepada penurunan interaksi permukaan-cecair. Perkara ini berlaku disebabkan oleh titisan air tidak dapat berinteraksi sepenuhnya pada permukaan yang kasar mengakibatkan pembentukan poket udara berskala nano diantara liang-liang kekasaran. Poket udara yang terperangkap akan mengurangkan sifat lekatan permukaan dengan mengurangkan titik sentuhan di antara titisan air dan permukaan peranti. Fenomena ini akan menyebabkan penghasilan sudut sentuhan air yang lebih tinggi dan mengakibatkan sifat hidrofobik menjadi semakin meningkat (Tran et al. 2013). Walau bagaimanapun, sudut sentuhan yang terhasil daripada komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza tidak begitu ketara iaitu diantara 10% sehingga 14% sahaja yang disebabkan oleh peratusan perbezaan berat MXene yang digunakan tidak terlalu tinggi.

4.4 UJIAN TRIBO SALUTAN PTFE/MXENE PADA PERANTI TENG

Rajah 4.24 dan Rajah 4.25 menunjukkan keputusan penjaan voltan dan arus pada peranti triboelektrik tanpa salutan dan bersalutan PTFE/MXene dengan komposisi yang berbeza (0.01%wt, 0.05%wt, 0.1%wt). Berdasarkan keputusan yang diperoleh, ujian ini menunjukkan bahawa terdapat perbezaan yang ketara di antara peranti tanpa salutan dan peranti yang bersalut di mana peranti tanpa salutan hanya memperoleh purata voltan sebanyak 8.81 V dan purata arus sebanyak 11.6 μ A. Manakala, purata penjaan kuasa yang dapat dihasilkan pula ada sebanyak 1.68 μ W. Dengan kehadiran salutan PTFE/MXene, peningkatan kecekapan pada prestasi triboelektrik telah dapat diperhatikan di mana kesemua peranti TENG yang bersalut PTFE/MXene telah memperoleh purata penjaan voltan, arus dan kuasa yang lebih tinggi berbanding pranti tanpa salutan.



Rajah 4.24 Keputusan ujian penjaan voltan pada komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza (0.01%wt, 0.05%wt, 0.1%wt)



Rajah 4.25 Keputusan ujian penjanaan arus pada komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza (0.01wt, 0.05wt, 0.1wt)

Peningkatan penjanaan tenaga ini berlaku pada peranti bersalut PTFE/MXene disebabkan oleh bahan MXene mempunyai permukaan dan sifat elektrik yang unik membolehkannya membantu dalam meningkatkan kadar penjanaan tenaga pada peranti TENG yang telah dihasilkan (Wicklein et al. 2024). Kadar pengaliran elektrik yang tinggi pada bahan MXene dapat memberikan kadar pengangkutan cas yang lebih cekap diantara permukaan triboelektrik (PTFE) dan elektrod yang digunakan. Sehubungan itu, sifat ini juga dapat mengurangkan rintangan dalaman pada peranti dan secara langsung meningkatkan kecekapan penukaran tenaga (Xu, Wang, et al. 2022). MXene juga mempunyai ketumpatan cas yang tinggi menyebabkan ia mampu menyimpan tenaga elektrik yang lebih banyak. Penyimpanan tenaga elektrik memainkan peranan yang penting dalam TENG bagi menguatkan medan elektrik yang dihasilkan ketika proses pengasingan dan pemindahan cas apabilan dua bahan bersentuhan dan lepas. Medan elektrik yang kuat dapat membantu dalam menarik dan menahan cas yang lebih banyak

pada permukaan yang membawa kepada penjanaan tenaga yang lebih tinggi dalam peranti TENG.

Kumpulan berfungsi yang terdapat pada permukaan MXene ($-O$, $-OH$, dan $-F$) dapat memainkan peranan yang penting dalam meningkatkan prestasi triboelektrik dengan mempengaruhi dinamik pemindahan cas dan memudahkan pengumpulan cas. Kumpulan $-O$ dan $-OH$ berfungsi menarik serta menerima elektron, menyebabkan kadar pemindahan elektron menjadi lebih tinggi. Mekanisme ini membantu permukaan memperoleh cas negatif dengan lebih berkesan. Manakala, kumpulan $-F$ yang sangat elektronegatif, dan turut hadir dalam kedua-dua MXene serta PTFE, bertindak sebagai tapak perangkap cas yang stabil. Ia membantu mengekalkan cas pada permukaan dan mengurangkan kehilangan cas semasa proses triboelektrik berlaku. Oleh itu, kumpulan berfungsi yang hadir ini bertindak sebagai takungan cas, membolehkan pertukaran elektron yang cekap, meminimumkan pelepasan cas, dan meningkatkan kepekatan cas setempat, yang secara langsung akan meningkatkan output triboelektrik dan memberikan kadar penjanaan yang lebih stabil pada peranti triboelektrik (Wicklein et al. 2024).

Selain daripada ciri unik MXene ini, salutan PTFE/MXene yang dihasilkan juga telah mengubah struktur morfologi permukaan peranti TENG. Berdasarkan ujian FESEM yang dijalankan pada bahagian 4.3.2, dapat diperhatikan bahawa salutan yang dihasilkan telah memberikan permukaan yang lebih kasar berbanding permukaan tanpa salutan. Permukaan yang kasar ini dapat mempengaruhi kadar penjanaan peranti dengan meningkatkan kawasan sentuhan yang lebih besar apabila titisan air jatuh pada permukaan peranti TENG. Peningkatan kawasan sentuhan ini secara langsung telah meningkatkan kadar penjanaan cas dan memberikan penjanaan tenaga yang lebih tinggi (Salaudin et al. 2021).

Sehubungan itu, kehadiran salutan PTFE/MXene mampu mempengaruhi sifat hablur yang terdapat pada substrat PTFE. Perubahan struktur hablur ini dapat diperhatikan melalui ujian pencirian XRD dan FTIR yang telah dijalankan. Kehadiran MXene mengganggu susunan molekul dan tahap kehabluran pada rantai kimia PTFE tulen ($-CF_2-CF_2-$) yang lazimnya tersusun padat. Dalam PTFE tulen, rangkaian kimia

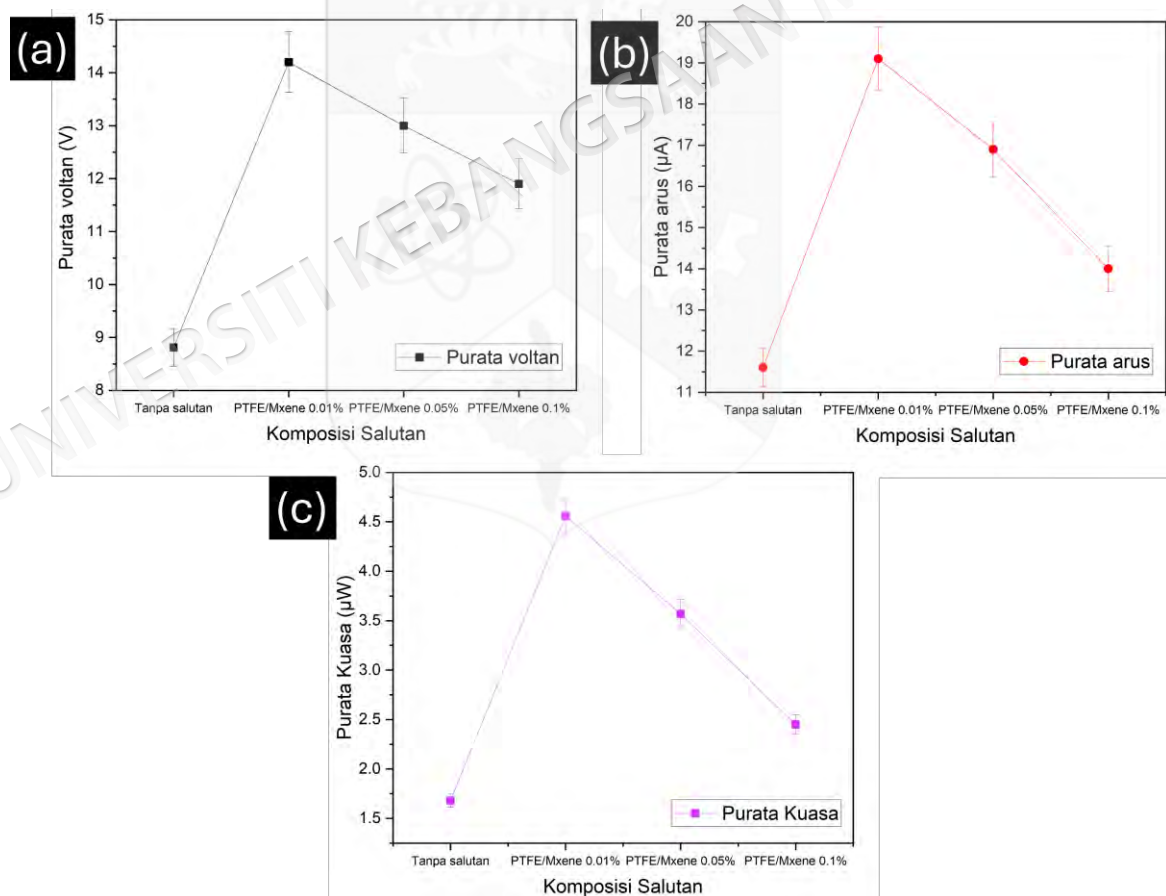
membentuk hablur *orthorhombic* yang mempunyai keupayaan tinggi dalam menarik elektron. Penambahan MXene mengganggu kawasan kehabluran ini dan menghasilkan kawasan amorfus dengan isipadu bebas yang lebih besar. Kawasan amorfus tersebut dapat menyediakan lebih banyak tapak perangkap cas, yang meningkatkan keupayaan bahan untuk menyimpan dan menstabilkan cas triboelektrik. Tapak perangkap cas ini juga membantu mengurangkan pelepasan cas secara pantas, seterusnya meningkatkan pengekalannya dan ketahanan cas pada permukaan. Selain itu, pengurangan kehabluran turut menyumbang kepada peningkatan polarisasi permukaan dan sifat dielektrik bahan. Gabungan kesan ini menghasilkan proses pemisahan dan pemindahan cas yang lebih efisien semasa sentuhan triboelektrik berlaku (Gao et al. 2021).

Walau bagaimanapun, penggunaan MXene sebagai salutan perlu dikawal bagi memperoleh kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih baik. Berdasarkan ujian yang dijalankan, setiap komposisi salutan yang dihasilkan telah memberikan kadar penjanaan yang berbeza. Dapat diperhatikan bahawa salutan PTFE/MXene 0.01wt% dapat memperoleh purata penjanaan voltan tertinggi berbanding komposisi salutan yang lain iaitu sebanyak 14.2V. Purata penjanaan voltan ini diikuti oleh salutan PTFE/MXene 0.05wt% dengan memperoleh purata sebanyak 13.0V dan salutan PTFE/MXene 0.1wt% sebanyak 11.9V. Berdasarkan corak purata voltan yang terdapat daripada salutan ini, ia menunjukkan bahawa semakin tinggi komposisi berat MXene yang digunakan dalam komposit salutan, semakin rendah purata penjanaan voltan yang telah dihasilkan.

Selain daripada voltan, purata penjanaan arus juga menunjukkan corak yang penjanaan sama dimana salutan PTFE/MXene 0.01wt% telah memperoleh purata arus tertinggi iaitu pada 19.1 μA . Prestasi penjanaan arus ini diikuti oleh salutan PTFE/MXene 0.05wt% dengan memperoleh purata arus sebanyak 16.9 μA , dan prestasi yang terendah adalah pada 14.0 μA yang diperoleh daripada salutan PTFE/MXene 0.1wt%. Sehubungan itu, salutan PTFE/MXene 0.01wt% juga telah menghasilkan purata penjanaan kuasa tertinggi iaitu pada 4.56 μW dan diikuti oleh PTFE/MXene 0.05wt% pada 3.57 μW . Manakala, PTFE/MXene 0.1wt% telah memperoleh purata penjanaan kuasa yang terendah iaitu pada 2.45 μW . Trend yang dihasilkan daripada dapatan ini menunjukkan peningkatan dalam kandungan MXene boleh menyebabkan

penurunan dalam prestasi penjanaan. Perkara ini berlaku apabila peningkatan kandungan MXene telah melebihi paras optimum seperti yang ditunjukkan pada komposisi 0.5wt% dan 0.1%.

Oleh itu, semakin tinggi komposisi MXene yang digunakan dalam larutan komposit salutan, semakin rendah prestasi penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan. Fenomena ini berkemungkinan berpunca daripada pengagregatan zarah MXene atau pembentukan laluan konduktif setempat yang telah mempercepatkan kehilangan cas ketika proses penjanaan dijalankan. Keadaan ini sejajar dengan dapatan kajian terdahulu seperti yang terdapat pada kajian Zhang, Tian, et al. (2021). Rajah 4.26 menunjukkan graf ambang salutan PTFE/MXene, manakala Jadual 4.5 merumuskan nilai purata voltan, arus, dan kuasa yang dijana bagi setiap komposisi salutan.



Rajah 4.26 Prestasi ambang bagi salutan PTFE/MXene: (a) Voltan, (b) Arus dan (c) Kuasa

Jadual 4.5 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza

Salutan	Purata voltan (V)	Purata arus (μ A)	Purata Kuasa (μ W)	Peningkatan (%)
Tanpa salutan	8.81	11.6	1.68	0
PTFE/Mxene 0.01%	14.2	19.1	4.56	171.43
PTFE/Mxene 0.05%	13.0	16.9	3.57	112.5
PTFE/Mxene 0.1%	11.9	14.0	2.45	45.83

Perbezaan kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa pada komposisi salutan PTFE/MXene yang berbeza dapat dikaitkan dengan beberapa faktor utama iaitu faktor interaksi bahan, morfologi permukaan, dan mekanisme pemindahan cas. Seperti yang diperhatikan pada komposisi salutan PTFE/MXene 0.01wt%, penyebaran MXene dapat berlaku dengan baik dan homogen di dalam larutan PTFE/MXene yang dihasilkan. Penyebaran yang baik ini dapat diperhatikan melalui imej FESEM, pencirian XRD dan FTIR yang dihasilkan. Penyebaran yang baik dapat membantu dalam meningkatkan kekasaran permukaan salutan yang dihasilkan dan secara langsung membantu dalam menghasilkan kadar pemindahan cas yang lebih baik apabila titisan air berinteraksi dengan salutan. Walau bagaimanapun, penggunaan MXene berlebihan boleh menyebabkan berlakunya pergumpalan bahan MXene di dalam larutan yang disebabkan oleh interaksi van der Waals daripada strukturnya yang berlapis seperti pada komposisi PTFE/MXene 0.1wt%. Pergumpalan bahan MXene boleh menyebabkan pengurangan kawasan sentuhan yang berkesan dan menyebabkan penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan menjadi berkurangan (Wang, Xu, et al. 2022). Dapatan ini selari dengan hasil analisis taburan saiz zarah seperti yang dibincangkan pada bahagian 4.3.3, yang menunjukkan bahawa salutan 0.1 wt% mempunyai nilai sisihan piawai (SD) yang lebih tinggi dan membuktikan terdapatnya penggumpalan zarah dalam lapisan salutan pada komposisi tersebut.

Peningkatan pada sifat kebolehbasaan pada permukaan juga dapat memberi kesan terhadap prestasi TENG, seperti yang dibincangkan melalui pengukuran sudut sentuhan pada bahagian 4.3.5. Salutan PTFE/MXene telah memberikan peningkatan pada ciri hidrofobik permukaan peranti. Keputusan menunjukkan permukaan yang bersalut memperoleh nilai sudut sentuhan yang lebih tinggi iaitu diantara 127.6° sehingga 131.2° berbanding permukaan PTFE tanpa salutan iaitu pada 115.3° .

Peningkatan pada sifat hidrofobik dapat memberikan kelebihan yang penting pada aplikasi TENG kerana ia dapat membantu memberikan proses pemisahan dan pemindahan cas yang lebih cekap ketika proses interaksi titisan air dengan permukaan peranti. Perkara ini dapat membantu dengan mengelakkan permukaan TENG daripada titisan air berkumpul atau melekat pada permukaan. Keadaan ini membolehkan pemindahan cas berlaku secara berterusan dan berkesan, yang seterusnya meningkatkan prestasi penjanaan tenaga berbanding peranti tanpa salutan (Wu et al. 2021). Walau bagaimanapun, perbezaan sifat hidrofobik diantara komposisi peranti bersalut adalah kurang daripada 4%, menunjukkan bahawa variasi dalam hidrofobisiti bukanlah faktor utama yang menentukan perbezaan prestasi antara komposisi salutan. Namun, perubahan yang diperhatikan dalam penjanaan voltan, arus, dan kuasa lebih banyak dipengaruhi oleh tahap penyebaran MXene, tahap pergumpalan zarah, serta pembentukan laluan konduktif setempat yang secara langsung memberi kesan kepada kecekapan pemindahan dan pengekalan cas.

Selain itu, sifat pengaliran elektrik yang tinggi pada MXene juga mampu mempengaruhi prestasi penjanaan ini. Penggunaan MXene dengan jumlah yang bersesuaian mampu meningkatkan kadar pengekalan serta pemindahan cas dalam peranti TENG dan seterusnya meningkatkan output tenaga yang dihasilkan. Sebaliknya, penggunaan MXene yang berlebihan boleh meningkatkan kekonduksian permukaan, yang mendorong pelepasan cas lebih awal dan mengurangkan kecekapan pengumpulan tenaga. Keadaan ini turut menjejaskan proses pemindahan cas serta menurunkan kadar penjanaan tenaga keseluruhan (Nam et al. 2020). Berdasarkan keputusan penjanaan yang diperolehi, salutan PTFE/MXene 0.01wt% telah memberikan peningkatan yang tertinggi berbanding komposisi yang lain. Namun, penggunaan MXene yang semakin meningkat seperti pada komposisi 0.05wt% dan 0.1wt% telah menyebabkan pengurangan penjanaan voltan, arus dan kuasa yang disebabkan oleh fenomena pengumpulan cas ini.

Sehubungan itu, penggunaan MXene yang berlebihan juga boleh menyebabkan gangguan pada sifat hablur semula jadi PTFE yang memainkan peranan penting dalam penyimpanan dan penahanan tenaga. Gangguan struktur hablur yang sedikit pada PTFE mampu meningkatkan lebih banyak kawasan penangkapan cas dan dapat membantu

dalam memberikan prestasi penyimpanan cas yang lebih baik untuk meningkatkan kadar penjanaan tenaga seperti yang terdapat pada PTFE/MXene 0.01wt%. Namun, gangguan berlebihan terhadap struktur hablur semula jadi PTFE boleh mengurangkan keupayaan bahan untuk menyimpan dan mengekalkan cas, seterusnya menyebabkan kecekapan penjanaan tenaga menjadi semakin berkurangan (Gao et al. 2021). Keadaan ini berlaku kerana MXene berlebihan boleh menyebabkan rangkaian PTFE menjadi tidak teratur, menjadikan elektron mudah terlepas dan mengurangkan jumlah cas yang terperangkap. Gangguan struktur hablur yang signifikan dapat diperhatikan daripada komposisi PTFE/MXene 0.1wt% melalui keputusan XRD dan FITR yang telah dijalankan.

Akhir sekali, perbezaan penjanaan tenaga pada komposisi salutan yang bebeza adalah disebabkan adalah faktor keseimbangan di antara sifat pengaliran dan penebat elektrik yang terdapat pada peranti TENG yang dihasilkan. Penggunaan MXene pada kadar yang mencukupi dapat mencapai keseimbangan yang sesuai, yang membolehkan penjanaan dan penyimpanan cas berlaku dengan lebih efisien pada peranti yang dihasilkan. Namun, penggunaan MXene yang berlebihan boleh menyebabkan peranti ini memperoleh sifat pengaliran yang tinggi dan mengganggu sifat penebat yang diperlukan untuk proses pengumpulan dan pemindahan cas yang lebih cekap (Yang 2024). Keputusan yang diperoleh menunjukkan 0.01wt% merupakan komposisi yang terbaik berbanding komposisi yang lain (0.05wt% dan 0.1wt%) kerana ia mampu memperoleh kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang paling tinggi berbanding yang lain. Walaupun terdapat pengurang penjanaan voltan, arus dan kuasa pada komposisi salutan lain yang digunakan iaitu pada 0.5wt%, dan 0.1wt%, tetapi peranti TENG bersalut ini masih memperoleh kadar penjanaan yang lebih baik berbanding peranti tanpa salutan. Oleh itu, hasil kajian menunjukkan penggunaan salutan PTFE/MXene mampu mempertingkatkan prestasi penjanaan voltan, arus, dan kuasa peranti TENG yang dihasilkan. Namun, pengawalan penggunaan MXene dalam salutan perlu dikawal kerana ia dapat mempengaruhi kecekapan kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan.

4.5 RUMUSAN

Dapatan kajian ini menunjukkan konfigurasi elektrod pada peranti TENG, pemilihan bahan elektrod, saiz elektrod dan ketebalan substrat PTFE dapat memberikan pengaruh yang ketara dalam prestasi penjanaan voltan, arus dan kuasa pada peranti yang dihasilkan. Keputusan menunjukkan bahawa konfigurasi secara sandwich dengan kombinasi elektrod Al–Cu, saiz elektrod positif 2 mm, serta substrat PTFE berketebalan 1 mm memberikan prestasi terbaik berbanding parameter lain. Parameter ini berjaya menghasilkan 8.81 V (purata voltan), 11.6 μ A (purata arus), dan 1.68 μ W (purata kuasa), menjadikannya reka bentuk yang paling berkesan dalam mencapai prestasi penjanaan tertinggi. Prestasi peranti TENG dengan parameter terbaik ini kemudiannya telah di uji dengan salutan PTFE/MXene. Dapatan daripada kajian menunjukkan kehadiran salutan PTFE/MXene dapat memberikan pengaruh yang ketara dalam penjanaan tenaga pada peranti TENG yang dihasilkan. Kesemua komposisi salutan PTFE/MXene yang digunakan telah memberikan prestasi penjanaan yang lebih tinggi berbanding tanpa salutan. Namun, komposisi salutan 0.01wt% telah menunjukkan kadar peningkatan tertinggi berbanding komposisi yang lain dengan memperoleh purata penjanaan sebanyak 14.2 V (purata voltan), 19.1 μ A (purata arus), dan 4.56 μ W (purata kuasa). Secara keseluruhan daripada bahagian ini, dapat diperhatikan bahawa pengawalan parameter dalam pembuatan peranti dapat mempengaruhi prestasi penjanaan dengan ketara dan pemilihan kaedah fabrikasi yang bersesuaian dapat memberikan prestasi penjanaan yang lebih cekap. Seterusnya, penggunaan MXene sebagai salutan juga dapat membantu dalam peningkatan kadar penjanaan tenaga. Namun, penggunaan MXene dalam salutan perlu dikawal bagi memperoleh prestasi penjanaan tenaga yang lebih efisien. Oleh itu, dapatan ini menunjukkan objektif kajian pertama telah tercapai iaitu menilai kesan campuran salutan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dan Mxene pada substrat PTFE dalam penghasilan penjanaan voltan, arus dan kuasa.

BAB V

FABRIKASI STRUKTUR BIOMIMETIK PADA PERANTI TENG DAN FABRIKASI STRUKTUR MIKRO BERSALUT PTFE/MXENE SERTA UJIAN TERHADAP MEDIUM AIR YANG BEBEZA

5.1 PENDAHULUAN

Bab ini mengkaji mengenai struktur biomimetik yang ingin dihasilkan pada permukaan peranti TENG. Teori peningkatan luas permukaan dengan kehadiran struktur mikro telah dinilai melalui mengiraan luas permukaan bagi memperoleh bacaan luas permukaan yang terhasil. Terdapat jenis tiga luas permukaan yang telah di kira iaitu luas tanpa struktur, permukaan struktur alur dan permukaan struktur tiang mikro. Pengiraan luas permukaan ini telah dibincangkan pada bahagian 5.2. Struktur mikro telah dihasilkan melalui kaedah pemesinan mikro dan morfologinya telah di analisis menggunakan mikroskop. Analisis mikroskop morfologi pemesinan mikro telah di bincangkan pada bahagian 5.3. Selain itu, pengukuran sudut sentuhan juga telah dilakukan bagi melihat pengaruh struktur mikro terhadap sifat kebolehbasaan. Hasil daripada pengukuran ini telah diperincikan pada bahagian 5.4. Pengukuran purata penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap struktur mikro biomimetik yang berbeza juga telah dilakukan. Hasil ujian penjanaan tenaga ini akan diterangkan pada bahagian 5.5. Manakala, bahagian 5.6 telah menerangkan hasil ujian penggabungan struktur mikro dan salutan PTFE/MXene yang dihasilkan pada permukaan peranti TENG. Peranti dengan gabungan struktur mikro dan salutan PTFE/MXene kemudiannya telah di uji dengan empat medium air yang berbeza. Hasil ujian terhadap empat medium air ini telah di perincikan pada bahagian 5.7. Akhir sekali, bahagian 5.8 membincangkan mengenai rumusan yang diperoleh daripada bab ini.

5.2 TEORI LUAS PERMUKAAN DUA STRUKTUR BIOMIMETIK

Kehadiran struktur mikro biomimetik pada permukaan dapat membantu dalam meningkatkan prestasi penjaan tenaga pada peranti TENG yang disebabkan oleh peningkatan luas permukaan. Peningkatan luas permukaan dapat memberikan kadar interaksi yang lebih tinggi apabila titisan air berinteraksi dengan permukaan peranti TENG. Kadar interaksi yang dipertingkatkan ini dapat memberikan kadar pemindahan cas yang lebih banyak dan membantu dalam penjaan tenaga. Dalam kajian ini, terdapat dua struktur biomimetik yang telah dihasilkan iaitu struktur mikro alur dan struktur tiang mikro. Kedua struktur ini merupakan struktur yang di inspirasi daripada alam semula jadi. Struktur alur merupakan struktur yang di inspirasi daripada permukaan daun padi. Terdapat kajian lepas yang telah menyatakan bahawa struktur ini mampu memberikan peningkatan pada luas permukaan (Barraza et al. 2022). Selain itu, struktur hierarki seperti tiang mikro juga merupakan struktur yang di inspirasikan daripada alam semula jadi seperti yang terdapat pada serangga. Kajian Xiu et al. (2006) dan Chen et al. (2023) juga telah mendapati bahawa struktur ini mampu memberikan peningkatan pada luas permukaan. Peningkatan luas permukaan dengan kehadiran struktur mikro ini telah di buktikan melalui pengiraan dan perbandingan dengan permukaan yang tidak berstruktur. Kajian ini telah menggunakan parameter ketebalan, jarak, lebar dan ketinggian yang sama untuk kedua-dua struktur mikro biomimetik yang telah di hasilkan.

5.2.1 Pengiraan Luas Permukaan Tanpa Struktur (LPTS)

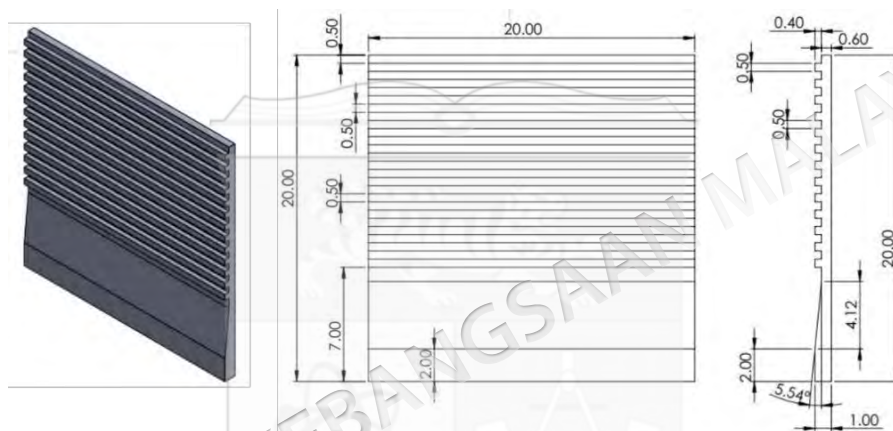
Sampel PTFE yang digunakan dalam kajian sebagai substrat berukuran 20 mm panjang × 20 mm lebar. Tanpa sebarang struktur, luas permukaan peranti ini telah di kira seperti berikut:

$$\begin{aligned} LTPS &= \text{Panjang} \times \text{Lebar} \\ &= 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \\ &= 400 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengiraan, luas permukaan yang diperoleh tanpa sebarang struktur adalah seluas 400 mm².

5.2.2 Pengiraan Luas Permukaan Dengan Struktur Alur (LPSA)

Seterusnya, pengiraan luas permukaan alur (Rajah 5.1) merangkumi beberapa langkah iaitu pengiraan bilangan alur, pengiraan luas permukaan alur, pengiraan jumlah luas permukaan yang dimesin dan pengiraan jumlah keseluruhan luas permukaan. Parameter yang telah digunakan dalam pengiraan struktur alur ini ialah lebar alur (w) 0.5 mm, kedalaman alur (d) 0.4 mm, panjang alur (l) 20 mm, jarak diantara alur (s) 0.5 mm, luas kawasan permukaan yang di mesin (260 mm^2), dan yang tidak di mesin (140 mm^2). Kawasan yang di mesin berukuran 20 mm (lebar) $\times$ 13 mm (tinggi) pada substrat PTFE yang berukuran 20 mm (lebar) $\times$ 20 mm (tinggi).



Rajah 5.1 Reka bentuk struktur alur

1. Pengiraan jumlah alur (N):

$$N = \frac{\text{Jumlah lebar}}{w + s}$$

$$= \frac{13 \text{ mm}}{0.5 + 0.5 \text{ mm}}$$

$$\approx 13$$

2. Jumlah luas permukaan untuk satu alur:

$$\text{Luas bahagian atas satu alur atau } A_{\text{atas}} = l \times w$$

$$20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} = 10 \text{ mm}^2$$

$$\text{Kawasan dinding sisi satu alur: } 2 \times (l \times d) = 2 \times (20 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm})$$

$$= 16 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jumlah keluasan setiap alur} = 10 \text{ mm}^2 + 16 \text{ mm}^2$$

$$= 26 \text{ mm}^2$$

3. Jumlah luas permukaan di mesin (DM):

$$\text{Jumlah luas permukaan 13 alur} = 26 \text{ mm}^2 \times 13 = 338 \text{ mm}^2$$

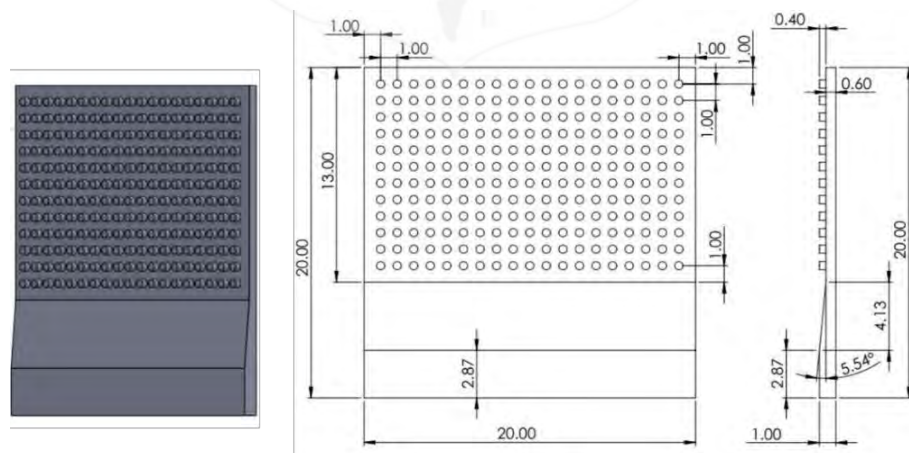
4. Jumlah luas keseluruhan luas permukaan bagi struktur beralur:

$$\begin{aligned} A_{\text{jumlah keseluruhan luas permukaan}} &= A_{\text{jumlah permukaan (DM)}} + A_{\text{tidak dimesin}} \\ &= 338 \text{ mm}^2 + (7 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}) \\ &= 478 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Hasil pengiraan menunjukkan, luas permukaan yang diperoleh daripada kehadiran struktur alur pada permukaan adalah seluas 478 mm².

5.2.3 Pengiraan Luas Permukaan Dengan Struktur Tiang Mikro (LPTA)

Manakala, pengiraan luas permukaan tiang mikro (Rajah 5.2) merangkumi beberapa langkah juga iaitu pengiraan bilangan tiang mikro, pengiraan luas permukaan yang terdapat pada satu tiang mikro, pengiraan jumlah luas permukaan keseluruhan tiang mikro, pengiraan keluasan tapak permukaan, pengiraan luas permukaan yang di mesin dan pengiraan keseluruhan permukaan. Parameter yang digunakan dalam pengiraan struktur mikro ini ialah diameter tiang mikro (r) 0.25 mm, kedalaman struktur (d) 0.4 mm, jarak antara tiang mikro (s) 0.5, luas kawasa permukaan yang telah di mesin (260 mm²) dan luas kawasan permukaan yang tidak dimesin (140 mm²). Kawasan yang di mesin berukuran 20 mm (lebar) × 13 mm (tinggi) pada substrat PTFE yang berukuran 20 mm (lebar) × 20 mm (tinggi).



Rajah 5.2 Reka bentuk struktur tiang mikro

1. Pengiraan jumlah tiang mikro yang dapat dihasilkan pada 20 mm lebar $\times$ 13 mm tinggi (N) :

$$\begin{aligned} N_{Jumlah} &= N_x \times N_y \\ &= 19 \times 12 = 228 \text{ tiang mikro} \end{aligned}$$

2. Luas permukaan bagi 1 tiang mikro:

- I. Kawasan permukaan sisi (sisi tiang mikro):

$$\begin{aligned} A_{sisi} &= 2\pi rh \\ &= 2\pi(0.25)(0.4) \\ &= 0.628 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- II. Kawasan Permukaan atas tiang mikro:

$$\begin{aligned} A_{atas} &= \pi r^2 \\ &= \pi(0.25)^2 \\ &= 0.196 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- III. Jumlah luas permukaan satu tiang mikro:

$$\begin{aligned} A_{Luas \text{ tiang nano}} &= A_{sisi} + A_{atas} \\ &= 0.628 \text{ mm}^2 + 0.196 \text{ mm}^2 \\ &= 0.825 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

3. Jumlah luas permukaan untuk kesemua tiang mikro yang dihasilkan (TM) :

$$\begin{aligned} A_{Jumlah \text{ luas permukaan (TM)}} &= N_{Jumlah} \times A_{Luas \text{ tiang nano}} \\ &= 228 \times 0.825 \text{ mm}^2 \\ &= 188.1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

4. Jumlah luas permukaan untuk pemesinan tiang mikro:

$$\begin{aligned} A_{Luas \text{ tapak}} &= \text{Lebar} \times \text{tinggi} \\ &= 20 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \\ &= 260 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

5. Jumlah luas permukaan kawasan yang di mesin (DM):

$$\begin{aligned} A_{\text{Jumlah luas permukaan (DM)}} &= A_{\text{Jumlah luas permukaan (TM)}} + A_{\text{Luas tapak}} \\ &= 188.1 \text{ mm}^2 + 260 \text{ mm}^2 \\ &= 448.1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

6. Jumlah luas keseluruhan luas permukaan bagi struktur tiang mikro:

$$\begin{aligned} A_{\text{Jumlah keseluruhan luas permukaan}} &= A_{\text{luas permukaan (DM)}} + A_{\text{tidak dimesin}} \\ &= 448.1 \text{ mm}^2 + (7 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}) \\ &= 588.1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Hasil pengiraan menunjukkan, luas permukaan yang diperoleh daripada kehadiran struktur tiang mikro pada permukaan adalah seluas 588.1 mm².

5.2.4 Perbandingan Teori Perbezaan Luas Permukaan Struktur Biomimetik Yang Dihasilkan

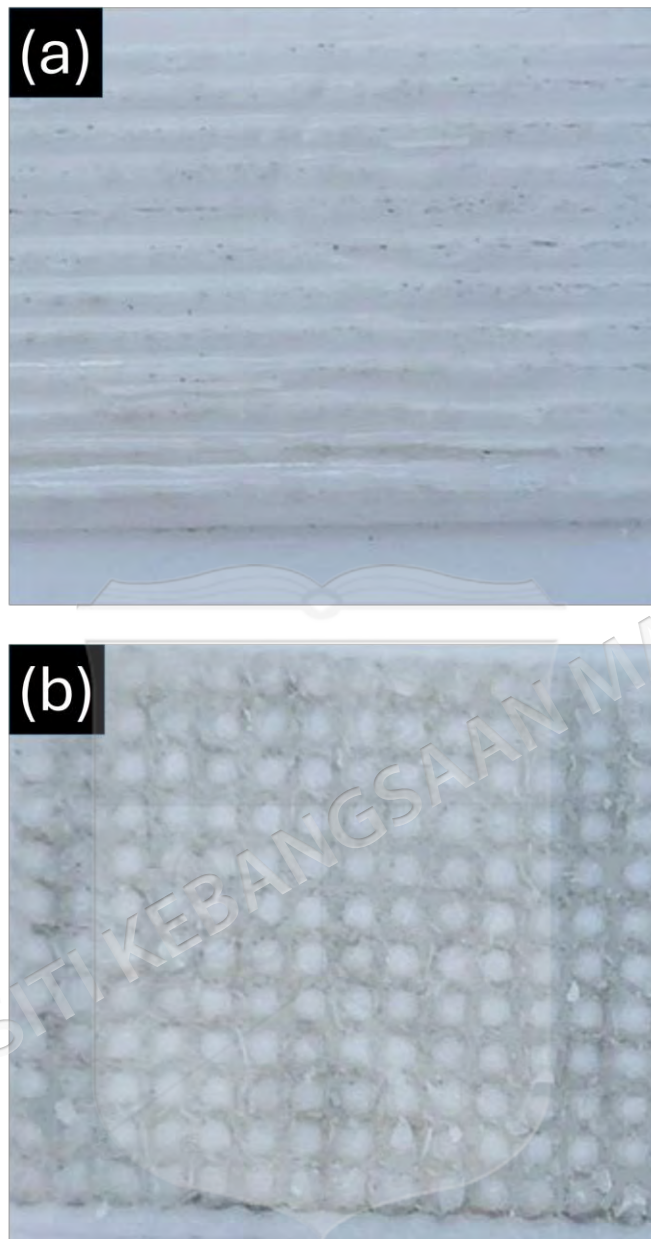
Berdasarkan hasil pengiraan daripada luas permukaan struktur biomimetik yang direka bentuk. Secara teorinya, struktur mikro ini mampu memberikan peningkatan pada luas permukaan yang dihasilkan. Fenomena telah dapat dibuktikan melalui pengiraan yang dilakukan pada bahagian 5.2.1, bahagian 5.2.2 dan bahagian 5.2.3. Rajah 5.3 menunjukkan carta bar menegak bagi keputusan pengiraan luas permukaan yang dihasilkan. Keputusan pengiraan menunjukkan terdapat perbezaan yang ketara pada luas permukaan dengan kehadiran struktur mikro. Tanpa struktur, kadar luas permukaan hanya dapat diperolehi pada 400 mm². Namun, kehadiran struktur mikro telah memberikan peningkatan luas permukaan seperti yang terdapat pada struktur alur. Kehadiran struktur alur telah memberikan kadar peningkatan luas permukaan sebanyak 19.50% berbanding permukaan tanpa struktur dengan memperoleh luas permukaan sebanyak 478 mm². Manakala, struktur hierarki tiang mikro pula telah memperoleh luas permukaan yang lebih tinggi berbanding permukaan struktur alur di mana ia telah memperoleh luas permukaan sebanyak 588.1 mm². Struktur tiang mikro juga telah memberikan peningkatan luas permukaan sebanyak 47.03% berbanding permukaan yang tidak berstruktur. Dapatan ini menunjukkan struktur mikro biomimetik yang ingin dihasilkan ini mampu memberikan peningkatan pada luas permukaan. Keputusan ini selari dengan kajian lepas yang menyatakan bahawa struktur mikro mampu meningkatkan luas sesuatu permukaan (Peng et al. 2021).



Rajah 5.3 Keputusan pengiraan luas permukaan terhadap struktur biomimetik yang berbeza

5.3 STRUKTUR MORFOLOGI PERMESINAN MIKRO

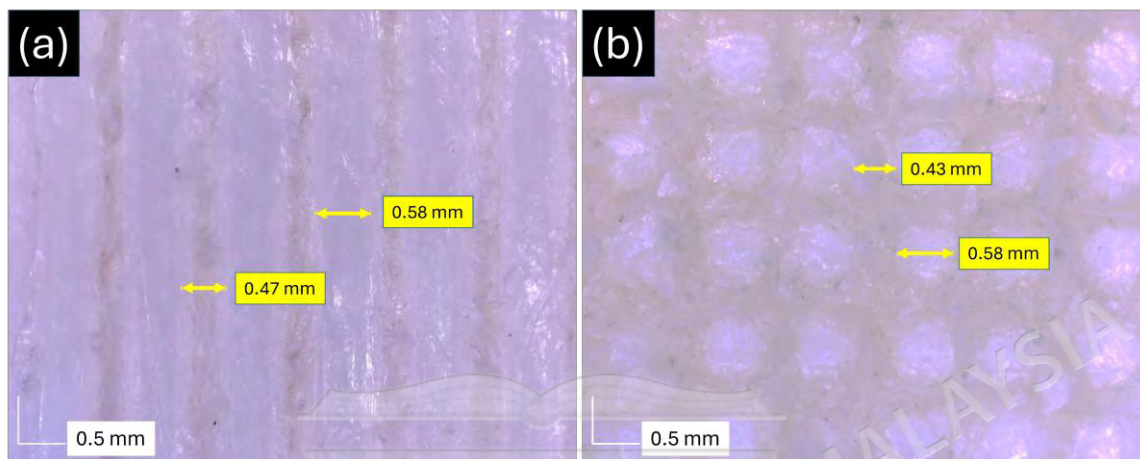
Berdasarkan reka bentuk struktur mikro yang dihasilkan pada bahagian 5.2, pemesinan mikro telah dilakukan pada permukaan substrat PTFE dengan menggunakan kaedah pemesinan CNC dengan parameter kadar suapan pada 200 rpm dan kadar gelendong pada 5000 rpm. Selain itu, pemotong endmill yang digunakan dalam kajian ini adalah berjenis segi empat sama dengan diameter 0.5 mm. Kedua-dua struktur mikro yang dihasilkan ini telah menggunakan diameter pemotongan yang sama bagi memperoleh tahap kekasaran yang selari. Rajah 5.4 menunjukkan hasil daripada pemesinan CNC yang dilakukan untuk memperoleh struktur mikro biomimetik. Dapatan daripada imej ini menunjukkan struktur mikro biomimetik telah berjaya dihasilkan dengan baik. Namun, terdapat sedikit bur iaitu serpihan kecil bahan, yang dapat diperhatikan pada kedua-dua struktur yang dihasilkan. Struktur morfologi ini telah diselidik dengan lebih terperinci menggunakan mikroskop berjenama Dino-Lite Digital Mikroskop dengan kadar pembesaran setinggi 50x.



Rajah 5.4 Imej struktur biomimetik yang telah dihasilkan pada permukaan PTFE (a) struktur alur dan (b) struktur tiang mikro dengan menggunakan kaedah CNC

Rajah 5.5 menunjukkan struktur morfologi yang terperinci dan lebih jelas pada permukaan struktur mikro yang dihasilkan dengan kadar pembesaran 50x. Imej yang diambil juga telah menjalani proses pengukuran dengan menggunakan persisian DinoCapture yang terdapat pada mikroskop. Pengukuran diambil bagi membandingkan struktur reka bentuk dan struktur pemesinan yang sebenar. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan pada struktur mikro, dapat di perhatikan bahawa kaedah CNC mampu

menghasilkan struktur yang berketepatan tinggi pada kedua-dua reka bentuk. Hasil pengukuran menunjukkan struktur mikro yang di mesin mempunyai saiz yang berdekatan dengan reka bentuk model yang dihasilkan.



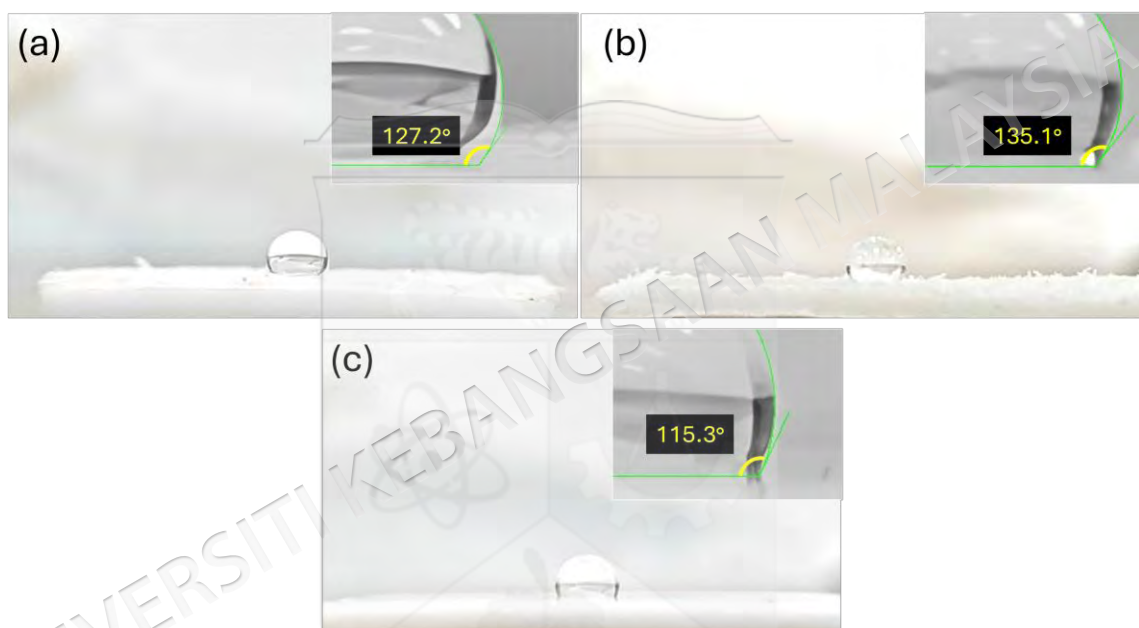
Rajah 5.5 Imej struktur biomimetik pada kadar pembesaran 50x (a) struktur alur dan (b) struktur tiang mikro

Struktur alur yang di mesin telah memperoleh anggaran panjang alur pada 0.47 mm dan jarak diantara alur pada 0.58 mm iaitu ukuranya berdekatan dengan reka bentuk model yang dihasilkan iaitu berukuran panjang alur 0.5 mm dan jarak antara alur pada 0.5 mm. Manakala, struktur tiang mikro juga telah memperoleh ukuran jarak yang berdekatan dengan reka bentuk dimana struktur yang di mesin mempunyai jarak di antara dua tiang mikro pada 0.43 mm dan diameter tiang mikro pada 0.58 mm berbanding reka bentuk model yang mempunyai jarak di antara dua tiang mikro pada 0.50 mm dan diameter tiang mikro pada 0.50 mm. Keputusan ini menunjukkan bahawa kaedah CNC telah berjaya menghasilkan struktur mikro biomimetik dengan baik. Perkara ini membuktikan bahawa kaedah ini mampu menghasilkan struktur mikro yang berketepatan tinggi. Kehadiran struktur mikro ini mampu mempengaruhi sifat pada sesuatu permukaan seperti sifat kebolehbasahan dan kadar penjanaan tenaga.

5.4 UJIAN SUDUT SENTUHAN

Pencirian sifat kebolehbasahan telah dijalankan pada permukaan yang telah diukir dengan struktur mikro biomimetik bagi melihat ciri hirofobik yang terhasil pada permukaan. Permukaan yang bersifat hidrofobik dapat memainkan peranan yang

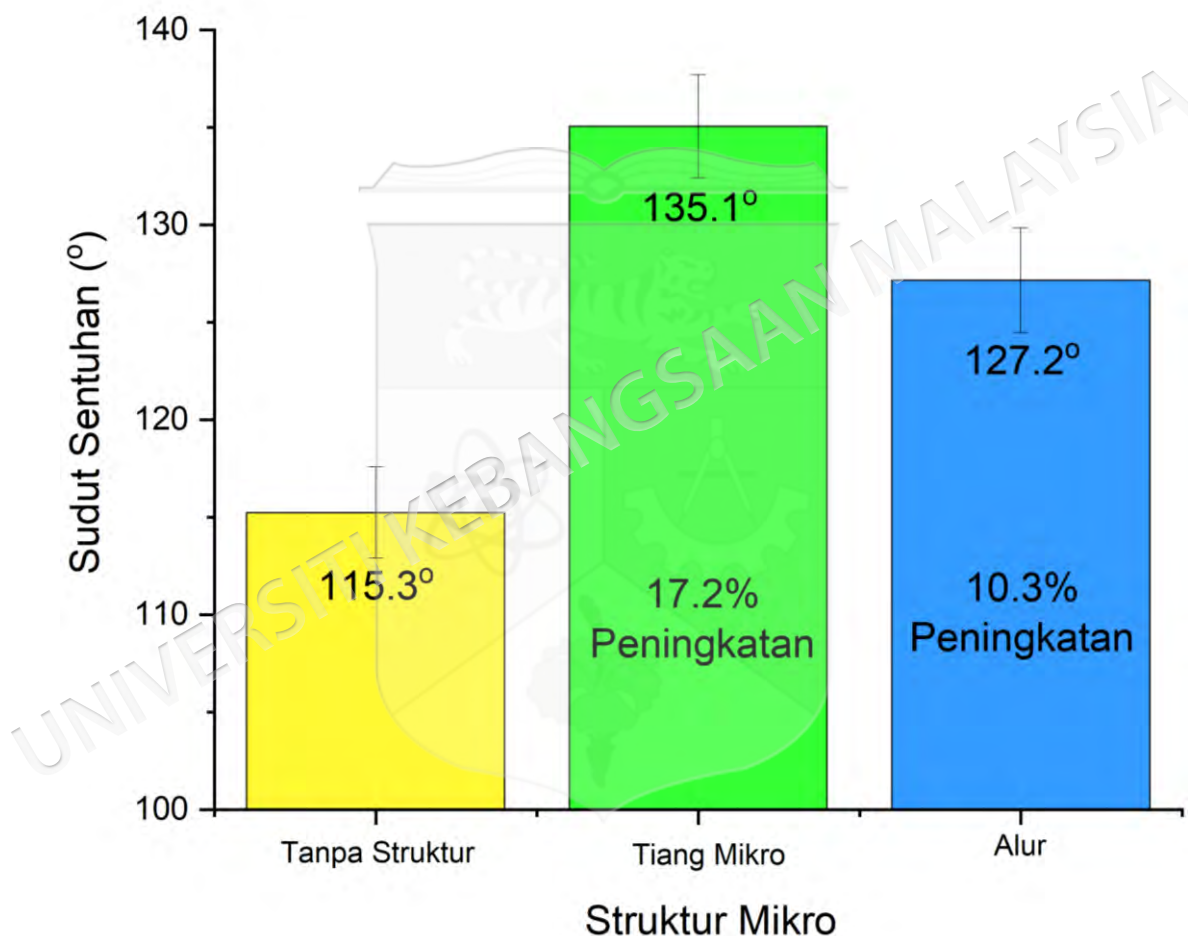
penting dalam meningkatkan prestasi penjaan tenaga dengan memberikan kadar sentuhan dan pemisahan yang lebih berkesan apabila titisan air berinteraksi pada permukaan. Ujian ini telah dijalankan dengan menitisikan 5ul titisan air pada permukaan dan mengukur sudut sentuhan yang dihasilkan melalui perisan ImajeJ. Rajah 5.6 menunjukkan imej sudut sentuhan yang telah di ambil pada permukaan yang mempunyai struktur mikro yang berbeza. Sifat hidrofobik dapat ditentukan melalui sudut sentuhan yang dihasilkan. Permukaan yang bersifat hidrofobik memperoleh sudut sentuhan diantara 90° sehingga 150° (Zhang & Xu 2021).



Rajah 5.6 Imej ujian sudut sentuhan (a) Struktur alur, (b) Struktur tiang mikro, (c) Tanpa struktur

Keputusan pengiraan sudut sentuhan menunjukkan kesemua permukaan yang mempunyai struktur mikro telah memperoleh sifat hidrofobik. Rajah 5.7 menunjukkan keputusan hasil pengiraan sudut sentuhan yang telah dilakukan. Berdasarkan keputusan ini, dapat diperhatikan bahawa kehadiran struktur mikro dapat memberikan peningkatan terhadap sifat hidrofobik pada permukaan. Tanpa struktur mikro, sudut sentuhan yang terhasil hanyalah pada 115.3° . Kehadiran struktur mikro ini telah memberikan peningkatan terhadap sifat hidrofobik dengan baik seperti yang di lihat pada struktur tiang mikro yang dapat memperoleh sudut sentuhan sehingga 135.1° . Sudut sentuhan tiang mikro merupakan sudut sentuhan yang tertinggi jika dibandingkan dengan struktur mikro alur yang hanya memperoleh sudut sentuhan sebanyak 127.2° . Keputusan ini

menunjukkan kehadiran struktur mikro ini mampu memberikan peningkatan sudut sentuhan yang ketara dengan memberikan peningkatan sebanyak 17.1% pada permukaan yang berstruktur tiang mikro dan 10.3% untuk permukaan yang berstruktur alur. Dapatan daripada keputusan ini menunjukkan kedua-dua struktur mikro yang dihasilkan mampu meningkatkan sifat hidrofobik pada permukaan PTFE yang digunakan. Namun, struktur tiang mikro mempunyai keputusan sudut sentuhan yang lebih baik, berbanding struktur alur.



Rajah 5.7 Plot ujian sudut sentuhan pada struktur mikro yang berbeza

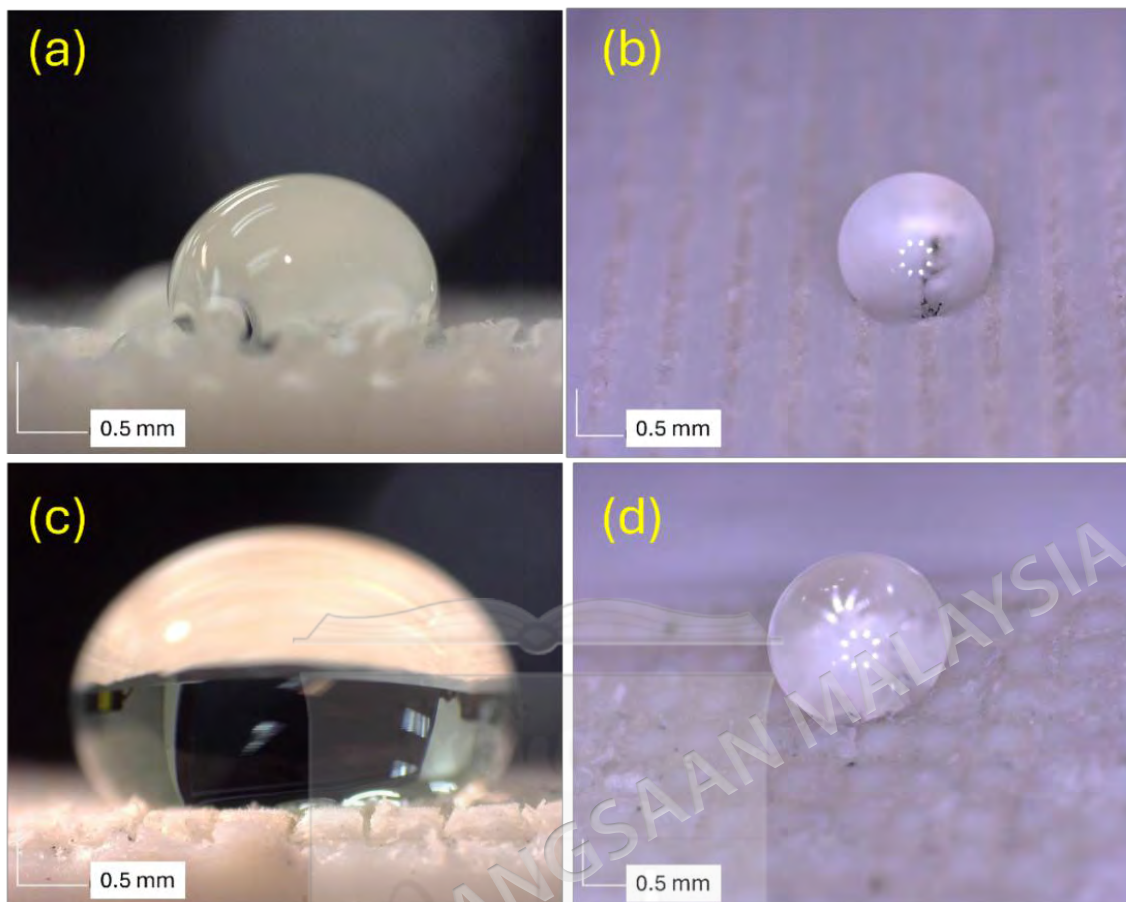
Fenomena peningkatan sudut sentuhan ini dapat dikaitkan dengan peningkatan kekasaran yang terdapat pada permukaan PTFE yang disebabkan oleh kehadiran struktur mikro yang dihasilkan (Yoshimitsu et al. 2002). PTFE merupakan bahan yang mempunyai permukaan bersifat hidrofobik yang disebabkan oleh struktur molekulnya seperti yang telah dibincangkan pada BAB II. Kehadiran corak kekasaran berskala

mikro pada permukaan bahan ini dapat mempertingkatkan lagi ciri hidrofobik pada permukaan yang disebabkan oleh peningkatan pada luas permukaan. Luas permukaan ini telah di pertingkatkan melalui variasi ketinggian yang dihasilkan oleh corak berskala mikro biomimetik yang dihasilkan. Peningkatan pada luas permukaan ini juga telah dibuktikan melalui pengiraan seperti yang dibincangkan pada bahagian 5.2.

Peningkatan pada luas permukaan dapat memberikan daya penolakan air yang lebih kuat pada permukaan berstruktur berbanding tanpa struktur dan menyebabkan peningkatan pada sifat hidrofobik. Keputusan yang diperoleh ini selari juga dengan pengiraan luas permukaan di mana semakin tinggi luas permukaan, semakin tinggi sifat hidrofobik yang dipertingkatkan (Kronberg 2016). Teori ini dapat dibuktikan melalui model interaksi air terhadap permukaan. Dalam kajian ini, kedua-dua struktur memperoleh ciri *Wenzel* dan keputusan mengenai ciri interaksi air ini akan dibincangkan lebih lanjut pada bahagian 5.5. Secara keseluruhan, kehadiran titisan air pada corak mikro biomimetik pada permukaan mampu mempengaruhi sifat hidrofobik pada permukaan. Oleh itu, dapatan daripada kajian ini menunjukkan struktur mikro biomimetik yang dihasilkan mampu meningkatkan sifat hidrofobik dan berpotensi meningkatkan kadar penjanaan tenaga.

5.5 UJIAN CIRI INTERAKSI AIR

Terdapat dua model interaksi yang dapat dikenal pasti pada masa kini iaitu model *Wenzel* dan *Cassie-Baxter*. Model *Wenzel* merujuk kepada situasi dimana titisan air berinteraksi pada kekasaran dengan memenuhi sepenuhnya struktur mikro yang terdapat pada permukaan. Manakala, model *Cassie-Baxter* pula merujuk kepada titisan air berada diatas struktur permukaan yang dihasilkan yang disebabkan oleh fenomena pembentukan poket udara diantara struktur mikro (Lohatepanont et al. 2024). Ciri interaksi air ini perlu di kawal bagi memperoleh kadar penjanaan tenaga yang lebih efisien. Interaksi titisan air pada permukaan struktur mikro telah diperhatikan dengan menggunakan mikroskop. Rajah 5.8 menunjukkan imej interaksi titisan air pada permukaan kedua-dua struktur mikro yang telah dihasilkan.



Rajah 5.8 Imej ciri hidrofobisiti Wenzel di atas permukaan (a-b) Struktur alur mikro, (c-d) Struktur tiang mikro

Berdasarkan imej ini, dapat diperhatikan bahawa titisan air telah memenuhi kedua-dua struktur mikro (alur dan tiang mikro) yang dihasilkan. Interaksi ini menunjukkan titisan air telah berinteraksi pada permukaan struktur melalui model Wenzel. Interaksi air melalui model Wenzel dapat memainkan peranan yang penting dalam aplikasi TENG. Perkara ini disebabkan oleh interaksi secara Wenzel dapat meningkatkan titik sentuhan air pada permukaan peranti jika dibandingkan dengan permukaan yang tidak berstruktur. Titik sentuhan yang lebih tinggi dapat memberikan pemindahan cas yang lebih baik diantara titisan air dan permukaan. Hal ini secara langsung dapat membantu dalam menghasilkan penjanaan tenaga yang lebih baik.

Manakala, jika permukaan mempunyai kekasaran yang terlalu tinggi dan bersifat super hidrofobik seperti yang terdapat melalui interaksi *Cassie-Baxter*. Ia boleh menyebabkan pengurangan pada titik sentuhan dan secara langsung mengurangkan kadar pemindahan cas diantara titisan air dan permukaan TENG (Helseth 2019). Fenomena

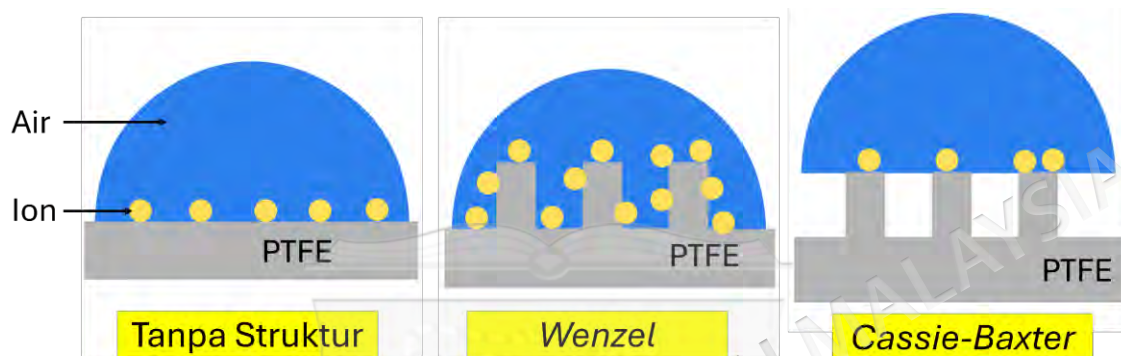
ini dapat di lihat dengan lebih jelas melalui lukisan skematik seperti pada Rajah 5.9. Selain daripada mempertingkatkan titik sentuhan, kehadiran struktur ini juga dapat meningkatkan sifat hidrofobik yang terdapat pada permukaan seperti yang dibincangkan pada bahagian 5.4. Menurut teori interaksi model *Wenzel*, kehadiran struktur pada permukaan mikro mampu meningkatkan sifat hidrofobik dengan peningkatan pada kekasaran permukaan. Teori fenomena ini dapat diterangkan melalui persamaan berikut (5.1):

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_0 \quad (5.1)$$

Diamana θ_w merujuk kepada sudut sentuhan yang terhasil pada permukaan yang mempunyai kekasaran dan θ_0 , merujuk kepada sudut sentuhan pada permukaan yang sebenar iaitu tanpa kekasaran (licin). Manakala, r mewakili nisbah kekasaran permukaan yang terdapat pada permukaan. Menurut teori ini, permukaan yang mempunyai kekasaran memperoleh luas permukaan yang lebih tinggi berbanding permukaan yang tidak mempunyai permukaan. Oleh itu nilai nisbah kekasaran yang digunakan adalah $r > 1$. Perkara ini kerana permukaan yang mempunyai luas permukaan yang lebih tinggi dapat menguatkan lagi ciri interaksi air di mana jika permukaan mempunyai sifat hidrofobik, ia akan menguatkan sifat hidrofobik permukaan dan begitu juga pada permukaan yang bersifat hidrofilik (Li et al. 2021).

Memandangkan PTFE mempunyai sifat hidrofobik, perhubungan pada permukaan merujuk kepada ($\theta > 90^\circ$). Perhubungan ini dapat memberikan perhubungan sudut sentuhan yang ketara lebih besar ($\theta^* > \theta$) berbanding permukaan yang tidak mempunyai kekasaran dan memberikan sifat penolakan air yang lebih kuat. Melalui teori ini, dapat disimpulkan bahawa peningkatan pada kekasaran permukaan telah meningkatkan lagi sifat hidrofobik yang terdapat pada permukaan PTFE dan menyebabkan pengurangan pada sifat lekatan di antara air dan permukaan substrat, dengan itu interaksi penolakan air semakin meningkat dan megurangkan pembasahan pada permukaan substrat PTFE (Li et al. 2021). Peningkatan sifat hidrofobik ini dapat memberikan proses sentuhan dan lepasan yang lebih efisien (Zheng et al. 2023).

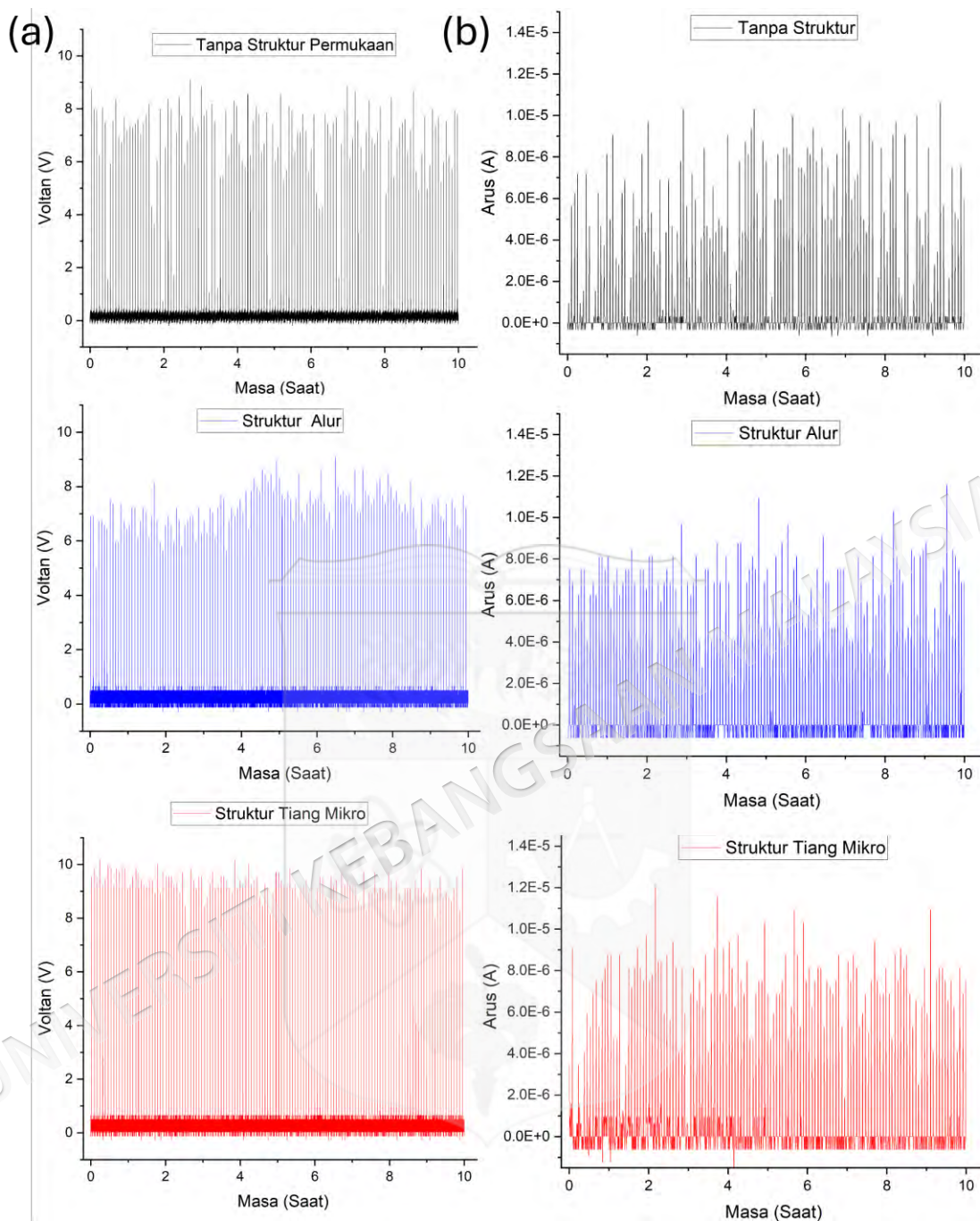
Oleh itu, dapatan daripada ujian ini menunjukkan kekasaran yang dihasilkan adalah baik dengan memperoleh interaksi air secara *Wenzel* pada permukaan. Interaksi ini berpotensi dalam memberikan peningkatan pada prestasi penjanaan tenaga dengan meningkatkan interaksi air dengan permukaan (Rajah 5.9) dan sifat hidrofobik. Ujian triboelektrik telah dijalankan permukaan ini untuk melihat kesan struktur mikro terhadap penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan.



Rajah 5.9 Ciri interaksi air dan ion pada permukaan.

5.6 UJIAN TRIBOELEKTRIK TERHADAP STRUKTUR YANG BERBEZA

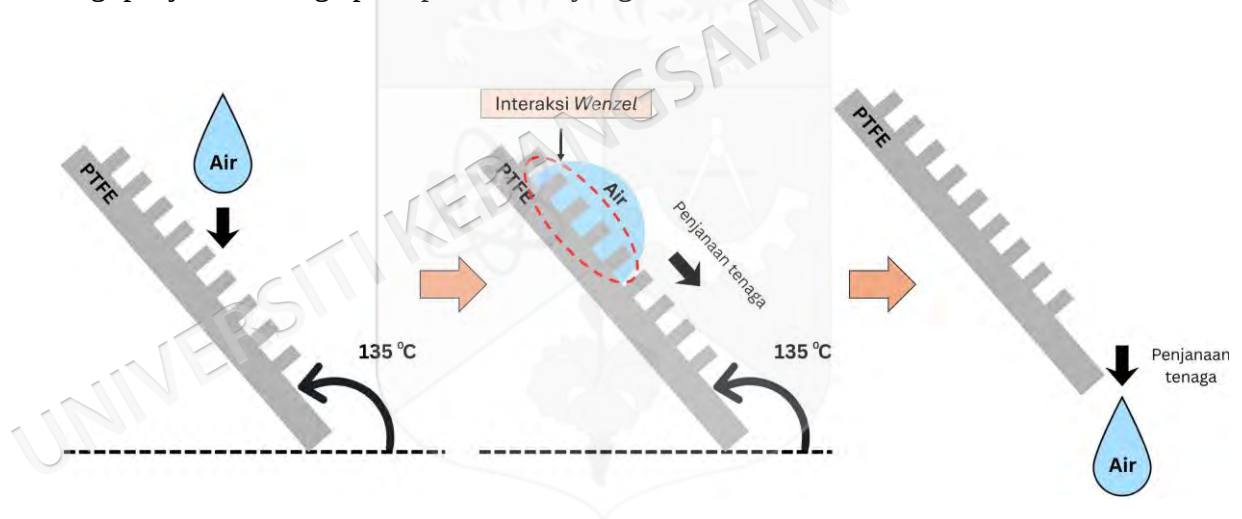
Ujian triboelektrik telah dijalankan pada kedua-dua permukaan struktur mikro biomimetik yang telah dihasilkan untuk melihat kesan peningkatan luas permukaan terhadap penjanaan voltan, arus dan kuasa pada peranti TENG. Ujian titisan air telah dijalankan dengan menggunakan parameter ketinggian di antara sumber air dan sampel pada 9 cm dan sampel juga telah diuji pada sudut 135° . Selain itu, parameter aliran air yang digunakan adalah pada 70 mL/min dan bacaan triboelektri di ambil selama 10 saat. Kedua-dua sample struktur mikro biomimetik ini telah menjalani ujian triboelektrik pada parameter yang sama bagi mengelakkan ralat pada bacaan yang diambil. Rajah 5.10 menunjukkan keputusan penjaan voltan dan arus yang diperoleh daripada permukaan tanpa struktur dan permukaan berstruktur alur dan tiang nano. Berdasarkan graf yang di hasilkan, dapat dilihat bahawa kehadiran struktur mikro telah memberikan kadar penjanaan voltan dan arus yang lebih tinggi berbanding permukaan yang tidak mempunyai struktur.



Rajah 5.10 Keputusan ujian penjanaan (a) Voltan dan (b) Arus terhadap struktur mikro biomimetik yang dihasilkan

Keputusan penjanaan triboelektrik ini dapat dilihat dengan lebih jelas melalui purata penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan seperti yang terdapat pada Jadual 5.1. Berdasarkan keputusan yang diperolehi, Tanpa struktur hanya memperoleh puratan penjanaan voltan dan arus pada 8.81 V dan 11.6 μ A. Manakala, purata penjanaan kuasa yang dihasilkan pula adalah pada 1.68 μ W. Dengan kehadiran struktur mikro biomimetik, prestasi penjanaan ini telah dapat di pertingkatkan. Perkara ini dapat dilihat

melalui keputusan purata penjanaan yang dihasilkan pada struktur mikro. Kehadiran struktur alur telah dapat meningkatkan purata penjanaan voltan dan arus kepada 9.7 V dan 12.2 μA . Selain itu, purata penjanaan kuasa juga telah memberikan peningkatan sehingga 12% jika di bandingkan dengan permukaan yang tidak berstruktur iaitu dengan memperoleh purata penjanaan kuasa sebanyak 1.87 μW . Sehubungan itu, kehadiran struktur tiang mikro juga telah memberikan peningkatan pada prestasi penjanaan triboelektrik. Keputusan menunjukkan struktur tiang mikro dapat memperoleh purata penjanaan voltan dan arus pada 10.8 V dan 13.7 μA . Seterusnya, struktur ini juga telah memberikan peningkatan pada purata penjanaan kuasa sehingga 40% jika dibandingkan dengan permukaan yang tidak berstruktur dengan memperoleh purata penjanaan kuasa sebanyak 2.35 μW . Berdasarkan keputusan yang diperoleh, dapat di lihat bahawa struktur tiang mikro telah memberikan peningkatan yang lebih tinggi berbanding struktur alur dalam penjanaan triboelektrik. Rajah 5.11 menunjukkan lukisan skematik bagi penjanaan tenaga pada permukaan yang berstruktur biomimetik.

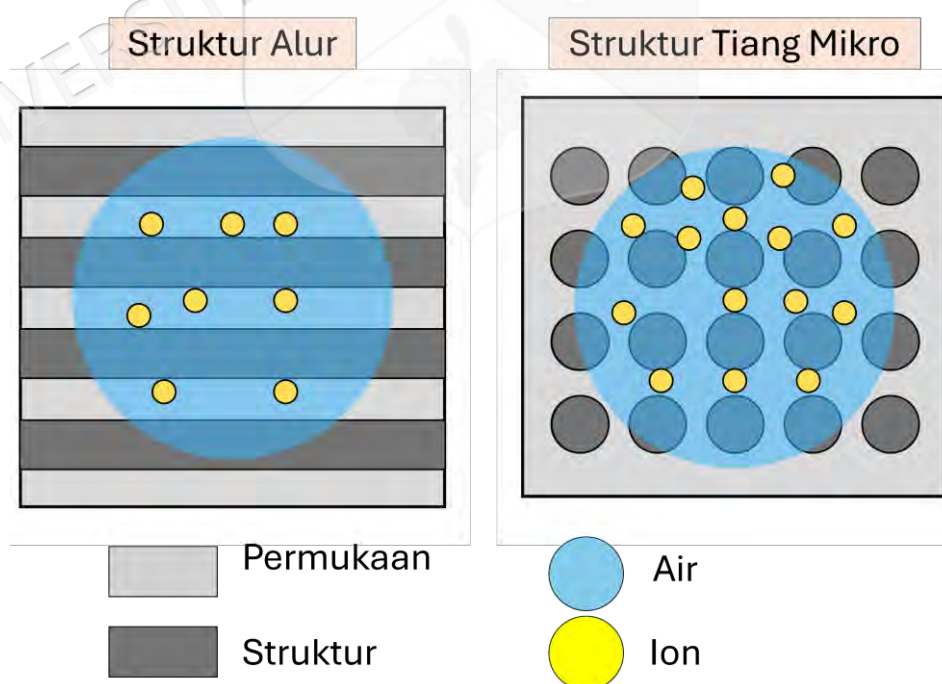


Rajah 5.11 Penjanaan tenaga pada permukaan berstruktur mikro

Jadual 5.1 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap struktur biomimetik yang berbeza

Struktur Mikro Biomimetik	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)	Peningkatan (%)
Tanpa struktur	8.81	11.6	1.68	-
Struktur Alur	9.70	12.2	1.87	12%
Struktur Tiang Mikro	10.8	13.7	2.35	40%

Fenomena peningkatan penjanaan tenaga pada struktur mikro biomimetik yang dihasilkan adalah disebabkan oleh struktur yang dihasilkan telah memberikan peningkatan dalam luas permukaan pada peranti TENG. Peningkatan luas permukaan ini telah dibuktikan melalui teori pengiraan yang dilakukan pada bahagian 5.2. Berdasarkan keputusan yang diperoleh dan teori pengiraan yang dilakukan, dapat dilihat bahawa semakin tinggi luas permukaan yang dihasilkan, semakin tinggi kadar penjanaan yang diperoleh. Perkara ini disebabkan oleh luas permukaan yang tinggi yang dapat meningkatkan kadar interaksi dan pemindahan cas melalui pertambahan kawasan sentuhan. Situasi ini dapat diperhatikan melalui ciri interaksi air seperti yang dibincangkan dalam bahagian 5.5, di mana struktur yang dihasilkan mempamerkan interaksi jenis Wenzel. Interaksi ini membolehkan titisan air menembusi dan memenuhi struktur permukaan mikro yang terbentuk, berbeza dengan interaksi Cassie–Baxter di mana air hanya berada di atas struktur tanpa memasuki ruang mikro yang dihasilkan (Lee et al. 2010). Hal ini menyebabkan peningkatan dalam kawasan sentuhan air pada permukaan dan memudahkan pemindahan cas untuk berlaku (Sun et al. 2022). Oleh itu, semakin tinggi kawasan sentuhan, semakin banyak pemindahan cas dapat berlaku ketika titisan air berinteraksi dengan permukaan. Rajah 5.12 menunjukkan lukisan skematik bagi interaksi air terhadap struktur biomimetik yang berbeza.



Rajah 5.12 Lukisan skematik interaksi air dengan struktur biomimetik yang berbeza

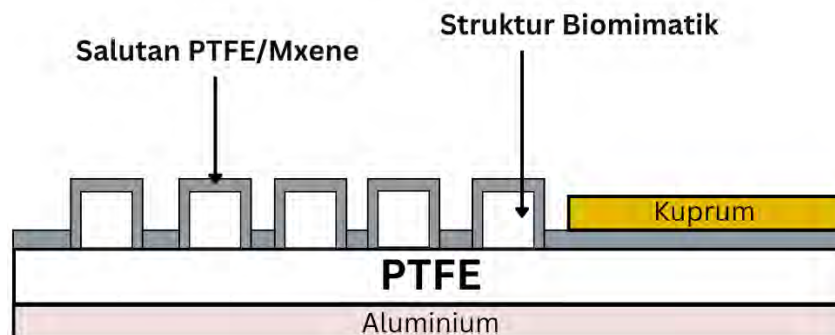
Selain itu, sifat hidrofobik yang terdapat pada permukaan juga dapat membantu dalam meningkatkan kadar penjana triboelektrik. Berdasarkan kajian sudut sentuhan yang bincangkan pada bahagian 5.4, dapat di perhatikan bahawa permukaan yang mempunyai struktur mikro memperoleh sifat hidrofobik yang lebih tinggi berbanding permukaan tanpa struktur. Sifat hidrofobik yang lebih tinggi pada permukaan berstruktur mikro dapat membantu dalam meningkatkan penjana tenaga dengan mengekalkan kadar sentuhan dan pemisahan cas yang lebih efisien berbanding permukaan tanpa struktur. Perkara ini membolehkan pemindahan cas dapat berlaku dengan lebih cekap dan secara langsung meningkatkan penjanaan tenaga pada peranti TENG apabila titisan air berinteraksi denganya (Jang et al. 2016). Dapatan ini selari dengan keputusan yang diperoleh daripada sudut sentuhan dimana struktur tiang mikro mempunyai peningkatan sifat hidrofobik tertinggi dan telah memperoleh kadar penjanaan tenaga yang tertinggi berbanding struktur yang lain.

Oleh itu, kajian ini menunjukkan struktur mikro biomimetik mampu memberikan peningkatan dalam penjanaan tenaga yang disebabkan oleh peningkatan pada luas permukaan dan sifat hidrofobik pada peranti TENG yang dihasilkan. Seterusnya, kajian ini juga menunjukkan bahawa permukaan yang mempunyai struktur tiang mikro telah memperoleh kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih tinggi berbanding struktur alur dan tanpa struktur. Disebabkan struktur tiang mikro meperoleh prestasi penjanaan yang terbaik, struktur ini telah dipilih untuk menjalani proses salutan MXene bagi menghasilkan peranti TENG yang mengabungkan kaedah salutan PTFE/MXene dan penstrukturan mikro.

5.7 UJIAN TERHADAP KOMBINASI SALUTAN PTFE/MXENE DAN STRUKTUR MIKRO

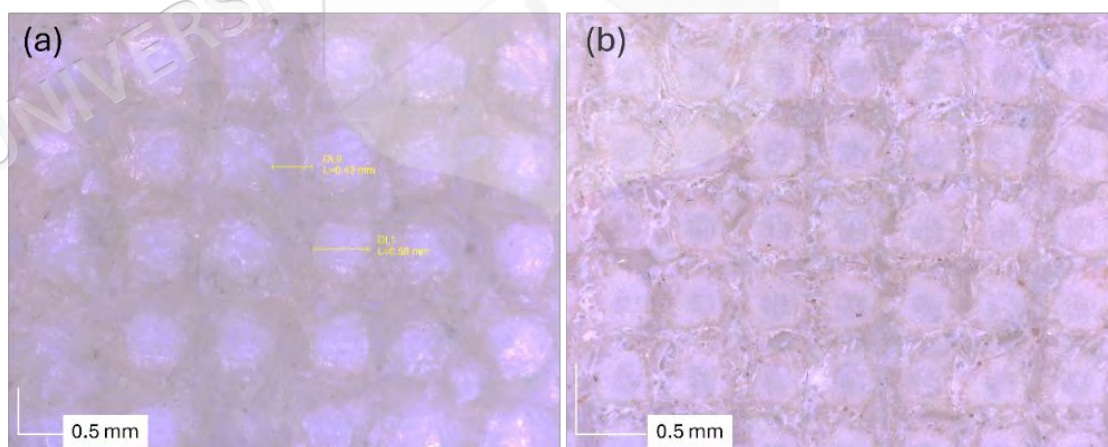
Dalam kajian ini, permukaan struktur tiang mikro telah di salut dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt% menggunakan kaedah salut putar. Pemilihan struktur tiang mikro dan komposisi salutan PTFE/MXene 0.01wt% untuk proses pengabungan adalah melalui prestasi penjaan yang dihasilkan di mana komposisi salutan dan struktur ini telah memberikan prestasi penjanaan voltan, arus dan kuasa yang terbaik berbanding komposisi salutan dan struktur yang lain. Rajah 5.13 menunjukkan lukisan skimetik

bagi penghasilan peranti TENG dengan pengabungan salutan PTFE/MXene dan struktur mikro biomimetik.



Rajah 5.13 Lukisan skematik struktur biomimetik di salut dengan salutan PTFE/MXene

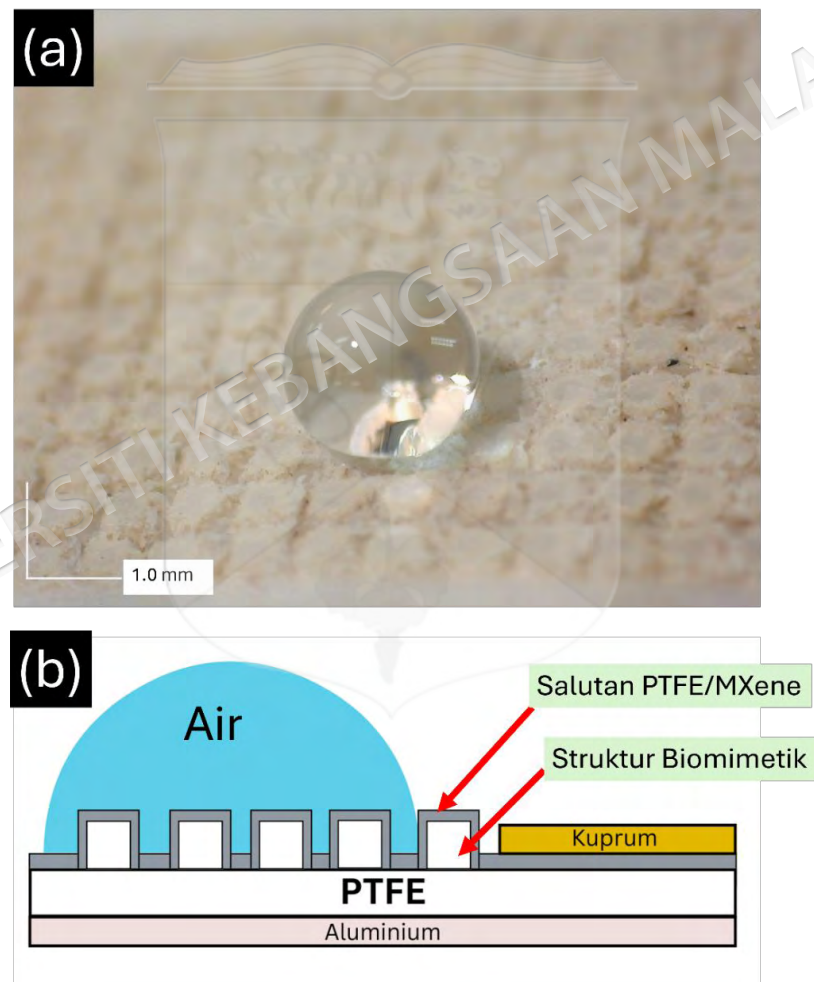
Rajah 5.14 menunjukkan pencirian morfologi yang telah dilakukan pada permukaan struktur tiang mikro sebelum dan selepas salutan PTFE/MXene 0.01wt% dengan menggunakan mikroskop pada kadar pembesaran 50x. Imej yang di ambil menunjukkan terdapat perbezaan yang ketara telah di dihasilkan di antara permukaan yang bersalut dan tidak bersalut. Struktur tiang mikro yang bersalut PTFE/MXene 0.01wt% menunjukkan struktur morfologi yang lebih kasar berbanding permukaan yang tidak bersalut. Sehubungan itu, dapat diperhatikan juga bahawa salutan yang dihasilkan kelihatan homogen di atas permukaan struktur tiang mikro yang dihasilkan.



Rajah 5.14 Imej salutan pada struktur biomimetik yang dihasilkan dengan kadar pembesaran 50x (a) tiang mikro tanpa salutan dan (b) struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%.

Seterunya, untuk melihat interaksi air pada permukaan peranti TENG yang digabungkan ini, 5 μ L titisan air telah di letakkan pada permukaan untuk melihat ciri interaksi air yang terdapat pada permukaan struktur mikro dengan kehadiran salutan.

Rajah 5.15 menunjukkan imej titisan air di atas permukaan peranti TENG dengan gabungan struktur tiang mikro dan salutan PTFE/MXene 0.01wt%. Imej yang diperoleh menunjukkan terdapat interaksi *Wenzel* pada peranti TENG yang telah dihasilkan. Interaksi *Wenzel* dapat ditentukan melalui interaksi air pada permukaan dimana, interaksi *Wenzel* berlaku apabila titisan air memenuhi struktur mikro yang dihasilkan. Fenomena ini dapat memainkan peranan yang penting dalam meningkatkan kadar penjanaan triboelektrik yang disebabkan oleh peningkatan titik sentuhan diantara titisan air dan permukaan TENG (Das et al. 2025). Peningkatan dalam titik sentuhan secara langsung dapat meningkatkan kadar pemindahan cas yang lebih baik dan membantu memberikan kadar penjanaan triboelektrik yang lebih cekap.



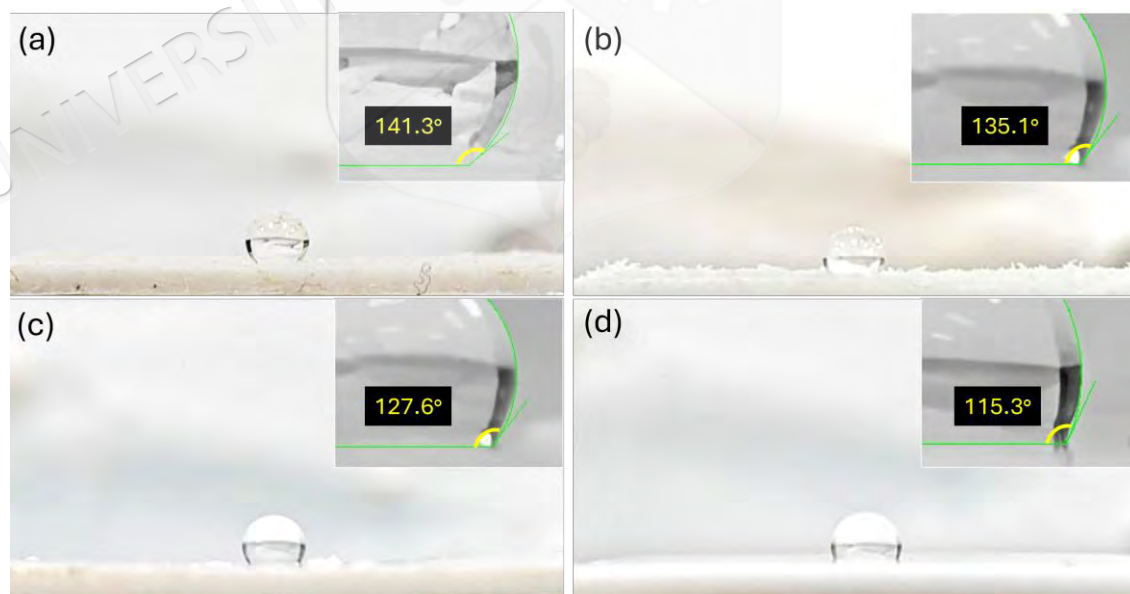
Rajah 5.15 Gambar ciri (a) hidrofobisiti *Wenzel* di atas permukaan struktur mikro bersalut PTFE/MXene 0.01wt% dengan menggunakan mikroskop pada kadar pembesaran 50x dan (b) lukisan skematik bagi interaksi tersebut

Seterusnya, ujian sudut sentuhan telah dijalankan pada permukaan ini untuk melihat sifat hidrofobik yang terhasil pada permukaan peranti TENG yang

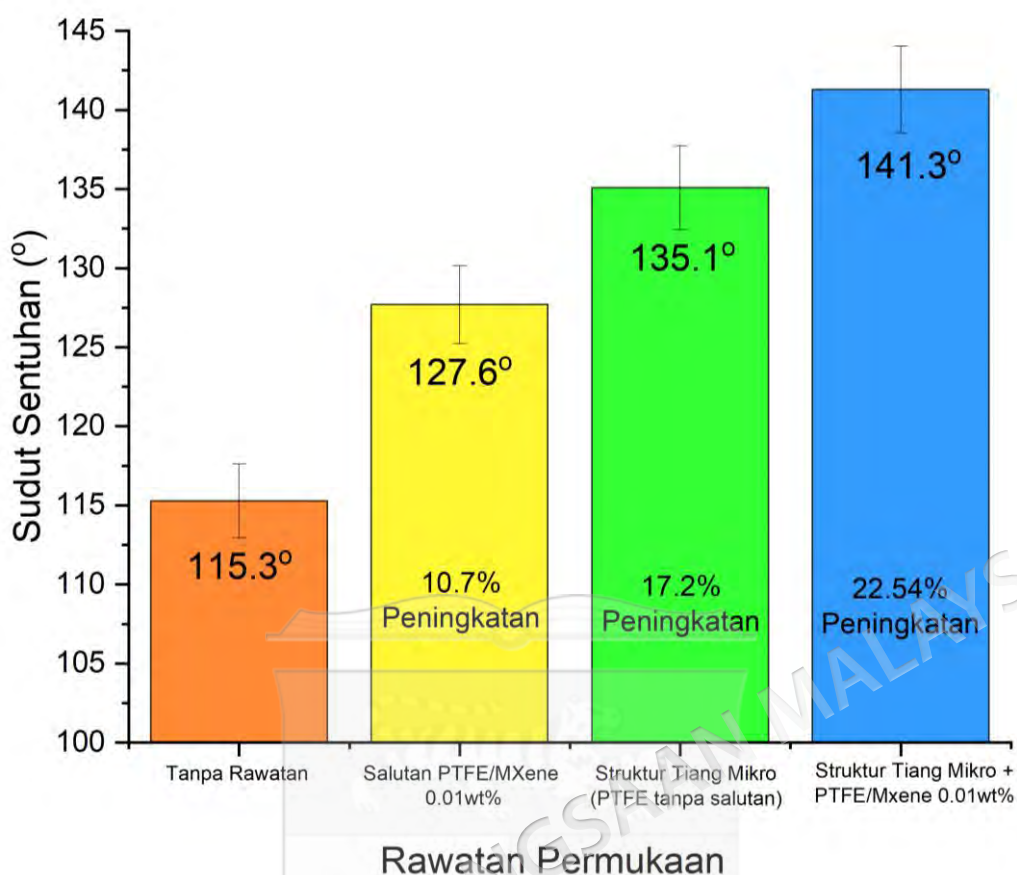
mengabungkan kaedah struktur mikro dan salutan PTFE/MXene. Ujian sudut sentuhan ini telah dilakukan kerana sifat hidrofobik pada permukaan dapat mempengaruhi kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa pada peranti TENG yang dihasilkan. Oleh itu, sifat hidrofobik ini telah di uji dan dibandingkan dengan rawatan permukaan yang lain iaitu PTFE tanpa rawatan, rawatan salutan PTFE/MXene 0.01wt% tanpa struktur mikro dan rawatan CNC struktur tiang mikro untuk melihat kesan rawatan permukaan berbeza terhadap sifat hidrofobik yang terhasil pada permukaan .

5.7.1 Perbandingan Sudut Sentuhan Terhadap Rawatan Permukaan

Sifat hidrofobik pada permukaan dapat ditentukan melalui ujian pengukuran sudut sentuhan air yang terbentuk pada permukaan. Ujian sudut sentuhan telah dilakukan dengan menitisakan 5 μ L titisan air pada permukaan peranti dan sudut sentuhan yang terhasil telah di ukur dengan menggunakan perisian ImageJ. Sifat hidrofobik pada permukaan dapat ditentukan melalui sudut sentuhan yang terhasil iaitu diantara 90° sehingga 150°. Rajah 5.16 menunjukkan gambar ujian sudut sentuhan yang telah dilakukan pada kesemua rawatan permukaan. Manakala, Rajah 5.17 menunjukkan carta bar menegak bagi keputusan pengiraan sudut sentuhan yang telah diperolehi.



Rajah 5.16 Perbandingan rawatan permukaan terhadap sudut sentuhan (a) Struktur alur mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01%wt, (b) Struktur tiang mikro, (c) Salutan PTFE/MXene 0.01wt% tanpa struktur mikro dan (d) PTFE tanpa struktur dan salutan



Rajah 5.17 Perbandingan sudut sentuhan yang terhasil dengan rawatan permukaan yang berbeza

Berdasarkan keputusan sudut sentuhan yang diperolehi, dapat diperhatikan bahawa terdapat peningkatan sudut sentuhan pada kesemua permukaan yang menjalani rawatan permukaan. Tanpa sebarang rawatan, permukaan PTFE hanya memperoleh sudut sentuhan pada ketinggian 115.3° sahaja. Dengan kehadiran rawatan permukaan, sudut sentuhan telah dapat ditingkatkan seperti yang ditunjukkan pada permukaan struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt% yang memperoleh bacaan sudut sentuhan setinggi 141.3°. Sudut sentuhan ini juga merupakan sudut sentuhan yang mempunyai peningkatan yang tertinggi berbanding rawatan permukaan yang lain. Dengan rawatan permukaan secara individu seperti yang terdapat rawatan salutan PTFE/MXene 0.01wt%, sudut sentuhan hanya dapat ditingkatkan pada 127.6°. Manakala, rawatan CNC penstrukturan tiang mikro pula hanya mampu meningkatkan sudut sentuhan pada 135.1°. Berdasarkan rawatan permukaan individu yang dilakukan, dapat disimpulkan bahawa penghasilan struktur tiang mikro telah memberikan pengaruh yang lebih tinggi dalam meningkatkan sifat hidrofobik pada permukaan berbanding salutan PTFE/MXene 0.01wt%.

Fenomena ini berlaku disebabkan oleh rawatan salutan PTFE/MXene 0.01wt% hanya memberikan peningkatan kadar kekasaran pada skala nano seperti yang dilihat melalui pencirian FESEM yang dijalankan pada bahagian 4.3.2 (Tran et al. 2013). Perkara ini tidak memberikan pengaruh yang ketara dalam meningkatkan sifat hidrofobik. Sebaliknya, penghasilan struktur biomimetik tiang mikro telah memberikan pengaruh kekasaran pada skala mikro. Seperti yang dibincangkan pada bahagian 5.4, struktur mikro telah memperoleh kadar interaksi dengan air secara model *Wenzel*. Perkara ini menyebabkan rintangan air untuk bergerak merebak membasahi permukaan dan menghasilkan kadar sudut sentuhan yang lebih tinggi. Hal ini membolehkan struktur tiang mikro memberikan pengaruh yang lebih ketara dalam meningkatkan sifat hidrofobik pada permukaan (Yoshimitsu et al. 2002).

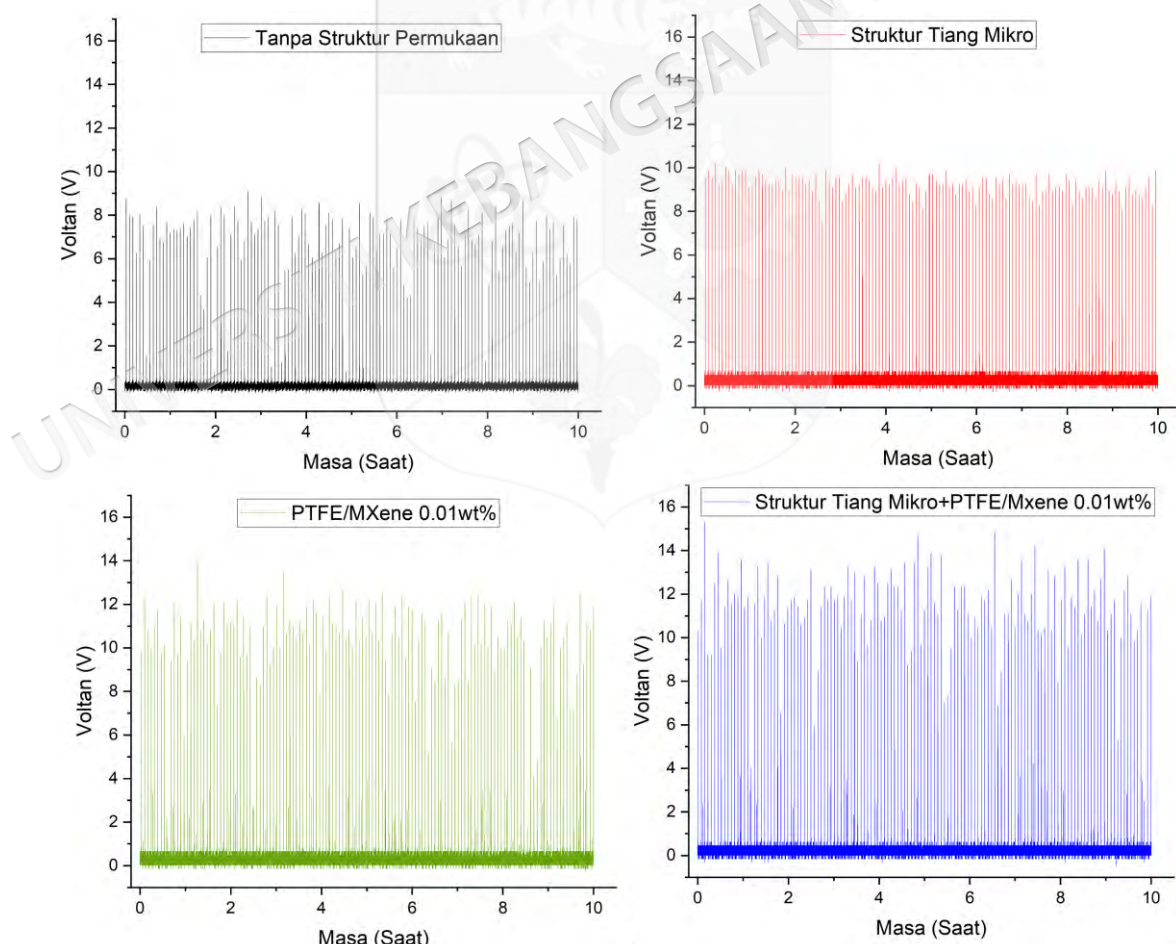
Walau bagaimanapun, sudut sentuhan tertinggi telah diperoleh pada rawatan permukaan dengan penggabungan struktur tiang mikro dan salutan PTFE/MXene 0.01wt%. Fenomena ini berlaku disebabkan oleh penggabungan sifat kekasaran yang berskala nano dan mikro. Kekasaran mikro diperoleh melalui struktur tiang mikro yang dihasilkan, manakala kekasaran nano diperoleh daripada salutan PTFE/MXene 0.01wt% yang diaplikasikan pada permukaan. (Bhushan et al. 2009). Oleh itu, dapatan kajian ini menunjukkan penggabungan kaedah salutan dan penstrukturan mikro dapat membantu dalam memberikan peningkatan sifat hidrofobik yang lebih ketara berbanding rawatan permukaan secara individu. Selain itu, kaedah ini juga berpotensi untuk mempengaruhi kadar penjanaan triboelektrik.

5.7.2 Perbandingan Ujian Triboelektrik Terhadap Rawatan Permukaan

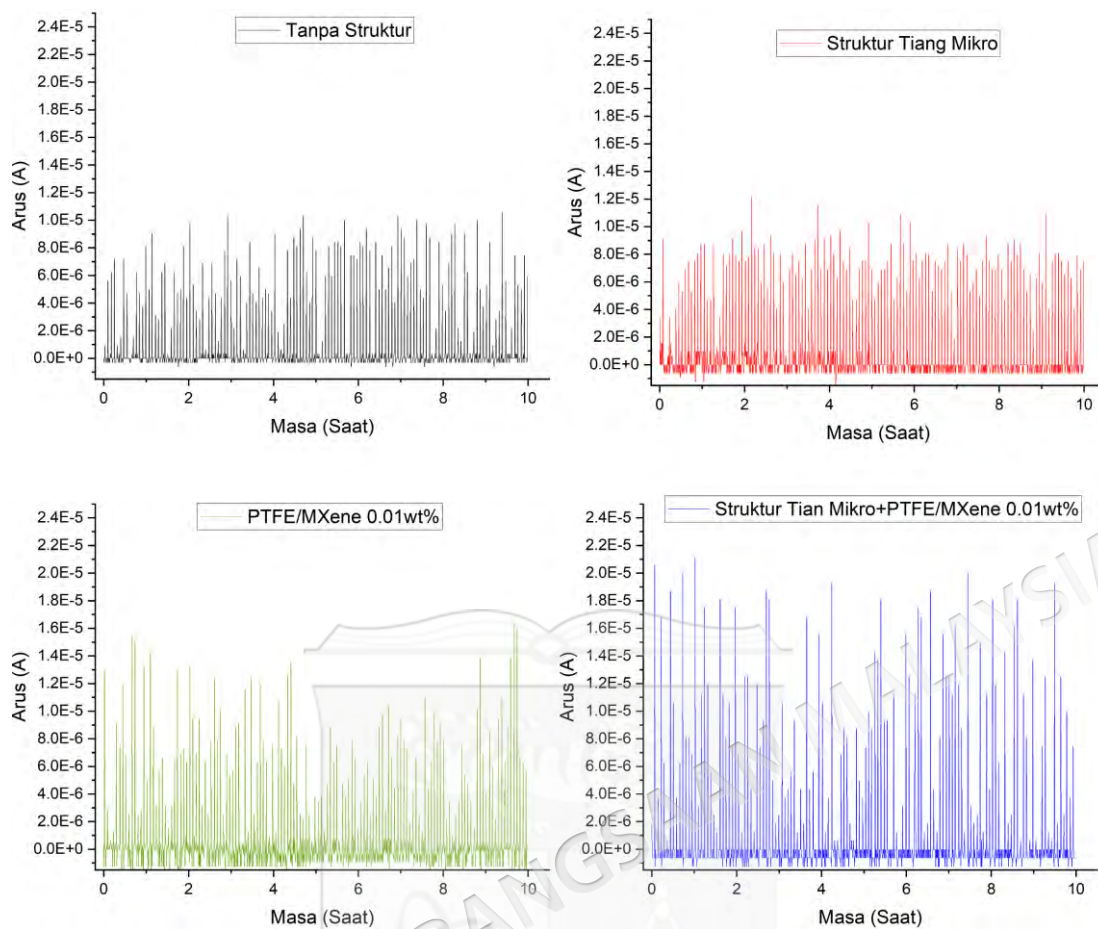
Ujian triboelektrik telah dijalankan pada peranti TENG tanpa rawatan permukaan dan peranti TENG yang telah menjalani rawatan permukaan termasuk rawatan permukaan salutan PTFE/MXene 0.01wt%, pemesinan struktur tiang mikro (tanpa salutan) dan penggabungan salutan PTFE/MXene 0.01wt% pada struktur tiang mikro. Ujian ini telah dijalankan untuk melihat kesan rawatan permukaan yang paling ketara yang dapat membantu meningkatkan kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan. Ujian penjanaan triboelektrik telah dijalankan dengan menggunakan parameter yang sama untuk kesemua peranti TENG yang telah diuji. Parameter yang telah digunakan

ialah 9 cm jarak ketinggian diantara sumber air dan sample. Sehubungan itu, sampel juga telah diuji dengan berada pada sudut 135° . Kadar aliran air yang digunakan pula adalah 70mL/min dan bacaan telah diambil selama 10 saat.

Rajah 5.18 dan Rajah 5.19 menunjukkan corak penjanaaan voltan dan arus terhadap rawatan permukaan yang berbeza. Manakala, Jadual 5.2 menunjukkan purata penjanaaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan pada rawatan permukaan peranti TENG yang berbeza. Tanpa sebarang rawatan, purata penjanaaan voltan dan arus yang diperoleh adalah pada 8.81 V dan 11.6 μ A. Seterusnya, purata penjanaaan kuasa yang dihasilkan pula adalah pada 1.68 μ W. Kehadiran rawatan permukaan telah memberikan peningkatan penjanaaan yang ketara pada kesemua peranti TENG yang dihasilkan. Walaubaguimanapun, setiap rawatan permukaan yang dihasilkan telah memberikan peningkatan yang berbeza dalam kadar penjanaaan voltan, arus dan kuasa.



Rajah 5.18 Keputusan ujian penjaan voltan pada rawatan permukaan yang berbeza (tanpa salutan, salutan PTFE/MXene 0.01wt%, struktur tiang mikro dan struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%)



Rajah 5.19 Keputusan ujian penjanaan arus pada rawatan permukaan yang berbeza (tanpa salutan, salutan PTFE/MXene 0.01wt%, struktur tiang mikro dan struktur tiang mikro dengan salutan PTFE/MXene 0.01wt%)

Jadual 5.2 Kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap rawatan permukaan yang berbeza

Rawatan Permukaan	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)	Peningkatan (%)
Tanpa struktur	8.81	11.6	1.68	0
Struktur Tiang Mikro	10.8	13.7	2.35	39.88
PTFE/Mxene 0.01%	14.2	19.1	4.56	171.43
Struktur Mikro+PTFE/MXene 0.01wt%	16.4	22.5	6.33	276.79

Berdasarkan keputusan ujian triboelektrik yang dijalankan, rawatan permukaan struktur tiang mikro telah memberikan purata penjanaan voltan dan arus pada 10.8 V dan 13.7 μA . Sehubungan itu, rawatan ini juga telah memperoleh purata penjanaan kuasa sebanyak 2.35 μW . Kehadiran struktur tiang mikro menunjukkan kaedah ini mampu memberikan peningkatan dalam purata penjanaan kuasa sebanyak 39.88% berbanding permukaan tanpa rawatan. Manakala, rawatan salutan PTFE/MXene 0.01wt% pula telah menghasilkan purata penjanaan voltan dan arus yang lebih tinggi berbanding kaedah penghasilan struktur mikro iaitu sebanyak 14.2 V dan 19.1 μA . Selain itu, purata penjanaan kuasa yang dihasilkan juga lebih tinggi berbanding kaedah struktur mikro iaitu dengan memperoleh purata penjanaan kuasa sebanyak 4.56 μW . Kaedah salutan dapat memberikan peningkatan penjanaan kuasa sebanyak 171.43% berbanding permukaan tanpa struktur. Perkara ini menunjukkan kaedah salutan telah memberikan pengaruh penjanaan triboelektrik yang lebih tinggi berbanding struktur mikro.

Fenomena ini disebabkan oleh sifat unsur MXene yang mampu meningkatkan kadar penyimpanan dan pemindahan cas melalui kumpulan berfungsinya (-O, -OH, -F), yang seterusnya membantu menghasilkan pengaliran cas yang lebih efisien (Okubo et al. 2018; Zhao et al. 2024). Pengaliran cas yang lebih efisien ini membolehkan penjanaan tenaga yang lebih tinggi dicapai pada permukaan yang mengandungi MXene berbanding permukaan tanpa MXene. Sehubungan itu, sifat pengaliran elektrik yang tinggi pada MXene juga dapat membantu dalam memberikan penghantaran cas yang berterusan dengan mengurangkan rintangan dalaman peranti TENG. Perkara ini membolehkan cas dapat dijana dan dikumpulkan pada permukaan dengan lebih berkesan serta membolehkan peningkatan pengaliran elektron pada elektrod berlaku (Zhao et al. 2024). Keadaan ini seterusnya dapat memberikan kadar penjanaan tenaga pada peranti TENG dengan lebih baik.

Manakala, kaedah penstrukturan mikro hanya bergantung pada peningkatan dari segi titik sentuhan dan sifat hidrofobik pada permukaan yang dihasilkan (Chung et al. 2020). Kaedah ini hanya memainkan peranan dari segi peningkatan pada kekasaran dan luas permukaan yang dihasilkan sahaja menyebabkan peningkatan penjanaanya tidak setinggi kaedah salutan yang dapat mempengaruhi ciri elektrik dan penyimpanan

tenaga. Sehubungan itu, kaedah struktur mikro juga hanya bergantung pada sifat triboelektrik yang terdapat pada PTFE sahaja untuk membantunya dalam pengumpulan dan penghantaran cas yang menyebabkan peningkatan penjanaannya kurang ketara berbanding kaedah salutan.

Walau bagaimanapun, kaedah penggabungan diantara struktur mikro dan salutan PTFE/MXene 0.01wt% telah memberikan peningkatan dalam kadar pejanaan voltan, arus dan kuasa yang tertinggi berbanding rawatan permukaan secara individu (salutan PTFE/MXene 0.01wt% dan struktur tiang mikro). Purata penjaan voltan dan arus yang dihasilkan adalah pada 16.4 V dan 22.5 μ A. Selain itu, purata penjaan kuasa yang diperoleh daripada penggabungan ini juga menunjukkan peningkatan purata penjaan tertinggi iaitu sebanyak 276.79% berbanding permukaan tanpa struktur dengan memperoleh purata kuasa sebanyak 6.33 μ W. Perkara ini menunjukkan kaedah penggabungan ini merupakan kaedah yang paling efisien dalam penjaan tenaga berbanding kaedah yang lain.

Fenomena ini berlaku disebabkan oleh penggabungan dapat memberikan dua faktor peningkatan iaitu yang pertama peningkatan yang disebabkan oleh kehadiran unsur MXene pada salutan yang dapat membantu dalam meningkatkan pemindahan cas dan yang kedua ialah faktor peningkatan titik sentuhan dan sifat hidrofobik yang disebabkan oleh kehadiran struktur tiang mikro. Kehadiran struktur tiang mikro yang mempunyai ciri interaksi air *Wenzel* dapat meningkatkan interaksi diantara titisan air dan permukaan peranti. Seterusnya, peningkatan pada sifat hidrofobik pula dapat memberikan proses sentuhan dan lepasan yang lebih efisien. Manakala, kehadiran salutan PTFE/MXene 0.01wt% pada permukaan yang berstruktur ini dapat membantu lagi dalam meningkatkan kadar pemindahan cas dan pengaliran elektron yang disebabkan oleh kehadiran unsur MXene pada permukaan yang berstruktur mikro ini. Sehubungan itu, kehadiran MXene pada permukaan ini juga dapat membantu dalam pemindahan dan penyimpanan cas pada permukaan dan secara langsung memberikan peningkatan kecekapa dalam penjaan tenaga (Chung et al. 2020; Okubo et al. 2018). Oleh itu, kaedah penggabungan ini dapat memberikan peningkatan prestasi penjaan yang terbaik berbanding kaedah rawatan permukaan secara individu. Disebabkan penggabungan rawatan ini telah memberikan prestasi penjaan voltan, arus dan kuasa

yang terbaik, peranti ini telah di uji dengan medium air yang berbeza (air paip, air hujan, air NaCl 0.9% dan air laut) untuk melihat persekitan yang bersesuaian untuk diaplikasikan.

5.8 UJIAN TERHADAP EMPAT MEDIUM AIR YANG BERBEZA

Kajian ini telah dijalankan dengan menggunakan empat medium air yang berbeza iaitu air paip, air hujan, air NaCl 0.9% dan air laut untuk menguji kesannya terhadap penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan. Setiap medium air yang digunakan mampu mempengaruhi sifat penjanaan tenaga pada peranti TENG yang dihasilkan disebabkan oleh unsur-unsur yang terdapat pada medium air yang digunakan. Dapatan daripada hasil analisis ini dapat membantu dalam mengenal pasti aplikasi dan persekitaran yang sesuai pada peranti TENG ini. Terdapat dua bahagian yang telah dibincangkan iaitu bahagian yang pertama ialah pencirian XRF pada kandungan medium air yang digunakan bagi mengenal pasti unsur-unsur yang terdapat padanya. Pencirian XRF ini telah dibincangkan pada bahagian 5.7.1. Manakala, bahagian yang kedua pula ialah membincang mengenai ujian penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap empat medium air yang berbeza bagi mengenal pasti pengaruhnya dalam penjanaan tenaga. Ujian penjanaan triboelektrik ini telah dibincangkan pada bahagian 5.7.2.

5.8.1 Ujian XRF Terhadap Kandungan Medium Air Yang Berbeza

Ujian XRF telah dijalankan terhadap empat medium air yang digunakan dalam ujian penjanaan ini. Medium air yang digunakan telah di pilih berdasarkan keadaan persekitaran yang berpotensi untuk diaplikasikan seperti pada sumber air paip untuk kegunaan dalam perpaipan, titisan air hujan untuk menjana melalui titisan air hujan, air NaCl 0.9% bagi aplikasi perubatan dan air laut untuk kegunaan dalam pelantar minyak dan kederaan yang terdedah pada persekitaran lautan. Ujian XRF telah dijalankan bagi mengenal pasti unsur dan potensi komposisi yang terdapat pada kandungan medium air yang digunakan. Komposisi dan unsur yang terdapat pada medium air ini mampu mempengaruhi kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan. Jadual 5.3 menunjukkan keputusan XRF yang telah diperoleh daripada medium air yang digunakan.

Jadual 5.3 Analisis XRF terhadap medium air yang digunakan

Air	Unsur	Keputusan	Unit
Air Paip	Na	4030	ppm
	Al	54.8	ppm
	Si	0.0000	ppm
	S	15.8	ppm
	H ₂ O	99.6	jisim%
Air Hujan	Cu	0.342	ppm
	Sn	1.14	ppm
	H ₂ O	100.0	jisim%
Air NaCl 0.9%	Na	1.89	jisim%
	Al	11.9	ppm
	Si	0.0000	ppm
	Cl	5680	ppm
	H ₂ O	97.5	jisim%
Air Laut	Na	4.91	jisim%
	Mg	2430	ppm
	Al	0.0000	ppm
	Si	0.0000	ppm
	S	681	ppm
	Cl	1.27	jisim%
	K	311	ppm
	Ca	245	ppm
	Br	37.1	ppm
	H ₂ O	93.4	jisim%

Analisis XRF menunjukkan terdapat perbezaan komposisi unsur pada setiap sampel air yang digunakan. Setiap medium air yang digunakan mempunyai kadar kepekatan unsur seperti natrium (Na), klorin (Cl), Sulfur, Aluminium (Al) dan mineral surih yang berbeza. Unsur ini mampu memainkan peranan yang penting dalam mempengaruhi kadar penjanaan tenaga. Berdasarkan ujian yang dijalankan, air paip mempunyai kepekatan natrium yang tinggi pada 4030 ppm menunjukkan kandungan mineral yang ketara yang berkemungkinan disebabkan oleh proses rawatan air (Patterson et al. 2013). Air paip juga mempunyai kandungan aluminium dan sulfur yang rendah yang mungkin berasal daripada bahan rawatan kimia atau alam semula jadi. Keputusan air paip juga menunjukan terdapat 99.6% kandungai air (H₂O) pada medium ini.

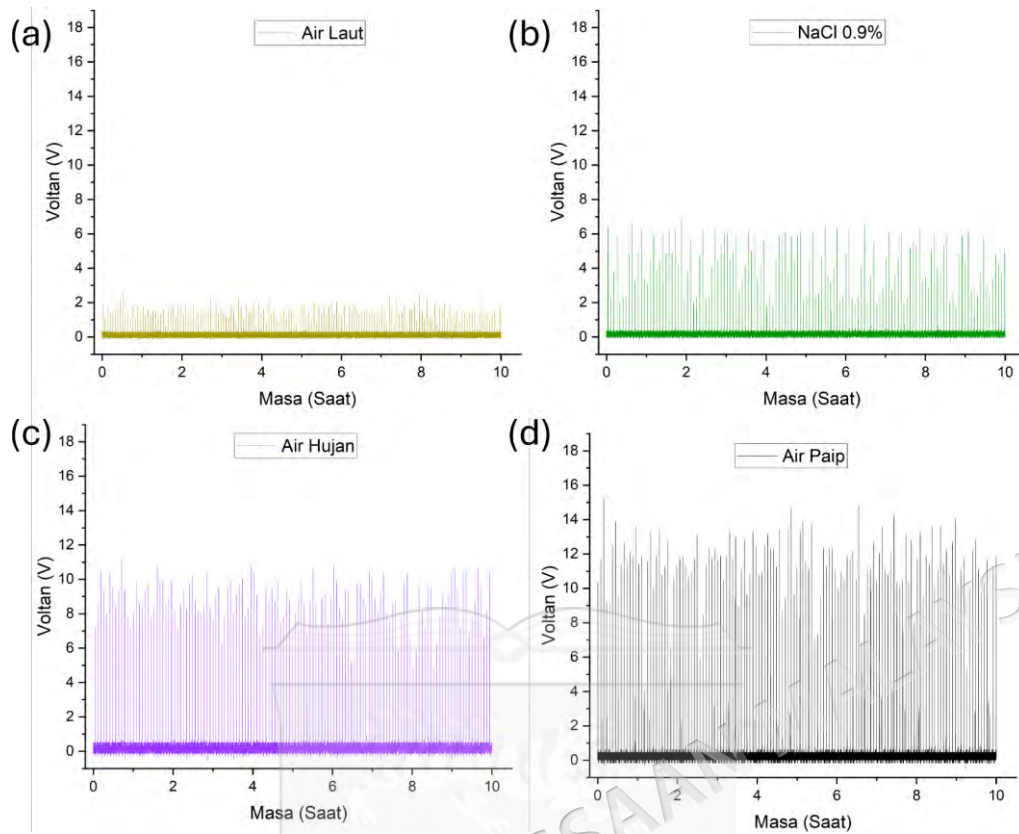
Seterusnya, ujian XRF pada air hujan pula menunjukkan terdapat kepekatan komposisi unsur kuprum (Cu) dan (timah) Sn yang rendah. Kehadiran usur Cu yang

terdapat pada air hujan adalah disebabkan oleh pencemaran industri dan hujan asid. Manakala, kehadiran Sn pula disebabkan oleh pelepasan idustri dan kakisan pada logam. Dapatan ini selari dengan dapatan daripada kajian yang telah dilakukan oleh Ongetta et al. (2025) yang mengkaji unsur yang terdapat pada air hujan di malaysia. Sehubungan itu, air hujan juga mempunyai kadar ketulinan air yang tertinggi iaitu pada 100%, ini menunjukkan bahawa kandungan air hujan adalah medium air terbersih berbanding medium air yang lain. Ujian XRF pada larutan NaCl 0.9% menunjukkan kepekatan klorida (Cl) yang tinggi, iaitu 5680 ppm, serta kandungan natrium (Na) yang terkawal pada 1.89% jisim. Selain itu, terdapat juga unsur lain seperti Si dan Al, namun pada kepekatan yang rendah. Kandungan air (H_2O) yang diperoleh juga sedikit lebih rendah berbanding air hujan dan air paip, iaitu pada 97.5%.

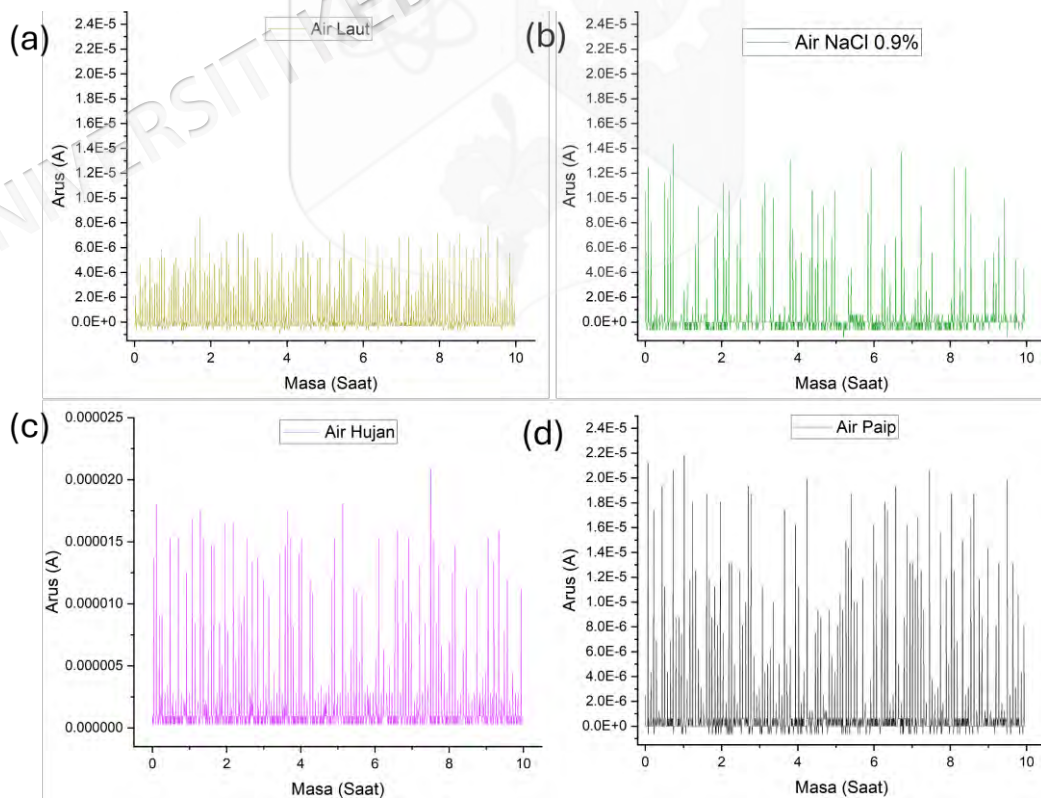
Akhir sekali, ujian XRF pada air laut menunjukkan bahawa air laut mengandungi pelbagai mineral dalam kepekatan tinggi, seperti magnesium (Mg), kalium (K), kalsium (Ca), bromin (Br), dan sulfur (S). Kehadiran mineral-mineral ini menyebabkan pengurangan kandungan air (H_2O), yang dicatatkan pada 93.4%, disebabkan oleh kepekatan garam terlarut yang tinggi. Air laut juga mencatatkan peratusan natrium sebanyak 4.91% jisim dan klorida sebanyak 1.27% jisim. Ujian XRF ini menunjukkan perbezaan ketara dalam komposisi unsur antara setiap sampel air yang digunakan. Pengetahuan ini penting untuk mengenal pasti unsur yang berpotensi mempengaruhi kadar penjanaan tenaga untuk aplikasi peranti TENG yang dihasilkan.

5.8.2 Ujian Triboelektrik Terhadap Medium Air Yang Berbeza

Kajian ini telah menguji empat jenis medium air iaitu air paip, air hujan, air NaCl 0.9% dan air laut dengan menggunakan peranti yang menggabungkan struktur tiang mikro serta salutan PTFE/MXene 0.01wt%. Ujian triboelektrik dijalankan pada ketinggian 9 cm dari sumber air dengan sudut 135° semasa pengujian dilakukan. Kadar aliran air yang digunakan dalam kajian ini ialah 70 mL/min, dan data diambil dalam masa 10 saat. Semua medium air diuji dengan menggunakan parameter yang sama. Rajah 5.20 menunjukkan corak penjanaan voltan yang diperoleh bagi setiap medium air yang berbeza, manakala Rajah 5.21 menunjukkan corak penjanaan arus bagi setiap medium air yang berbeza. Jadual 5.4 pula menunjukkan purata penjanaan voltan, arus dan kuasa yang terhasil daripada ujian triboelektik terhadap medium air yang diuji.



Rajah 5.20 Keputusan ujian penjaan voltan pada medium air yang berbeza (a) air laut, (b) NaCl 0.9%, (c) air hujan dan (d) air paip



Rajah 5.21 Keputusan ujian penjaan arus pada medium air yang berbeza (a) air laut, (b) NaCl 0.9%, (c) air hujan, dan (d) air paip

Jadual 5.4 kesan penjanaan voltan, arus dan kuasa terhadap medium air yang berbeza

Medium air	Purata voltan (V)	Purata arus (μA)	Purata Kuasa (μW)
Air Laut	2.72	8.4	0.88
Air NaCl 0.9%	7.06	15.6	3.04
Air Hujan	13.5	20.6	5.30
Air Paip	16.4	22.5	6.33

Berdasarkan keputusan ujian triboelektrik yang diperoleh, dapat dilihat bahawa air paip mampu memberikan kadar purata penjanaan voltan, arus dan kuasa tertinggi berbanding medium air yang lain. Medium air paip mampu memberikan purata penjanaan voltan dan arus setinggi 16.4 V dan 22.5 μA . Selain itu, purata penjanaan kuasa yang diperoleh juga merupakan purata penjanaan kuasa tertinggi dengan memperoleh purata kuasa pada 6.33 μW . Prestasi penjanaan ini di ikuti oleh medium air hujan dengan memperoleh purata penjanaan voltan dan arus sebanyak 13.5 V dan 20.6 μA . Seterusnya, purata penjanaan kuasa yang dihasilkan pula adalah pada 5.30 μW . Keputusan ini menunjukkan terdapat penurunan penjanaan voltan, arus dan kuasa apabila medium air hujan telah digunakan. Fenomena ini disebabkan oleh perbezaan komposisi dan pengaliran unsur ion yang terdapat pada medium air yang digunakan (Nguyen et al. 2022).

Pengurangan purata penjanaan tenaga daripada medium air hujan adalah disebabkan oleh air hujan mempunyai kadar ketulenan air yang tinggi seperti yang ditunjukkan pada keputusan FTIR pada bahagian 5.8.1. Air yang mempunyai ketulenan yang lebih tinggi telah menyebabkan pengurangan ion pada medium air yang secara langsung akan mengurangkan kadar pemindahan cas daripada air kepada peranti TENG yang dihasilkan. Perkara ini akan menyebabkan kadar penjanaan tenaga menjadi lebih rendah berbanding medium air paip yang mempunyai ion yang lebih tinggi (Helseth 2023). Sehubungan itu, pencemaran atau kekotoran yang disebabkan oleh gas terlarut di dalam air hujan seperti Sn dan Cu juga mampu menyebabkan kesan yang tidak di ingini pada permukaan peranti TENG ketika ujian titisan air dilakukan dan mengganggu kadar pemindahan cas.

Manakala, air paip pula kebiasanya telah di rawat menyebabkannya mengadungi tahap kadungan komposisi mineral dan ion yang lebih terkawal (Shima et al. 2023). Keputusan XRF menunjukkan air paip mempunyai ion seperti Na^+ , dan Cl^- yang lebih tinggi berbanding air hujan. Dalam TENG, kandungan ion memainkan peranan yang penting dalam kadar pemindah cas diantara cecair dan permukaan peranti. Perkara ini disebabkan oleh ion dapat mempengaruhi interaksi elektrostatik dimana kepekatan ion yang lebih tinggi membolehkan pemindahan cas dan penghantaran elektron dapat berlaku dengan lebih mudah. Hal ini menyebabkan peningkatan ketumpanan cas dan memberikan kadar penjanaan triboelektrik yang lebih baik. Walau bagaimanapun, kandungan ion yang berlebihan juga boleh mengurangkan kadar penjanaan tenaga (Chi et al. 2022).

Perkara ini dapat dilihat melalui ujian triboelektrik yang dijalankan pada medium air NaCl 0.9% dan air laut. Medium air ini mempunyai kadar ion yang berlebihan dan mempunyai ciri air yang sangat konduktif. Pengurangan penjanaan triboelektrik berlaku apabila kandungan ion yang berlebihan menyebabkan pelepasan cas yang cepat melalui medium air yang digunakan, seterusnya mengurangkan kecekapan pemindahan cas pada permukaan peranti. Keadaan ini mengakibatkan pengumpulan cas yang kurang efektif dan menyebabkan penurunan pada kadar penjanaan voltan, arus, dan kuasa (Mao et al. 2024). Fenomena ini dapat dilihat berdasarkan keputusan penjanaan tenaga yang diperoleh daripada ujian terhadap medium air laut dan air NaCl 0.9%. Kedua-dua medium ini telah memberikan pengurangan yang ketara dalam kadar penjanaan triboelektrik. Medium air NaCl 0.9% hanya memperoleh purata penjanaan voltan, arus dan kuasa pada 7.06 V, 15.6 μA dan 3.04 μW . Sementara itu, air laut mencatatkan kadar penjanaan triboelektrik yang terendah dengan hanya memperoleh kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa pada 2.72 V, 8.4 μA , dan 0.88 μW .

Kadungan ion yang tinggi pada medium air NaCl 0.9% dan air laut dapat di buktikan melalui keputusan pencirian XRF yang diperoleh. Keputusan menunjukkan kandungan paras ion Na^+ dan Cl^- yang terdapat pada air laut dan NaCl 0.9% jauh lebih tinggi berbanding air paip dan air hujan. Pergerakan ion bebas yang tinggi boleh menyebabkan peneutralan cas berlaku dengan lebih mudah dan menyebabkan pengurangan kesan triboelektrik (Shima et al. 2023). Kadungan ion yang lebih rendah

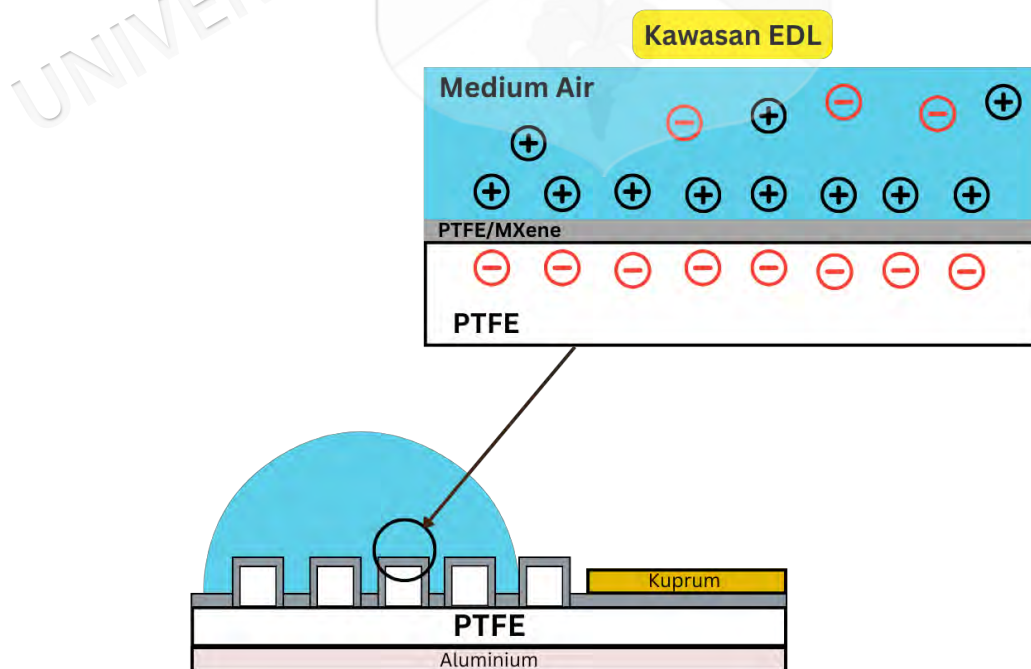
seperti yang terdapat pada air paip dan air hujan membolehkan pengekaln dan pemindahan cas dapat berlaku dengan lebih baik (Dong et al. 2022). Selain itu, sifat konduktif yang terdapat pada medium air juga dapat mempengaruhi prestasi penjanaan tenaga. Sifat koduktif yang tinggi seperti yang terdapat pada air laut dapat mengganggu tikh laku kapasitif pada peranti TENG yang dihasilkan. Sifat koduktif yang tinggi pada medium air boleh menyebabkan pemisahan cas yang cepat berlaku kerana ion dalam larutan mudah untuk mengagihkan semula dan meneutralkan perbezaan potensi. Hal ini akan menyebabkan pengurangan dalam pengumpulan cas dan menyebabkan kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih rendah (Chung et al. 2021).

Akhir sekali, air laut mempunyai kadar penjanaan triboelektrik yang terendah disebabkan oleh terdapat unsur yang tidak diingini di dalam medium air laut dan kandungan ion yang tinggi. Pencirian XRF yang dijalankan pada air laut menunjukkan terdapat pelbagai jenis mineral asing dengan kepekatan ion yang tinggi seperti magnesium (Mg), kalium (K), kalsium (Ca), bromin (Br), dan sulfur (S) yang berpotensi kesan daripada pencemaran yang terdapat pada air laut yang diambil. Kesan pencemaran boleh menjejaskan kadar penjanaan tenaga pada peranti TENG kerana kekotoran yang terbentuk di permukaan bertindak sebagai lapisan pelindung yang mengurangkan kecekapan pemindahan cas, lalu menyebabkan penjanaan tenaga tidak berlaku dengan efisien (Zheng et al. 2023).

Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa perbezaan medium air mampu mempengaruhi kadar penjanaan triboelektrik pada peranti TENG. Perbezaan nilai voltan dan arus yang terhasil berlaku kerana setiap jenis air mempunyai kandungan ion yang berbeza. Kesan triboelektrik yang baik dapat meningkatkan proses pengumpulan dan pemisahan cas pada permukaan bahan. Keadaan ini membantu menghasilkan penjanaan tenaga yang lebih tinggi. Perkara ini dapat dijelaskan melalui pembentukan lapisan dwi-elektrik (EDL) pada permukaan TENG ketika air bersentuhan dengan substrat peranti. Kandungan ion dalam air dapat mempengaruhi struktur dan ketebalan EDL yang terhasil (Jimidar et al. 2023). Faktor ini seterusnya menentukan jumlah cas yang dapat terbentuk pada permukaan. Hubungan antara kandungan ion, pembentukan EDL dan ketumpatan cas triboelektrik dapat diterangkan melalui persamaan ketumpatan cas triboelektrik efektif seperti berikut:

$$\sigma_{eff} = \sigma_0(1 - \theta) \quad \dots(5.1)$$

Di dalam persamaan tersebut, σ_0 merujuk kepada ketumpatan cas sebenar yang dijana pada permukaan PTFE, manakala θ merupakan faktor penyaringan oleh ion dalam larutan (Zheng et al. 2016). Peningkatan jumlah ion di dalam air akan menyebabkan nilai σ_{eff} menjadi lebih kecil. Hal ini berlaku kerana ion-ion dalam larutan akan menutupi cas negatif pada permukaan PTFE melalui pembentukan lapisan dwi-elektrik (EDL) yang padat (Wu et al. 2023). Rajah 5.22 menunjukkan ilustrasi pembentukan EDL di antara permukaan peranti TENG dan titisan air. Berdasarkan keputusan eksperimen, air paip menghasilkan penjanaan tenaga tertinggi, diikuti oleh air hujan, larutan NaCl 0.9%, dan air laut. Air paip mempunyai kepekatan ion yang sederhana, menyebabkan pembentukan EDL yang seimbang dan dapat bertindak balas dengan cepat terhadap perubahan cas pada permukaan. Keadaan ini menghasilkan proses polarisasi yang kuat dan akhirnya meningkatkan penghasilan tenaga (Lin et al. 2013). Sebaliknya, air hujan menunjukkan penjanaan tenaga yang lebih rendah kerana air hujan hampir tidak mengandungi ion. Ketiadaan ion menyebabkan EDL yang terbentuk menjadi sangat lemah, seterusnya mengurangkan kekuatan polarisasi. EDL dan polarisasi yang lemah akan menghasilkan elektrostatis teraruh yang rendah, dan ini membawa kepada penurunan kecekapan penjanaan tenaga (Palsaniya et al. 2022).



Rajah 5.22 Pembentukan EDL diantara permukaan TENG dan Medium air

Bagi air laut dan larutan NaCl 0.9%, kepekatan ion yang sangat tinggi boleh mengganggu proses penjanaan tenaga. Kandungan ion yang berlebihan ini menyebabkan nilai σ_{eff} menurun dan seterusnya menghasilkan kadar penjanaan yang lebih rendah. Dalam larutan NaCl 0.9%, kehadiran ion Na^+ dan Cl^- pada kepekatan tinggi menghasilkan pembentukan EDL yang sangat nipis. Keadaan ini membawa kepada berlakunya kesan penyaringan (*screening effect*) pada permukaan PTFE dengan cepat. Kesan penyaringan merujuk kepada fenomena di mana ion-ion berlebihan dalam medium menutupi cas triboelektrik pada permukaan dan melemahkan medan elektrik teraruh yang sepatutnya terbentuk (Zhao, Liu, et al. 2020). Akibatnya, medan elektrik tidak dapat berkembang dengan efektif, dan hal ini menyebabkan penurunan ketara pada voltan dan arus yang dihasilkan oleh peranti TENG untuk medium air NaCl 0.9%.

Begitu juga dengan air laut yang mempunyai kepekatan ion lebih tinggi. Keadaan ini meningkatkan kesan penyaringan dan menghasilkan lapisan dwi-elektrik (EDL) yang lebih padat. EDL yang padat mengurangkan tahap polarisasi pada permukaan. Akibatnya, output penjanaan tenaga menjadi paling rendah berbanding medium air lain kerana penjanaan cas triboelektrik tidak berlaku dengan berkesan (Lin et al. 2013). Secara keseluruhan, dapatan ini menunjukkan peranti yang dihasilkan ini sesuai diaplikasikan pada persekitaran yang terdedah pada persekitaran NaCl 0.9%, air hujan dan air paip bagi memperoleh kadar penjanaan voltan, arus dan kuasa yang lebih baik dan efisien. Hal ini disebabkan oleh keadaan persekitaran ini mampu memberikan kadar penjanaan yang lebih efektif berbanding persekitaran seperti pada air laut yang kadar penjanaanya adalah rendah.

5.9 PERBANDINGAN PRESTASI PENJANAAN TENAGA DENGAN KAJIAN LEPAS

Peranti TENG dengan penggabungan salutan PTFE/MXene dan struktur biomimetik yang dihasilkan menunjukkan prestasi yang memberangsangkan. Prestasi yang dicapai adalah setanding dengan sistem TENG berasaskan titisan air lain yang telah dilaporkan, seperti yang diringkaskan dalam Jadual 5.5. Peranti ini mampu menjana purata voltan sebanyak 14.2 V dan purata arus 20.2 μA , menandakan potensinya yang baik untuk aplikasi penuaian tenaga berasaskan titisan air. Walaupun voltan yang dijana adalah lebih rendah berbanding kajian permukaan PTFE berstruktur laser oleh kajian Zhang et

al. (2023), peranti ini menghasilkan arus yang lebih tinggi serta menunjukkan keupayaan untuk berfungsi dalam pelbagai medium air. Ciri-ciri ini membuktikan bahawa peranti yang dibangunkan bukan sahaja berprestasi baik, malah serba boleh dalam aplikasi sebenar. Selain itu, pendekatan fabrikasi yang digunakan dalam kajian ini menawarkan beberapa kelebihan yang ketara, termasuk kos penghasilan yang rendah, proses yang mudah serta potensi skalabiliti yang tinggi. Faktor-faktor ini menjadikannya satu kaedah pembangunan peranti TENG yang lebih praktikal, efisien dan mampan.

Jadual 5.5 Rinkasan dan perbandingan tenaga triboelektrik dan kaedah penjanaannya melalui titisan air

Peranti/Rujukan	Titisan air/Keadaan diuji	Purata voltan	Purata Arus
Kajian ini (Peranti TENG dengan pengabungan rawatan permukaan salutan 0.01wt% PTFE/MXene dan struktur biomimetik)	Aliran titisan air berterusan dengan kadar aliran 70 mL/min, diameter titisan 0.5 mm, dan ketinggian jatuhan 9 cm.	~16.4 V	~22.5 μ A
Prototaip TENG dengan struktur hierarki superhidrofobik telah direka menggunakan teknik letupan pasir pada kerajang aluminium (Lin, Cheng, Lee, et al. 2014).	Titisan air bersaiz 30 μ L setiap satu dilepaskan dari ketinggian 90 cm menggunakan pam picagari yang telah diprogramkan.	~9.3 V	~17 μ A
Penjana nano triboelektrik cecair-cecair menggunakan membran cecair yang digantung (Nie et al. 2019).	Kadar aliran air dikekalkan pada 10 mL/s, dengan penambahan 1 mL larutan tambahan setiap 5 minit.	~4 V	~0.06 μ A
Permukaan PTFE yang berstruktur laser digunakan untuk meningkatkan prestasi triboelektrik (Zhang et al. 2023)	Titisan air dihasilkan menggunakan pam picagari perubatan dan tiub plastik, dengan isipadu setiap titisan disesuaikan mengikut diameter tiub.	~63 V	~3.2 μ A

5.10 RUMUSAN

Secara keseluruhan, dapatan kajian ini menunjukkan struktur biomimetik yang dihasilkan dengan menggunakan kaedah pemesinan CNC mampu meningkatkan luas permukaan peranti TENG dan sifat hidrofobik. Penemuan ini dapat dibuktikan melalui teori pengiraan luas permukaan dan ujian sudut sentuhan. Hasil pengiraan menunjukkan

struktur tiang mikro telah memperoleh luas permukaan yang lebih tinggi berbanding permukaan struktur alur. Sehubungan itu, peningkatan sifat hidrofobik dibuktikan melalui ujian sudut sentuhan, di mana terdapat peningkatan yang signifikan diantara tanpa struktur dan berstruktur biomimetik. Struktur tiang mikro menunjukkan peningkatan sudut sentuhan yang paling tinggi, iaitu sebanyak 17.2%, berbanding struktur alur yang hanya mencatatkan peningkatan sebanyak 10.3%. Selain itu, sifat interaksi air turut menunjukkan bahawa struktur biomimetik yang dihasilkan mempamerkan keadaan *Wenzel* dalam interaksi dengan air. Sifat *Wenzel* yang terbentuk adalah penting untuk peranti TENG kerana ia membantu memastikan interaksi antara titisan air dan permukaan TENG berlaku dengan lebih efisien. Pengaruh luas permukaan, sifat hidrofobik dan sifat interaksi air *Wenzel* terhadap ciri penjanaan telah dibuktikan melalui ujian triboelektrik. Ujian penjanaan menunjukkan struktur tiang mikro memperoleh kadar penjanaan tertinggi iaitu pada 10.8 V (purata voltan), 13.7 μA (purata arus), dan 2.35 μW (purata kuasa). Berdasarkan dapatan ini, struktur biomimetik yang dihasilkan didapati mampu meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik pada peranti TENG, seterusnya menyumbang kepada peningkatan penjanaan tenaga melalui titisan air. Hasil ini menunjukkan bahawa objektif kedua kajian telah berjaya dicapai, iaitu memfabrikasi struktur biomimetik pada permukaan PTFE untuk meningkatkan luas permukaan peranti serta menilai penjanaan voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan.

Seterusnya, bagi mencapai objektif ketiga kajian, prestasi penjanaan terbaik yang dihasilkan melalui salutan PTFE/MXene (0.01wt% MXene) dan struktur biomimetik (struktur tiang mikro) telah digabungkan. Hasil penggabungan ini menunjukkan peningkatan yang lebih memberangsangkan berbanding rawatan permukaan secara individu (salutan PTFE/MXene atau struktur biomimetik sahaja), khususnya dari segi peningkatan sudut sentuhan dan penjanaan tenaga. Selain itu, penjanaan tenaga yang diperoleh turut menunjukkan prestasi terbaik dalam keseluruhan kajian, dengan purata voltan 16.4 V, purata arus 22.5 μA dan purata kuasa 6.33 μW . Dapatan ini membuktikan bahawa kaedah penggabungan rawatan permukaan mampu menghasilkan peningkatan penjanaan kuasa tertinggi, iaitu sebanyak 276.79% berbanding permukaan tanpa rawatan. Peranti dengan penggabungan ini turut diuji menggunakan medium air yang berbeza bagi mengenal pasti persekitaran yang paling

sesuai untuk pengaplikasian peranti TENG yang dihasilkan. Keputusan ujian menunjukkan bahawa peranti TENG yang dihasilkan berupaya berfungsi dengan baik dalam persekitaran yang terdedah kepada larutan NaCl 0.9%, air hujan dan air paip, bagi mencapai prestasi penjanaan tenaga yang lebih efisien berbanding persekitaran air laut yang menunjukkan kecekapan yang lebih rendah. Secara keseluruhan, peranti TENG yang dihasilkan menunjukkan prestasi yang sangat memberangsangkan, dan tahap penjanaan tenaganya juga kompetitif apabila dibandingkan dengan kajian peranti TENG berasaskan titisan air yang lain. Oleh itu, dapatan ini membuktikan bahawa objektif ketiga kajian telah berjaya dicapai, iaitu menilai prestasi elektrik penjana nano triboelektrik bagi ujian titisan air paip, air laut, larutan NaCl 0.9%, dan air hujan pada permukaan peranti yang dibangunkan melalui gabungan struktur pemesian mikro dan lapisan komposit PTFE/MXene.



BAB VI

KESIMPULAN DAN CADANGAN

6.1 KESIMPULAN

Secara umumnya, pembangunan peranti TENG berasaskan titisan air dengan salutan MXene dan penstrukturan mikro biomimetik seperti yang dicadangkan di dalam kajian ini telah berjaya di hasilkan dan telah memberikan prestasi penjanaan voltan, arus dan kuasa yang sangat memberangsangkan. Peranti yang terbaik tanpa sebarang rawatan telah difabrikasi dengan menggunakan kaedah konfigurasi elektrod secara sandwic, kombinasi elektrod Al-Cu pada saiz 2 mm dan PTFE berketebalan 1 mm. Konfigurasi ini mampu memberikan kadar penjanaan sebanyak 8.81 V (purata voltan), 11.6 μ A (purata arus) dan 1.68 μ W (purata kuasa). Namun, kehadiran MXene telah mempertingkatkan lagi kadar penjanaan pada peranti yang dihasilkan. Kajian ini mendapati penggunaan MXene pada komposisi 0.01wt% telah memberikan kadar penjanaan yang terbaik dengan memperoleh kadar penjanaan sebanyak 14.2 V (purata voltan), 19.1 μ A (purata arus) dan 4.56 μ W (purata kuasa). Keputusan ujian ini menunjukkan terdapat 171.43% peningkatan pada penjanaan kuasa dengan kehadiran salutan PTFE/MXene. Walau bagaimanapun, penggunaan MXene secara optimum dalam komposit salutan perlu di kawal kerana penggunaan secara berlebihan boleh menyebabkan pengurangan dalam prestasi penjanaan tenaga. Berdasarkan daripada dapatan ini, penggunaan MXene sebagai salutan peranti TENG dapat mempengaruhi prestasi penjanaan tenaga dan penggunaan yang optimum dapat memberikan prestasi penjanaan yang lebih baik.

Selain daripada salutan, mengfabrikasi struktur mikro biomimetik pada permukaan peranti TENG yang dihasilkan juga mampu mempertingkatkan kadar penjanaan tenaga. Dua struktur biomimetik yang dihasilkan iaitu struktur mikro alur dan struktur tiang mikro telah memberikan peningkatan pada sifat hidrofobik dan

prestasi penjanaan. Struktur ini telah memberikan peningkatan pada sifat hidrofobik dan penjanaan tenaga dengan meningkatkan luas permukaan pada permukaan peranti. Kajian ini mendapat struktur tiang mikro telah memberikan peningkatan yang terbaik berbanding struktur alur, di mana ia telah memberikan peningkatan pada luas permukaan sebanyak 47.03% dan peningkatan pada sifat hidrofobik sebanyak 17.2%. Ciri interaksi air yang diperoleh juga mempunyai ciri *Wenzel* yang merupakan ciri yang baik dalam membantu penjanaan tenaga. Kesemua kelebihan ini telah membantu struktur biomimetik tiang mikro meningkatkan kadar penjanaan tenaga dengan memperoleh 10.8V (purata voltan), 13.7 μ A (purata arus) dan 2.35 μ W (purata kuasa). Data ini menunjukkan terdapat 40% peningkatan dalam penjanaan tenaga dengan kehadiran struktur biomimetik tiang mikro. Penemuan daripada fasa ini menunjukkan bahawa struktur biomimetik yang dihasilkan telah meningkatkan luas permukaan dan sifat hidrofobik pada permukaan peranti, yang seterusnya menyumbang kepada peningkatan penjanaan tenaga bagi peranti TENG yang dihasilkan.

Dapatan daripada kajian kedua-dua rawatan permukaan, iaitu salutan PTFE/MXene dan struktur biomimetik, telah mendorong kepada penggabungan kedua-dua kaedah ini ke dalam satu peranti TENG bagi menghasilkan reka bentuk akhir yang mengandungi kedua-dua ciri utama tersebut. Salutan PTFE/MXene 0.01wt% telah digabungkan dengan struktur tiang mikro kerana kedua parameter ini telah memberikan prestasi penjanaan yang terbaik dalam kajian ini berbanding parameter yang lain. Hasil penggabungan mendapati terdapat peningkatan yang memberangsangkan berbanding kaedah rawatan permukaan secara individu. Penggabungan ini telah meningkatkan sifat hidrofobik peranti sebanyak 22.54% dan menghasilkan penjanaan tenaga dengan purata voltan 16.4 V, purata arus 22.5 μ A, serta purata kuasa 6.33 μ W. Hasil ini menunjukkan peningkatan sebanyak 276.79% dalam kadar penjanaan tenaga dan merupakan nilai tertinggi berbanding kaedah rawatan individu yang lain. Kadar penjanaan tenaga yang terbaik melalui kaedah penggabungan ini menjadikannya peranti pilihan bagi menjalani ujian terhadap 4 medium air yang berbeza. Hasil ujian mendapati air hujan, air paip dan air NaCl 0.9% merupakan persekitaran yang baik untuk mengaplikasikan peranti ini kerana ia mampu mendapatkan kadar penjanaan yang efisien berbanding pada persekitaran seperti air laut. Dapatan daripada kajian ini menunjukkan bahawa peranti TENG yang menggabungkan struktur mikro hasil pemesinan dan salutan PTFE/MXene

telah berjaya dihasilkan. Reka bentuk ini memberikan prestasi penjanaan tenaga yang memberangsangkan serta berpotensi untuk diaplikasikan dalam pelbagai jenis persekitaran. Secara keseluruhan, implikasi daripada kajian ini menunjukkan bahawa teknologi TENG berasaskan titisan air berpotensi menjadi alternatif kepada sumber tenaga bersih seperti tenaga suria, angin dan hidrogen. Selain itu, teknologi ini juga sesuai diaplikasikan dalam peranti berskala kecil yang menggunakan titisan air sebagai sumber tenaga semula jadi. Walau bagaimanapun, kajian lanjutan seperti yang dicadangkan dalam Bahagian 6.2 masih diperlukan bagi mencapai kadar penjanaan tenaga yang lebih tinggi.

6.2 SUMBANGAN KAJIAN TERHADAP BIDANG PENJANA NANO TRIBOELEKTRIK TITISAN AIR

Kajian ini memberikan sumbangan yang signifikan dalam pembangunan penjana nano triboelektrik berasaskan titisan air melalui pengenalan kaedah fabrikasi baharu yang mudah dan berkos rendah. Pendekatan yang dicadangkan menggunakan PTFE sebagai substrat serta MXene yang bersifat hidrofobik sebagai bahan salutan bagi meningkatkan prestasi penjanaan tenaga. Sumbangan utama kajian ini terletak pada pengenalan pendekatan dwi-strategi yang menggabungkan penggunaan bahan nano konduktif MXene hidrofobik sebagai salutan dan penghasilan struktur biomimetik pada permukaan substrat. Gabungan ini berkesan dalam meningkatkan pemindahan serta pengekalan cas triboelektrik. Penggunaan MXene sebagai bahan pengisi hidrofobik dalam salutan bagi aplikasi TENG berasaskan titisan air masih kurang dilaporkan dalam kajian terdahulu dan menawarkan perspektif baharu dalam reka bentuk bahan triboelektrik. Selain itu, kajian ini menunjukkan bahawa peranti bersaiz kecil mampu mencapai prestasi penjanaan tenaga yang memberangsangkan, serta mempunyai potensi untuk diskalakan kepada aplikasi berskala lebih besar. Penilaian prestasi peranti dalam pelbagai medium air sebenar turut memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap pengaruh kandungan ion terhadap prestasi TENG titisan air, yang masih kurang diterokai secara sistematik dalam kajian sedia ada. Secara keseluruhan, penemuan kajian ini menyumbang kepada pembangunan reka bentuk peranti triboelektrik berasaskan titisan air yang lebih cekap, mampan, dan mesra aplikasi untuk penuaian tenaga pada masa hadapan.

6.3 CADANGAN KAJIAN LANJUTAN

Secara keseluruhan, kajian ini telah berjaya mencapai objektif kajian iaitu mengkaji sifat elektrik penjana nano triboelektrik titisan air dengan struktur tiang mikro lapisan campuran PTFE-MXene bagi tujuan penuaian tenaga elektrik. Kejayaan kajian tesis ini membuka jalan kepada kajian lanjutan dalam penjana nano triboelektrik. Memandangkan kajian yang dijalankan di dalam tesis ini terdapat penemuan yang baharu, maka terdapat parameter-parameter lanjutan yang boleh dikaji iaitu:

1. Mengoptimumkan peratusan MXene yang digunakan sebagai salutan bagi memperoleh penjanaan voltan, arus dan kuasa yang maksimum dengan menggunakan kaedah Taguchi.
2. Fabrikasi peranti TENG berasaskan titisan air pada sekala yang lebih besar berbanding ujian ini yang hanya menguji pada skala yang kecil. Pengskalaan yang lebih besar membolehkan penjaan tenaga berdasarkan triboelektrik yang lebih besar.
3. Menguji peranti yang dihasilkan dengan percambahan sumber titisan air yang digunakan untuk melihat kesan penambahan sumber titisan terhadap tenaga yang dihasilkan. Percambahan titisan air berkemungkinan memberikan penjanaan triboelektrik yang lebih tinggi yang disebabkan oleh lebih banyak air berinteraksi pada permukaan.
4. Penggunaan elektrod yang lebih kecil dan nipis seperti penghasilan elektrod dengan menggunakan keadah penyejatan haba bagi memperoleh permukaan interaksi yang lebih luas. Sehubungan itu, elektrod juga boleh dilakukan secara bersusun bagi meningkatkan kadar penghantaran cas pada elektrod.
5. Menggunakan bahan substrat yang lebih fleksibel untuk meningkatkan peranti TENG ini diaplikasikan pada pelbagai peranti atau persekitaran untuk penjanaan tenaga.

RUJUKAN

- Abdullah, M. L. & Nasir, A. 2022. Basic Statistics for Research: Theory and Practice. *Penerbit UMT, Kuala Nerus, Terengganu*
- Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Alhuyi Nazari, M., Ahmadi, M. A., Pourfayaz, F., Lorenzini, G. & Ming, T. 2019. Renewable Energy Harvesting with the Application of Nanotechnology: A Review. *International Journal of Energy Research* 43(4): 1387-1410.
- Ahmed, A. A., Abdullah, H. M., Qahtan, T. F., Muthalif, A. G., Nafea, M. & Ali, M. S. M. 2023. An Enhanced Distance-Dependent Electric Field Model for Contact-Separation Triboelectric Nanogenerator: Air-Breakdown Limit as a Case Study. *Nano Energy* 117(108836).
- Ahmed, N., Suhaimi, A., Masood, A., Mahmoudi, E., Siow, K. S. & Wee, M. M. R. 2023. Antimicrobial Property of Polyethersulfone (Pes) Membrane by Plasma Copolymerization of Teos and Oxazoline for Organic Dyes Filtration. *Results in Engineering* 19(101339).
- Akinaga, H. 2020. Recent Advances and Future Prospects in Energy Harvesting Technologies. *Japanese Journal of Applied Physics* 59(11): 110201.
- Aleksandrova, M., Kurtev, N. & Pandiev, I. 2024. Effect of Mxene Nanosheet Sticking on Supercapacitor Device Performance. *Applied Sciences* 14(6): 2452.
- Ameer, A., Al-Kabbany, A., Ali, W. & Hamdy, K. 2022. Influence of Surface Roughness on the Output Voltage of a Triboelectric Nanogenerator. *Journal of the Egyptian Society of Tribology* 19(3): 45-52.
- Anasori, B., Lukatskaya, M. R. & Gogotsi, Y. 2023. 2d Metal Carbides and Nitrides (Mxenes) for Energy Storage. Dlm. (pnyt.). *Mxenes*, hlm. 677-722. Jenny Stanford Publishing.
- Arutyunov, V. S. & Lisichkin, G. V. 2017. Energy Resources of the 21st Century: Problems and Forecasts. Can Renewable Energy Sources Replace Fossil Fuels. *Russian Chemical Reviews* 86(8): 777.
- Askari, H., Khajepour, A., Khamesee, M. B., Saadatnia, Z. & Wang, Z. L. 2018. Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators: Trends and Impacts. *Nano Today* 22(10-13).
- Attané, P., Girard, F. & Morin, V. 2007. An Energy Balance Approach of the Dynamics of Drop Impact on a Solid Surface. *Physics of Fluids* 19(1):
- Bai, Y., Jantunen, H. & Juuti, J. 2018. Energy Harvesting Research: The Road from Single Source to Multisource. *Advanced materials* 30(34): 1707271.
- Baranov, D., Lynch, M. J., Curtis, A. C., Carollo, A. R., Douglass, C. R., Mateo-Tejada, A. M. & Jonas, D. M. 2019. Purification of Oleylamine for Materials Synthesis and Spectroscopic Diagnostics for Trans Isomers. *Chemistry of Materials* 31(4): 1223-1230.
- Barraza, B., Olate-Moya, F., Montecinos, G., Ortega, J. H., Rosenkranz, A., Tamburrino, A. & Palza, H. 2022. Superhydrophobic Sla 3d Printed Materials Modified with Nanoparticles Biomimicking the Hierarchical Structure of a Rice Leaf. *Science and Technology of Advanced Materials* 23(1): 300-321.
- Berawi, F. M. 2017. *Metodologi Penyelidikan: Panduan Menulis Tesis* (Uum Press). UUM Press.
- Bhatta, T., Maharjan, P., Cho, H., Park, C., Yoon, S. H., Sharma, S., Salauddin, M., Rahman, M. T., Rana, S. S. & Park, J. Y. 2021. High-Performance Triboelectric

- Nanogenerator Based on Mxene Functionalized Polyvinylidene Fluoride Composite Nanofibers. *Nano Energy* 81(105670).
- Bhushan, B., Jung, Y. C. & Koch, K. 2009. Micro-, Nano-and Hierarchical Structures for Superhydrophobicity, Self-Cleaning and Low Adhesion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367(1894): 1631-1672.
- Bista, P., Ratschow, A. D., Butt, H.-J. R. & Weber, S. A. 2023. High Voltages in Sliding Water Drops. *The journal of physical chemistry letters* 14(49): 11110-11116.
- Chen, A., Zhang, C., Zhu, G. & Wang, Z. L. 2020. Polymer Materials for High-Performance Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Science* 7(14): 2000186.
- Chen, C., Chen, L., Wu, Z., Guo, H., Yu, W., Du, Z. & Wang, Z. L. 2020. 3d Double-Faced Interlock Fabric Triboelectric Nanogenerator for Bio-Motion Energy Harvesting and as Self-Powered Stretching and 3d Tactile Sensors. *Materials Today* 32(84-93).
- Chen, N., Li, H. N., Wu, J., Li, Z., Li, L., Liu, G. & He, N. 2021. Advances in Micro Milling: From Tool Fabrication to Process Outcomes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 160(103670).
- Chen, X., Liu, S., Yang, N., Yu, R. & Wang, D. 2023. Hierarchical Structure Regulation for Sequential Steps in Solar Vapor Generation. *EcoMat* 5(7): e12348.
- Cheng, T., Gao, Q. & Wang, Z. L. 2019. The Current Development and Future Outlook of Triboelectric Nanogenerators: A Survey of Literature. *Advanced Materials Technologies* 4(3): 1800588.
- Chi, J., Liu, C., Che, L., Li, D., Fan, K., Li, Q., Yang, W., Dong, L., Wang, G. & Wang, Z. L. 2022. Harvesting Water-Evaporation-Induced Electricity Based on Liquid-Solid Triboelectric Nanogenerator. *Advanced Science* 9(17): 2201586.
- Chia, H. L., Mayorga-Martinez, C. C. & Pumera, M. 2021. Doping and Decorating 2d Materials for Biosensing: Benefits and Drawbacks. *Advanced Functional Materials* 31(46): 2102555.
- Choi, D. & Kim, D. S. 2014. A Zeta (Z)-Pipet Tip to Reduce the Spontaneously Induced Electrical Charge of a Dispensed Aqueous Droplet. *Langmuir* 30(23): 6644-6648.
- Choi, D., Lee, H., Im, D. J., Kang, I. S., Lim, G., Kim, D. S. & Kang, K. H. 2013. Spontaneous Electrical Charging of Droplets by Conventional Pipetting. *Scientific reports* 3(1): 2037.
- Choi, D., Yoo, D., Cha, K. J., La, M. & Kim, D. S. 2017. Spontaneous Occurrence of Liquid-Solid Contact Electrification in Nature: Toward a Robust Triboelectric Nanogenerator Inspired by the Natural Lotus Leaf. *Nano Energy* 36(250-259).
- Chong, Y.-W., Ismail, W., Ko, K. & Lee, C.-Y. 2019. Energy Harvesting for Wearable Devices: A Review. *IEEE Sensors Journal* 19(20): 9047-9062.
- Chung, C. & Ke, K. 2020. High Contact Surface Area Enhanced Al/Pdms Triboelectric Nanogenerator Using Novel Overlapped Microneedle Arrays and Its Application to Lighting and Self-Powered Devices. *Applied Surface Science* 508(145310).
- Chung, J., Heo, D., Kim, B. & Lee, S. 2018. Superhydrophobic Water-Solid Contact Triboelectric Generator by Simple Spray-on Fabrication Method. *Micromachines* 9(11): 593.
- Chung, J., Heo, D., Shin, G., Chung, S.-H., Hong, J. & Lee, S. 2021. Water Behavior Based Electric Generation Via Charge Separation. *Nano Energy* 82(105687).

- Ciniero, A., Fatti, G., Marsili, M., Dini, D. & Righi, M. C. 2023. Defects Drive the Tribocharging Strength of Ptfе. *arXiv preprint arXiv:2304.14015*
- Cui, X., Yu, C., Wang, Z., Wan, D. & Zhang, H. 2022. Triboelectric Nanogenerators for Harvesting Diverse Water Kinetic Energy. *Micromachines* 13(8): 1219.
- Dai, Y. & Zhu, K. 2018. A Machine Vision System for Micro-Milling Tool Condition Monitoring. *Precision engineering* 52(183-191).
- Das, N., Sarkar, D., Sau, S., Ali, A., Mandal, S., Das, S., Ray, P. P. & Hoque, N. A. 2025. Wenzel Model Motivated, Superwetttable Micro-Motiffed Membrane for Droplet-Driven, Real-Time Acid Rain Sensor Via Sequential Contact Electrification Strategy. *Materials Today Energy* 101812.
- Dhanumalayan, E. & Joshi, G. M. 2018. Performance Properties and Applications of Polytetrafluoroethylene (Ptfе)—a Review. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 1(247-268).
- Dip, T. M., Arin, M. R. A., Anik, H. R., Uddin, M. M., Tushar, S. I., Sayam, A. & Sharma, S. 2023. Triboelectric Nanogenerators for Marine Applications: Recent Advances in Energy Harvesting, Monitoring, and Self-Powered Equipment. *Advanced Materials Technologies* 8(21): 2300802.
- Domingos, I., Neves, A. I., Craciun, M. F. & Alves, H. 2021. Graphene Based Triboelectric Nanogenerators Using Water Based Solution Process. *Frontiers in Physics* 9(742563).
- Dong, Y., Xu, S., Zhang, C., Zhang, L., Wang, D., Xie, Y., Luo, N., Feng, Y., Wang, N. & Feng, M. 2022. Gas-Liquid Two-Phase Flow-Based Triboelectric Nanogenerator with Ultrahigh Output Power. *Science advances* 8(48): eadd0464.
- Edler, F. & Lenz, E. 2012. Metrology for Energy Harvesting. *AIP Conference Proceedings*, hlm. 369-372.
- Fan, F. R., Wang, R., Zhang, H. & Wu, W. 2021. Emerging Beyond-Graphene Elemental 2d Materials for Energy and Catalysis Applications. *Chemical Society Reviews* 50(19): 10983-11031.
- Feng, H., Zhao, C., Tan, P., Liu, R., Chen, X. & Li, Z. 2018. Nanogenerator for Biomedical Applications. *Advanced Healthcare Materials* 7(10): 1701298.
- Gan, L., Jia, X., Fang, H., Liu, G. & Huang, Z. 2020. Dehydrogenation of Primary Alkyl Azides to Nitriles Catalyzed by Pincer Iridium/Ruthenium Complexes. *ChemCatChem* 12(14): 3661-3665.
- Gao, F., Zhang, Z., Liao, Q., Zhang, G., Kang, Z., Zhao, X., Xun, X., Zhao, Z., Xu, L. & Xue, L. 2019. A Universal Strategy for Improving the Energy Transmission Efficiency and Load Power of Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Energy Materials* 9(38): 1901881.
- Gao, Y., Liu, G., Bu, T., Liu, Y., Qi, Y., Xie, Y., Xu, S., Deng, W., Yang, W. & Zhang, C. 2021. Mxene Based Mechanically and Electrically Enhanced Film for Triboelectric Nanogenerator. *Nano Research* 14(12): 4833-4840.
- Ghidiu, M. & Barsoum, M. W. 2017. The {110} Reflection in X-Ray Diffraction of Mx Ene Films: Misinterpretation and Measurement Via Non-Standard Orientation. *Journal of the American Ceramic Society* 100(12): 5395-5399.
- Ghorbanzadeh, S. & Zhang, W. 2024. Advances in Mxene-Based Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy* 109558.
- Glavin, N. R., Rao, R., Varshney, V., Bianco, E., Apte, A., Roy, A., Ringe, E. & Ajayan, P. M. 2020. Emerging Applications of Elemental 2d Materials. *Advanced materials* 32(7): 1904302.

- Gong, X., Song, Y., Fu, C. & Li, H. 2023. Climate Risk and Stock Performance of Fossil Fuel Companies: An International Analysis. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money* 101884.
- Guerrero-Vacas, G., Fusco, S., Rodríguez-Valverde, M. Á. & Rodríguez-Alabanda, O. 2024. Manufacturing Hydrophobic Surfaces on Aluminium Substrates by Micro-Milling with End-Ball Nose Tools. *Journal of Manufacturing Processes* 124(24-37).
- Ha, J., Kim, S. & Kim, J.-B. 2017. Approximate Calculation of Triboelectric Charge Density (Σ) of Nanoscale Contact Electrification. *Integrated Ferroelectrics* 183(1): 171-175.
- Habib, T., Zhao, X., Shah, S. A., Chen, Y., Sun, W., An, H., Lutkenhaus, J. L., Radovic, M. & Green, M. J. 2019. Oxidation Stability of Ti₃C₂T_x Mxene Nanosheets in Solvents and Composite Films. *npj 2D Materials and Applications* 3(1): 8.
- Hadad, M., Bui, L. Q. & Nguyen, C. T. 2018. Experimental Investigation of the Effects of Tool Initial Surface Roughness on the Electrical Discharge Machining (Edm) Performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95(2093-2104).
- Han, X., Peng, L., Jiang, P., Wang, W., Jin, X., Wei, X., Wang, H. & Lin, T. 2024. Amplifying Electrical Outputs of Polyaniline-Based Schottky Dc Generators through Single Polarity Charge Injection. *Nano Energy* 119(109048).
- Hao, J., Liu, C., Li, Y., Liao, R., Liao, Q. & Tang, C. 2018. Preparation Nano-Structure Polytetrafluoroethylene (Ptfe) Functional Film on the Cellulose Insulation Polymer and Its Effect on the Breakdown Voltage and Hydrophobicity Properties. *Materials* 11(5): 851.
- Hasan, S., Kouzani, A. Z., Adams, S., Long, J. & Mahmud, M. P. 2022. Comparative Study on the Contact-Separation Mode Triboelectric Nanogenerator. *Journal of electrostatics* 116(103685).
- He, H., Lu, X., Hanc, E., Chen, C., Zhang, H. & Lu, L. 2020. Advances in Lead-Free Pyroelectric Materials: A Comprehensive Review. *Journal of Materials Chemistry C* 8(5): 1494-1516.
- Helseth, L. E. 2019. The Influence of Microscale Surface Roughness on Water-Droplet Contact Electrification. *Langmuir* 35(25): 8268-8275.
- Helseth, L. E. 2023. Ion Concentration Influences the Charge Transfer Due to a Water–Air Contact Line Moving over a Hydrophobic Surface: Charge Measurements and Theoretical Models. *Langmuir* 39(5): 1826-1837.
- Heo, D., Son, J. H., Hur, J., Yong, H., Cha, K., Hwang, P. T., Koo, B., Gwak, Y., Jin, Y. & Kim, D. 2024. Ultra-High Peak Power Generation for Rotational Triboelectric Nanogenerator Via Simple Charge Control and Boosted Discharge Design. *Advanced Functional Materials* 34(41): 2406032.
- Hosseini, S. M., Soleymani, M., Kelouwani, S. & Amamou, A. A. 2023. Energy Recovery and Energy Harvesting in Electric and Fuel Cell Vehicles, a Review of Recent Advances. *IEEE Access* 11(83107-83135).
- Hu, Z., Gong, S., Chen, J. & Guo, H. 2024. Energy Harvesting of Droplet-Based Triboelectric Nanogenerators: From Mechanisms toward Performance Optimizations. *DeCarbon* 5(100053).
- Huang, J., Zong, Y., Hu, K., Chen, W., Liu, Y., Chen, Z., Li, H. & Gui, C. 2024. Hydrophobic and Elastic Structural Triboelectric Materials Enabled by Template Method toward Real-Time Material Recognition. *ACS sensors* 9(11): 5945-5954.

- Ibragimova, R., Puska, M. J. & Komsa, H.-P. 2019. Ph-Dependent Distribution of Functional Groups on Titanium-Based Mxenes. *Acs Nano* 13(8): 9171-9181.
- Ismail, R. 2022. Metodologi Penyelidikan: Teori Dan Praktis. *Penerbit Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor*
- Jang, D., Kim, Y., Kim, T. Y., Koh, K., Jeong, U. & Cho, J. 2016. Force-Assembled Triboelectric Nanogenerator with High-Humidity-Resistant Electricity Generation Using Hierarchical Surface Morphology. *Nano Energy* 20(283-293).
- Jiang, C., Wu, C., Li, X., Yao, Y., Lan, L., Zhao, F., Ye, Z., Ying, Y. & Ping, J. 2019. All-Electrospun Flexible Triboelectric Nanogenerator Based on Metallic Mxene Nanosheets. *Nano Energy* 59(268-276).
- Jiao, P., Matin Nazar, A., Egbe, K.-J. I., Barri, K. & Alavi, A. H. 2022. Magnetic Capsulate Triboelectric Nanogenerators. *Scientific reports* 12(1): 89.
- Jimidar, I. S., Kwiecinski, W., Roozendaal, G., Kooij, E. S., Gardeniers, H. J., Desmet, G. & Sotthewes, K. 2023. Influence of Wettability and Geometry on Contact Electrification between Nonionic Insulators. *ACS Applied Materials & Interfaces* 15(35): 42004-42014.
- Jin, L., Zhang, B., Zhang, L. & Yang, W. 2019. Nanogenerator as New Energy Technology for Self-Powered Intelligent Transportation System. *Nano Energy* 66(104086).
- Jo, S., Kim, I., Byun, J., Jayababu, N. & Kim, D. 2021. Boosting a Power Performance of a Hybrid Nanogenerator Via Frictional Heat Combining a Triboelectricity and Thermoelectricity toward Advanced Smart Sensors. *Advanced Materials Technologies* 6(1): 2000752.
- Jo, S., Kim, I., Jayababu, N. & Kim, D. 2020. Performance-Enhanced Triboelectric Nanogenerator Based on the Double-Layered Electrode Effect. *Polymers* 12(12): 2854.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A. & Kim, K.-H. 2018. Solar Energy: Potential and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82(894-900).
- Kamilya, T., Sarkar, P. K. & Acharya, S. 2019. Unveiling Peritoneum Membrane for a Robust Triboelectric Nanogenerator. *ACS omega* 4(18): 17684-17690.
- Kang, Y., Hu, T., Wang, Y., He, K., Wang, Z., Hora, Y., Zhao, W., Xu, R., Chen, Y. & Xie, Z. 2023. Nanoconfinement Enabled Non-Covalently Decorated Mxene Membranes for Ion-Sieving. *Nature Communications* 14(1): 4075.
- Kato, A. N., Jiang, Y., Chen, W., Seto, R. & Li, T. 2023. How Surface Roughness Affects the Interparticle Interactions at a Liquid Interface. *Journal of Colloid and Interface Science* 641(492-498).
- Khan, K., Tareen, A. K., Aslam, M., Wang, R., Zhang, Y., Mahmood, A., Ouyang, Z., Zhang, H. & Guo, Z. 2020. Recent Developments in Emerging Two-Dimensional Materials and Their Applications. *Journal of Materials Chemistry C* 8(2): 387-440.
- Khandelwal, G., Maria Joseph Raj, N. P. & Kim, S. J. 2021. Materials Beyond Conventional Triboelectric Series for Fabrication and Applications of Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Energy Materials* 11(33): 2101170.
- Khandelwal, G., Raj, N. P. M. J. & Kim, S.-J. 2020. Triboelectric Nanogenerator for Healthcare and Biomedical Applications. *Nano Today* 33(100882).
- Kim, D. W., Lee, J. H., Kim, J. K. & Jeong, U. 2020. Material Aspects of Triboelectric Energy Generation and Sensors. *NPG Asia Materials* 12(1): 6.

- Kim, J., Lee, J. H., Ryu, H., Lee, J. H., Khan, U., Kim, H., Kwak, S. S. & Kim, S. W. 2017. High-Performance Piezoelectric, Pyroelectric, and Triboelectric Nanogenerators Based on P (Vdf-Trfe) with Controlled Crystallinity and Dipole Alignment. *Advanced Functional Materials* 27(22): 1700702.
- Kim, W.-G., Kim, D.-W., Tcho, I.-W., Kim, J.-K., Kim, M.-S. & Choi, Y.-K. 2021. Triboelectric Nanogenerator: Structure, Mechanism, and Applications. *Acs Nano* 15(1): 258-287.
- Kim, Y. J., Lee, J., Park, S., Park, C., Park, C. & Choi, H.-J. 2017. Effect of the Relative Permittivity of Oxides on the Performance of Triboelectric Nanogenerators. *RSC advances* 7(78): 49368-49373.
- Kishore, R. A. & Priya, S. 2018. A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices. *Materials* 11(8): 1433.
- Kronberg, B. 2016. The Hydrophobic Effect. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 22(14-22).
- Kulandaivel, A., Potu, S., Madathil, N., Velpula, M., Babu, A., Khanapuram, U. K. & Rajaboina, R. K. 2025. Magnetite Nanoparticles-Based Triboelectric Nanogenerators for Self-Powering Applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 36(8): 471.
- Kuo, C.-C. & Li, M.-R. 2016. A Cost-Effective Method for Rapid Manufacturing Sheet Metal Forming Dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85(9): 2651-2656.
- Kurapati, R., Kostarelos, K., Prato, M. & Bianco, A. 2016. Biomedical Uses for 2d Materials Beyond Graphene: Current Advances and Challenges Ahead. *Advanced materials* 28(29): 6052-6074.
- Kusior, A., Trenczek-Zajac, A., Mazurków, J., Michalec, K., Synowiec, M. & Radecka, M. 2022. Interface Design, Surface-Related Properties, and Their Role in Interfacial Electron Transfer. Part I: Materials-Related Topics. Dlm. (pnyt.). *Advances in Inorganic Chemistry*, 79. hlm. 377-413. Elsevier.
- Lee, J. B., Gwon, H. R., Lee, S. H. & Cho, M. 2010. Wetting Transition Characteristics on Microstructured Hydrophobic Surfaces. *Materials transactions* 51(9): 1709-1711.
- Lee, J. H., Kim, S., Kim, T. Y., Khan, U. & Kim, S.-W. 2019. Water Droplet-Driven Triboelectric Nanogenerator with Superhydrophobic Surfaces. *Nano Energy* 58(579-584).
- Lei, J.-C., Zhang, X. & Zhou, Z. 2015. Recent Advances in Mxene: Preparation, Properties, and Applications. *Frontiers of Physics* 10(276-286).
- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R., Haines, A. & Ramanathan, V. 2019. Effects of Fossil Fuel and Total Anthropogenic Emission Removal on Public Health and Climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(15): 7192-7197.
- Li, H., Feng, X. & Zhang, K. 2021. Study of the Classical Cassie Theory and Wenzel Theory Used in Nanoscale. *Journal of Bionic Engineering* 18(2): 398-408.
- Li, S., Huang, J., Chen, Z., Chen, G. & Lai, Y. 2017. A Review on Special Wettability Textiles: Theoretical Models, Fabrication Technologies and Multifunctional Applications. *Journal of Materials Chemistry A* 5(1): 31-55.
- Li, X., Wang, C., Cao, Y. & Wang, G. 2018. Functional Mxene Materials: Progress of Their Applications. *Chemistry—An Asian Journal* 13(19): 2742-2757.
- Li, Y., Zhou, X., Wang, J., Deng, Q., Li, M., Du, S., Han, Y.-H., Lee, J. & Huang, Q. 2017. Facile Preparation of in Situ Coated Ti₃C₂T_x/Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄

- Composites and Their Electromagnetic Performance. *RSC advances* 7(40): 24698-24708.
- Lian, Z., Xu, J., Ren, W., Wang, Z. & Yu, H. 2019. Bouncing Dynamics of Impact Droplets on the Biomimetic Plane and Convex Superhydrophobic Surfaces with Dual-Level and Three-Level Structures. *Nanomaterials* 9(11): 1524.
- Lin, Z.-H., Cheng, G., Lee, S., Pradel, K. C. & Wang, Z. L. 2014. Harvesting Water Drop Energy by a Sequential Contact-Electrification and Electrostatic-Induction Process. *Adv. mater* 26(27): 4690-4696.
- Lin, Z.-H., Cheng, G., Wu, W., Pradel, K. C. & Wang, Z. L. 2014. Dual-Mode Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Water Energy and as a Self-Powered Ethanol Nanosensor. *Acs Nano* 8(6): 6440-6448.
- Lin, Z. & Yang, Z. 2024. Water Droplet Energy Harvesting. *Droplet* 3(1): e97.
- Lin, Z., Zhang, B., Zou, H., Wu, Z., Guo, H., Zhang, Y., Yang, J. & Wang, Z. L. 2020. Rationally Designed Rotation Triboelectric Nanogenerators with Much Extended Lifetime and Durability. *Nano Energy* 68(104378).
- Lin, Z. H., Cheng, G., Lin, L., Lee, S. & Wang, Z. L. 2013. Water-Solid Surface Contact Electrification and Its Use for Harvesting Liquid-Wave Energy. *Angewandte Chemie* 125(48): 12372-12375.
- Liu, D., Zhou, L., Cui, S., Gao, Y., Li, S., Zhao, Z., Yi, Z., Zou, H., Fan, Y. & Wang, J. 2022. Standardized Measurement of Dielectric Materials' Intrinsic Triboelectric Charge Density through the Suppression of Air Breakdown. *Nature Communications* 13(1): 6019.
- Liu, L., Guo, X., Liu, W. & Lee, C. 2021. Recent Progress in the Energy Harvesting Technology—from Self-Powered Sensors to Self-Sustained Iot, and New Applications. *Nanomaterials* 11(11): 2975.
- Liu, L., Ying, G., Wen, D., Zhang, K., Hu, C., Zheng, Y., Zhang, C., Wang, X. & Wang, C. 2021. Aqueous Solution-Processed Mxene (Ti₃C₂Tx) for Non-Hydrophilic Epoxy Resin-Based Composites with Enhanced Mechanical and Physical Properties. *Materials & Design* 197(109276).
- Liu, X., Li, C., Yang, T., Yin, N. & Zhao, G. 2024. Induced Electric Field Intensity-Enhancing Water-Drop Triboelectric Nanogenerator. *Current Applied Physics* 57(65-69).
- Liu, Y., Ping, J. & Ying, Y. 2021. Recent Progress in 2d-Nanomaterial-Based Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Functional Materials* 31(17): 2009994.
- Liu, Y., Zheng, Y., Li, T., Wang, D. & Zhou, F. 2019. Water-Solid Triboelectrification with Self-Repairable Surfaces for Water-Flow Energy Harvesting. *Nano Energy* 61(454-461).
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Davis, S. J., Zheng, B., Wang, Y., Cui, D., Zhu, B., Dou, X. & Ke, P. 2020. Carbon Monitor, a near-Real-Time Daily Dataset of Global Co₂ Emission from Fossil Fuel and Cement Production. *Scientific data* 7(1): 392.
- Lohatepanont, M., Chen, M., Mendoza Nova, L. C., Murray, J.-T. & Merchan-Merchan, W. 2024. Exploring Microstructure Patterns: Influence on Hydrophobic Properties of 3d-Printed Surfaces. *Micro, hlm.* 442-459.
- Lu, L., Yao, W., Xie, Y., Li, K. & Wan, Z. 2021. Study on the Wettability of Biomimetic Stainless-Steel Surfaces Inspired by Bauhinia Linn. Leaf. *Surface and Coatings Technology* 405(126721).
- Luo, J. & Wang, Z. L. 2020. Recent Progress of Triboelectric Nanogenerators: From Fundamental Theory to Practical Applications. *EcoMat* 2(4): e12059.

- Luo, X., Zhu, L., Wang, Y. C., Li, J., Nie, J. & Wang, Z. L. 2021. A Flexible Multifunctional Triboelectric Nanogenerator Based on Mxene/Pva Hydrogel. *Advanced Functional Materials* 31(38): 2104928.
- Ma, Q., Ren, G., Xu, K. & Ou, J. Z. 2021. Tunable Optical Properties of 2d Materials and Their Applications. *Advanced Optical Materials* 9(2): 2001313.
- Mallineni, S. S. K., Dong, Y., Behlow, H., Rao, A. M. & Podila, R. 2018. A Wireless Triboelectric Nanogenerator. *Advanced Energy Materials* 8(10): 1702736.
- Mao, W., Yang, S., Xu, G., Liu, P., Zhong, T., Dong, J., Li, Z., Zhou, H., Xu, C. & Song, Q. 2024. The Effect of Ions on Liquid-Solid Interface Investigated by Charge Sensitive Direct Current Droplet-Based Electricity Generator. *DeCarbon* 4(100045).
- Matiko, J. W., Grabham, N. J., Beeby, S. P. & Tudor, M. J. 2013. Review of the Application of Energy Harvesting in Buildings. *Measurement Science and Technology* 25(1): 012002.
- Meng, H., Zhang, J., Zhu, R., Wang, J., Ge, Y., Liu, H., Feng, C., Zhou, Z., Meng, Y. & Huang, Z. 2024. Elevating Outputs of Droplet Triboelectric Nanogenerator through Strategic Surface Molecular Engineering. *ACS Energy Letters* 9(2670-2676).
- Meng, J., Lee, C. & Li, Z. 2024. Adjustment Methods of Schottky Barrier Height in One-and Two-Dimensional Semiconductor Devices. *Science Bulletin* 69(9): 1342-1352.
- Michael, J., Qifeng, Z. & Danling, W. 2019. Titanium Carbide Mxene: Synthesis, Electrical and Optical Properties and Their Applications in Sensors and Energy Storage Devices. *Nanomaterials and Nanotechnology* 9(1847980418824470).
- Mitta, S. B., Choi, M. S., Nipane, A., Ali, F., Kim, C., Teherani, J. T., Hone, J. & Yoo, W. J. 2020. Electrical Characterization of 2d Materials-Based Field-Effect Transistors. *2D Materials* 8(1): 012002.
- Mohideen, M. M., Subramanian, B., Sun, J., Ge, J., Guo, H., Radhamani, A. V., Ramakrishna, S. & Liu, Y. 2023. Techno-Economic Analysis of Different Shades of Renewable and Non-Renewable Energy-Based Hydrogen for Fuel Cell Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 174(113153).
- Mozafari, M. & Soroush, M. 2021. Surface Functionalization of Mxenes. *Materials Advances* 2(22): 7277-7307.
- Mu, M., Liu, S., Deflorio, W., Hao, L., Wang, X., Salazar, K. S., Taylor, M., Castillo, A., Cisneros-Zevallos, L. & Oh, J. K. 2023. Influence of Surface Roughness, Nanostructure, and Wetting on Bacterial Adhesion. *Langmuir* 39(15): 5426-5439.
- Nakajima, A. 2011. Design of Hydrophobic Surfaces for Liquid Droplet Control. *NPG Asia Materials* 3(5): 49-56.
- Nam, S., Kim, J.-N., Oh, S., Kim, J., Ahn, C. W. & Oh, I.-K. 2020. Ti₃C₂tx Mxene for Wearable Energy Devices: Supercapacitors and Triboelectric Nanogenerators. *APL Materials* 8(11):
- Nasri, I. F. M. A., Za'aba, Z., Noorawzi, N., Jusoh, W. N. W., Yahaya, R. & Abidin, S. B. Z. 2024. Evaluation of the Electrical Performance of Single-Electrode Mode Triboelectric Nanogenerators Based on Different Conductor Materials. *2024 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon)*, hlm. 141-145.
- Neagoe, M., Prawatya, Y., Zeghloul, T. & Dascalescu, L. 2017. Influence of Surface Roughness on the Tribo-Electric Process for a Sliding Contact between

- Polymeric Plate Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, hlm. 012003.
- Nguyen, Q.-T. & Ahn, K.-K. K. 2021. Fluid-Based Triboelectric Nanogenerators: A Review of Current Status and Applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 8(3): 1043-1060.
- Nguyen, Q. T., Vo, C. P., Nguyen, T. H. & Ahn, K. K. 2022. A Direct-Current Triboelectric Nanogenerator Energy Harvesting System Based on Water Electrification for Self-Powered Electronics. *Applied Sciences* 12(5): 2724.
- Nguyen, Q. T., Vu, D. L., Le, C. D. & Ahn, K. K. 2023. Enhancing the Performance of Triboelectric Generator: A Novel Approach Using Solid–Liquid Interface-Treated Foam and Metal Contacts. *Polymers* 15(10): 2392.
- Nie, J., Wang, Z., Ren, Z., Li, S., Chen, X. & Lin Wang, Z. 2019. Power Generation from the Interaction of a Liquid Droplet and a Liquid Membrane. *Nature Communications* 10(1): 2264.
- Nie, S., Guo, H., Lu, Y., Zhuo, J., Mo, J. & Wang, Z. L. 2020. Superhydrophobic Cellulose Paper-Based Triboelectric Nanogenerator for Water Drop Energy Harvesting. *Advanced Materials Technologies* 5(9): 2000454.
- Niu, S., Liu, Y., Wang, S., Lin, L., Zhou, Y. S., Hu, Y. & Wang, Z. L. 2014. Theoretical Investigation and Structural Optimization of Single-Electrode Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Functional Materials* 24(22): 3332-3340.
- Niu, Z., Cheng, W., Cao, M., Wang, D., Wang, Q., Han, J., Long, Y. & Han, G. 2021. Recent Advances in Cellulose-Based Flexible Triboelectric Nanogenerators. *Nano Energy* 87(106175).
- Okubo, M., Sugahara, A., Kajiyama, S. & Yamada, A. 2018. Mxene as a Charge Storage Host. *Accounts of chemical research* 51(3): 591-599.
- Ongetta, S., Mohan Viswanathan, P., Mishra, A. & Sabarathinam, C. 2025. A Multiproxy Analysis of Rainwater Chemistry and Moisture Sources in Borneo. *Earth Systems and Environment* 1-18.
- Owusu-Ansah, E. & Dalton, C. 2020. Fabrication of a 3d Multi-Depth Reservoir Micromodel in Borosilicate Glass Using Femtosecond Laser Material Processing. *Micromachines* 11(12): 1082.
- Palsaniya, S., Nehra, K. & Dasmahapatra, A. K. 2022. Based Triboelectric Nanogenerator and Activities of Salt Ions. *Engineering Research Express* 4(1): 015002.
- Pan, L., Wang, J., Wang, P., Gao, R., Wang, Y.-C., Zhang, X., Zou, J.-J. & Wang, Z. L. 2018. Liquid-Fep-Based U-Tube Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Water-Wave Energy. *Nano Research* 11(8): 4062-4073.
- Pan, S. & Zhang, Z. 2019. Fundamental Theories and Basic Principles of Triboelectric Effect: A Review. *Friction* 7(2-17).
- Panda, P. K., Singh, D., Köhler, M. H., De Vargas, D. D., Wang, Z. L. & Ahuja, R. 2022. Contact Electrification through Interfacial Charge Transfer: A Mechanistic Viewpoint on Solid–Liquid Interfaces. *Nanoscale Advances* 4(3): 884-893.
- Patankar, N. A. 2004. Mimicking the Lotus Effect: Influence of Double Roughness Structures and Slender Pillars. *Langmuir* 20(19): 8209-8213.
- Patterson, K. Y., Pehrsson, P. R. & Perry, C. R. 2013. The Mineral Content of Tap Water in United States Households. *Journal of Food Composition and Analysis* 31(1): 46-50.

- Peng, N., Xu, G., Wang, P., Li, J. & Yang, X. 2021. Improving the Specific Surface Area of Etched Aluminum Foil by Fabricating the Micro/Nano Structure. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 10(12): 124005.
- Potu, S., Kulandaivel, A., Gollapelli, B., Khanapuram, U. K. & Rajaboina, R. K. 2024. Oxide Based Triboelectric Nanogenerators: Recent Advances and Future Prospects in Energy Harvesting. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 161(100866).
- Pratap, A., Kouchi, F. R., Burgoyne, H., Curtis, M., Rektor, A., Seol, M.-L., Mansoor, N. E., Varghese, T. V., Eixenberger, J. & Efaw, C. M. 2025. Direct Writing of Pvbva/Ti3c2 Tx (Mxene) Triboelectric Nanogenerators for Energy Harvesting and Sensing Applications. *Nano Energy* 111206.
- Qian, Z., Li, R., Guo, J., Wang, Z., Li, X., Li, C., Zhao, N. & Xu, J. 2019. Triboelectric Nanogenerators Made of Polybenzazole Aerogels as Fire-Resistant Negative Tribo-Materials. *Nano Energy* 64(103900).
- Qiao, Y., Liu, X., Jia, Z., Zhang, P., Gao, L., Liu, B., Qiao, L. & Zhang, L. 2022. In Situ Growth Intercalation Structure Mxene@ Anatase/Rutile Tio2 Ternary Heterojunction with Excellent Phosphoprotein Detection in Sweat. *Biosensors* 12(10): 865.
- Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M., Startz, R. & Liu, P. 2017. Less Than 2 C Warming by 2100 Unlikely. *Nature climate change* 7(9): 637-641.
- Riazi, H., Anayee, M., Hantanasirisakul, K., Shamsabadi, A. A., Anasori, B., Gogotsi, Y. & Soroush, M. 2020. Surface Modification of a Mxene by an Aminosilane Coupling Agent. *Advanced Materials Interfaces* 7(6): 1902008.
- Saadatnia, Z., Esmailzadeh, E. & Naguib, H. E. 2019. High Performance Triboelectric Nanogenerator by Hot Embossing on Self-Assembled Micro-Particles. *Advanced Engineering Materials* 21(1): 1700957.
- Salaudhin, M., Rana, S. S., Rahman, M. T., Sharifuzzaman, M., Maharjan, P., Bhatta, T., Cho, H., Lee, S. H., Park, C. & Shrestha, K. 2022. Fabric-Assisted Mxene/Silicone Nanocomposite-Based Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Sensors and Wearable Electronics. *Advanced Functional Materials* 32(5): 2107143.
- Salaudhin, M., Rana, S. S., Sharifuzzaman, M., Rahman, M. T., Park, C., Cho, H., Maharjan, P., Bhatta, T. & Park, J. Y. 2021. A Novel Mxene/Ecoflex Nanocomposite-Coated Fabric as a Highly Negative and Stable Friction Layer for High-Output Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Energy Materials* 11(1): 2002832.
- Saleh, T. A. 2020. Nanomaterials: Classification, Properties, and Environmental Toxicities. *Environmental Technology & Innovation* 20(101067).
- Sardana, S., Mahajan, P., Mishra, A. & Mahajan, A. 2023. Triboelectric Nanogenerator-Integrated Symmetric Supercapacitor Based on Tio2 Encrusted Mxene Nanosheets for Energy Harvesting and Storage Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 57(12): 125502.
- Sardana, S., Sharma, V., Beepat, K. G., Sharma, D. P., Chawla, A. K. & Mahajan, A. 2023. Flexible, Humidity-and Contamination-Resistant Superhydrophobic Mxene-Based Electrospun Triboelectric Nanogenerators for Distributed Energy Harvesting Applications. *Nanoscale* 15(47): 19369-19380.
- Sathishkumar, P. & Madeswaran, S. 2024. The Effect of Jahn–Teller Distortion on the Magnetic and Magnetocaloric Effect in La-Doped Gadolinium Barium Manganite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 35(10): 692.

- Serafin, J., Bujaldón, R., Sreńscek-Nazzal, J., Kałamaga, A., Gomez, E., Vendrell, X. & Serra, A. 2025. Transition Metal-Doped TiO_2 and CeO_2 Photocatalysts Modified with Ti_3C_2 Mxene for Pms-Driven Advanced Oxidation of Pharmaceutical Pollutants. *Chemical Engineering Journal* 169005.
- Serje, D., Pacheco, J. & Diez, E. 2020. Micromilling Research: Current Trends and Future Prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111(7): 1889-1916.
- Sezer, N. & Koç, M. 2021. A Comprehensive Review on the State-of-the-Art of Piezoelectric Energy Harvesting. *Nano Energy* 80(105567).
- Shima, S., Uejima, R., Takamura, E. & Sakamoto, H. 2023. Relationship between Output Voltage of Water Droplet-Based Electricity Nanogenerator and Electrolyte Concentration. *Nano Energy* 112(108503).
- Sooraj, V. 2021. Effect of Cutting Tool Feed Rate on Contact Angle of Water Drops in Non-Composite Wetting of Cnc Milled Aluminum Aa6061 Surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 235(2): 219-229.
- Sripadmanabhan Indira, S., Aravind Vaithilingam, C., Oruganti, K. S. P., Mohd, F. & Rahman, S. 2019. Nanogenerators as a Sustainable Power Source: State of Art, Applications, and Challenges. *Nanomaterials* 9(5): 773.
- Suhaimi, A., Mahmoudi, E., Latif, R., Siow, K. S., Zaid, M. H. M., Mohammad, A. W. & Wee, M. M. R. 2021. Superhydrophilic Organosilicon Plasma Modification on Pes Membrane for Organic Dyes Filtration. *Journal of Water Process Engineering* 44(102352).
- Sun, B., Xu, D., Wang, Z., Zhan, Y. & Zhang, K. 2022. Interfacial Structure Design for Triboelectric Nanogenerators. *Battery Energy* 1(3): 20220001.
- Sun, M., Li, Z., Yang, C., Lv, Y., Yuan, L., Shang, C., Liang, S., Guo, B., Liu, Y. & Li, Z. 2021. Nanogenerator-Based Devices for Biomedical Applications. *Nano Energy* 89(106461).
- Tahir, F. & Al-Ghamdi, S. G. 2023. Climatic Change Impacts on the Energy Requirements for the Built Environment Sector. *Energy Reports* 9(670-676).
- Tang, W., Chen, B. D. & Wang, Z. L. 2019. Recent Progress in Power Generation from Water/Liquid Droplet Interaction with Solid Surfaces. *Advanced Functional Materials* 29(41): 1901069.
- Tang, X., Wang, X., Cattley, R., Gu, F. & Ball, A. D. 2018. Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review. *Sensors* 18(12): 4113.
- Tao, Y., Xiang, H., Cao, X. & Wang, N. 2024. Spring Design of Triboelectric Nanogenerator with Mxene-Modified Interface for Fluid Energy Harvesting and Water Level Monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces* 16(3): 3406-3415.
- Taskin, N. U. & Ordu, F. 2021. Effect of Etching Duration on Roughness and Wettability of Different Carbon Steel Substrates. *Materials Chemistry and Physics* 257(123746).
- Tian, J., Chen, X. & Zhong, L. W. 2020. Environmental Energy Harvesting Based on Triboelectric Nanogenerators. *Nanotechnology* 31(24): 242001.
- Tran, P. A. & Webster, T. J. 2013. Understanding the Wetting Properties of Nanostructured Selenium Coatings: The Role of Nanostructured Surface Roughness and Air-Pocket Formation. *International Journal of Nanomedicine* 2001-2009.

- Tung, R. T. 2014. The Physics and Chemistry of the Schottky Barrier Height. *Applied Physics Reviews* 1(1):
- Turar, Z., Sembay, M., Mubarak, A., Belgibayeva, A., Kong, L. & Kalimuldina, G. 2025. Advances in Porous Structure Design for Enhanced Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators: A Comprehensive Review. *Global Challenges* 9(1): 2400224.
- Wang, H., Kurokawa, Y., Zhang, J.-H., Gotoh, K., Liu, X., Miyamoto, S. & Usami, N. 2024. Core–Shell Yarn-Structured Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Both Waterdrop and Biomechanics Energies. *Applied Physics Express* 17(1): 017005.
- Wang, J. 2015. Liquid Level Sensing Using Capacitive-to-Digital Converters. *Analog Dialogue* 49(4): 1-3.
- Wang, L., Xu, H., Huang, F., Tao, X., Ouyang, Y., Zhou, Y. & Mo, X. 2022. High-Output Lotus-Leaf-Bionic Triboelectric Nanogenerators Based on 2d Mxene for Health Monitoring of Human Feet. *Nanomaterials* 12(18): 3217.
- Wang, M., Wang, X., Nan, Y., Xu, H., Zhou, H., Sun, Y., Yi, P. & Yu, T. 2023. Droplet Energy Harvesting System Based on Mxene/Sio₂ Modified Triboelectric Nanogenerators. *Chemical Engineering Journal* 477(146832).
- Wang, M., Wang, X., Nan, Y., Zhou, H. & Xu, H. 2025. Enhanced of Zif-8 and Mxene Decorated Triboelectric Nanogenerator for Droplet Energy Harvesting. *Chemical Engineering Journal* 506(160137).
- Wang, W., Zhang, L., Wang, H., Zhao, Y., Cheng, J., Meng, J., Wang, D. & Liu, Y. 2023. High-Output Single-Electrode Droplet Triboelectric Nanogenerator Based on Asymmetrical Distribution Electrostatic Induction Enhancement. *Small* 19(37): 2301568.
- Wang, Y., Guo, T., Tian, Z., Bibi, K., Zhang, Y. Z. & Alshareef, H. N. 2022. Mxenes for Energy Harvesting. *Advanced materials* 34(21): 2108560.
- Wang, Y., Yu, X., Yin, M., Wang, J., Gao, Q., Yu, Y., Cheng, T. & Wang, Z. L. 2021. Gravity Triboelectric Nanogenerator for the Steady Harvesting of Natural Wind Energy. *Nano Energy* 82(105740).
- Weaver, J. B., Kozuch, J., Kirsh, J. M. & Boxer, S. G. 2022. Nitrile Infrared Intensities Characterize Electric Fields and Hydrogen Bonding in Protic, Aprotic, and Protein Environments. *Journal of the American Chemical Society* 144(17): 7562-7567.
- Wicklein, B., Valurouthu, G., Yoon, H., Yoo, H., Ponnann, S., Mahato, M., Kim, J., Ali, S. S., Park, J. Y. & Gogotsi, Y. 2024. Influence of Mxene Composition on Triboelectricity of Mxene-Alginate Nanocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces* 16(18): 23948-23959.
- Willatzen, M. & Wang, Z. L. 2019. Contact Electrification by Quantum-Mechanical Tunneling. *Research*
- Willis, D., Niezrecki, C., Kuchma, D., Hines, E., Arwade, S., Barthelmie, R., Dipaola, M., Drane, P., Hansen, C. & Inalpolat, M. 2018. Wind Energy Research: State-of-the-Art and Future Research Directions. *Renewable Energy* 125(133-154).
- Wu, C., Wang, A. C., Ding, W., Guo, H. & Wang, Z. L. 2019. Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials* 9(1): 1802906.
- Wu, D., Wang, J. N., Wu, S. Z., Chen, Q. D., Zhao, S., Zhang, H., Sun, H. B. & Jiang, L. 2011. Three-Level Biomimetic Rice-Leaf Surfaces with Controllable Anisotropic Sliding. *Advanced Functional Materials* 21(15): 2927-2932.

- Wu, H., Mendel, N., Van Der Ham, S., Shui, L., Zhou, G. & Mugele, F. 2020. Charge Trapping-Based Electricity Generator (Cteg): An Ultrarobust and High Efficiency Nanogenerator for Energy Harvesting from Water Droplets. *Advanced materials* 32(33): 2001699.
- Wu, J., Cao, J., Bi, H., Zhang, J. & Cao, Q. 2023. Liquid-Solid Contact Electrification and Its Effect on the Formation of Electric Double Layer: An Atomic-Level Investigation. *Nano Energy* 111(108442).
- Wu, X., Li, X., Ping, J. & Ying, Y. 2021. Recent Advances in Water-Driven Triboelectric Nanogenerators Based on Hydrophobic Interfaces. *Nano Energy* 90(106592).
- Wu, Y., Li, Y., Zou, Y., Rao, W., Gai, Y., Xue, J., Wu, L., Qu, X., Liu, Y. & Xu, G. 2022. A Multi-Mode Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting and Biomedical Monitoring. *Nano Energy* 92(106715).
- Xiu, Y., Zhu, L., Hess, D. W. & Wong, C. 2006. Biomimetic Creation of Hierarchical Surface Structures by Combining Colloidal Self-Assembly and Au Sputter Deposition. *Langmuir* 22(23): 9676-9681.
- Xu, C. C., Liao, B., Pang, S., Nazari, L., Mahmood, N., Tushar, M. S., Dutta, A. & Ray, M. B. 2018. Biomass Energy. Dlm. (pnyt.). *Comprehensive Energy Systems*, hlm. 770-794. Elsevier.
- Xu, G., Li, C., Chen, C., Fu, J., Hou, T. & Zi, Y. 2022. Dynamics of Triboelectric Nanogenerators: A Review. *International Journal of Mechanical System Dynamics* 2(4): 311-324.
- Xu, H., Wang, X., Niu, J., Nan, Y., Pu, J., Zhou, H., Duan, J., Huang, Y. & Hou, B. 2022. Construction of Mxene/Pdms-Based Triboelectric Nanogenerators for High-Performance Cathodic Protection. *Advanced Materials Interfaces* 9(11): 2102085.
- Xu, L., Jiang, T., Lin, P., Shao, J. J., He, C., Zhong, W., Chen, X. Y. & Wang, Z. L. 2018. Coupled Triboelectric Nanogenerator Networks for Efficient Water Wave Energy Harvesting. *Acs Nano* 12(2): 1849-1858.
- Yang, C., Wang, Y., Wang, Y., Zhao, Z., Zhang, L. & Chen, H. 2023. Highly Stretchable Ptfе Particle Enhanced Triboelectric Nanogenerator for Droplet Energy Harvestings. *Nano Energy* 118(109000).
- Yang, G., Wu, H., Li, Y., Wang, D., Song, Y., Zhou, Y., Hao, J., Zi, Y., Wang, Z. & Zhou, G. 2021. Direct Ink Writing of Fluoropolymer/Cnt-Based Superhydrophobic and Corrosion-Resistant Electrodes for Droplet Energy Harvesters and Self-Powered Electronic Skins. *Nano Energy* 86(106095).
- Yang, L., Wang, Y., Guo, Y., Zhang, W. & Zhao, Z. 2019. Robust Working Mechanism of Water Droplet-Driven Triboelectric Nanogenerator: Triboelectric Output Versus Dynamic Motion of Water Droplet. *Advanced Materials Interfaces* 6(24): 1901547.
- Yang, R. 2024. A Multifunctional Triboelectric Nanogenerator Based on Pdms/Mxene for Bio-Mechanical Energy Harvesting and Volleyball Training Monitoring. *Heliyon* 10(11):
- Yang, T.-J., Lin, Z.-H. & Lu, Y.-W. 2023. Self-Powered Digital Microfluidics Driven by Rotational Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy* 110(108376).
- Yang, Y. & Lee, C. 2022. Making Use of Water Droplets as a Sustainable Green Energy Source. *Droplet* 1(1): 7-10.
- Yao, G., Xu, L., Cheng, X., Li, Y., Huang, X., Guo, W., Liu, S., Wang, Z. L. & Wu, H. 2020. Bioinspired Triboelectric Nanogenerators as Self-Powered Electronic

- Skin for Robotic Tactile Sensing. *Advanced Functional Materials* 30(6): 1907312.
- Yoon, Y., Kim, D. & Lee, J.-B. 2014. Hierarchical Micro/Nano Structures for Super-Hydrophobic Surfaces and Super-Lyophobic Surface against Liquid Metal. *Micro and Nano Systems Letters* 2(1-18).
- Yoshimitsu, Z., Nakajima, A., Watanabe, T. & Hashimoto, K. 2002. Effects of Surface Structure on the Hydrophobicity and Sliding Behavior of Water Droplets. *Langmuir* 18(15): 5818-5822.
- Yu, H., Zhang, X., Wan, Y., Xu, J., Yu, Z. & Li, Y. 2016. Superhydrophobic Surface Prepared by Micromilling and Grinding on Aluminium Alloy. *Surface Engineering* 32(2): 108-113.
- Yu, L., Lu, L., Zhou, X. & Xu, L. 2023. Current Understanding of the Wettability of Mxenes. *Advanced Materials Interfaces* 10(2): 2201818.
- Yu, X., Shang, Y., Zheng, L. & Wang, K. 2023. Application of Nanogenerators in the Field of Acoustics. *ACS Applied Electronic Materials* 5(9): 5240-5248.
- Yuan, L., Han, Y., Zhen, J., Jia, Z. & Zhang, R. 2024. Synergistic Enhancement of the High-Temperature Friction and Wear Behavior of Ptfе Matrix Composites with the Addition of Cf, Peek, and Tic. *Polymers* 16(23): 3412.
- Yuan, Z. & Guo, L. 2024. Recent Advances in Solid-Liquid Triboelectric Nanogenerator Technologies, Affecting Factors, and Applications. *Scientific reports* 14(1): 10456.
- Zeng, Y., Luo, Y., Lu, Y. & Cao, X. 2022. Self-Powered Rain Droplet Sensor Based on a Liquid-Solid Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy* 98(107316).
- Zhan, F., Wang, A. C., Xu, L., Lin, S., Shao, J., Chen, X. & Wang, Z. L. 2020. Electron Transfer as a Liquid Droplet Contacting a Polymer Surface. *Acs Nano* 14(12): 17565-17573.
- Zhan, X., Si, C., Zhou, J. & Sun, Z. 2020. Mxene and Mxene-Based Composites: Synthesis, Properties and Environment-Related Applications. *Nanoscale Horizons* 5(2): 235-258.
- Zhang, B., Tian, G., Xiong, D., Yang, T., Chun, F., Zhong, S., Lin, Z., Li, W. & Yang, W. 2021. Understanding the Percolation Effect in Triboelectric Nanogenerator with Conductive Intermediate Layer. *Research*
- Zhang, B. & Xu, W. 2021. Superhydrophobic, Superamphiphobic and Slips Materials as Anti-Corrosion and Anti-Biofouling Barriers. *New Journal of Chemistry* 45(34): 15170-15179.
- Zhang, H., Yin, K., Wang, L., Deng, Q., He, Y., Xiao, Z., Li, G. & Dai, G. 2023. A Robust Droplet Triboelectric Nanogenerator with Self-Cleaning Ability Achieved by Femtosecond Laser. *ACS Applied Materials & Interfaces* 15(25): 30902-30912.
- Zhang, R. & Olin, H. 2020. Material Choices for Triboelectric Nanogenerators: A Critical Review. *EcoMat* 2(4): e12062.
- Zhang, X., Chen, A., Chen, L. & Zhou, Z. 2022. 2d Materials Bridging Experiments and Computations for Electro/Photocatalysis. *Advanced Energy Materials* 12(4): 2003841.
- Zhao, B., Sun, S., Luo, Y. & Cheng, Y. 2020. Fabrication of Polytetrafluoroethylene Coated Micron Aluminium with Enhanced Oxidation. *Materials* 13(15): 3384.
- Zhao, L., Liu, L., Yang, X., Hong, H., Yang, Q., Wang, J. & Tang, Q. 2020. Cumulative Charging Behavior of Water Droplet Driven Freestanding Triboelectric

- Nanogenerators toward Hydrodynamic Energy Harvesting. *Journal of Materials Chemistry A* 8(16): 7880-7888.
- Zhao, Z., Cao, X. & Wang, N. 2024. Beyond Energy Harvesting: A Review on the Critical Role of Mxene in Triboelectric Nanogenerator. *Energy Materials* 4(3): N/A-N/A.
- Zheng, K. & Ni, M. 2016. Reconstruction of Solid Oxide Fuel Cell Electrode Microstructure and Analysis of Its Effective Conductivity. *Science Bulletin* 61(1): 78-85.
- Zheng, Y., Li, J., Xu, T., Cui, H. & Li, X. 2023. Triboelectric Nanogenerator for Droplet Energy Harvesting Based on Hydrophobic Composites. *Materials* 16(15): 5439.
- Zhou, M., Al-Furjan, M. S. H., Zou, J. & Liu, W. 2018. A Review on Heat and Mechanical Energy Harvesting from Human—Principles, Prototypes and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82(3582-3609).
- Zhou, Q., Pan, J., Deng, S., Xia, F. & Kim, T. 2021. Triboelectric Nanogenerator-Based Sensor Systems for Chemical or Biological Detection. *Advanced materials* 33(35): 2008276.
- Zhu, J. & Hu, X. 2018. A New Route for the Preparation of Superhydrophobic Surfaces Via Milling Operation. *Materials Express* 8(2): 195-198.
- Zhu, Y., Xu, W., Cao, Z., Meng, W., Ni, J., Pan, J. & Wei, D. 2023. Prediction of Contact Angle for Oriented Hydrophobic Surface and Experimental Verification by Micro-Milling. *Coatings* 13(8): 1305.
- Zi, Y., Basset, P. & Chen, J. 2021. Triboelectric Nanogenerator—Progress and Perspectives. *EcoMat* 3(5):
- Zou, H.-X., Zhao, L.-C., Gao, Q.-H., Zuo, L., Liu, F.-R., Tan, T., Wei, K.-X. & Zhang, W.-M. 2019. Mechanical Modulations for Enhancing Energy Harvesting: Principles, Methods and Applications. *Applied Energy* 255(113871).

LAMPIRAN A

SENARAI PENERBITAN

Tesis ini adalah sebahagian dari penerbitan yang disenaraikan di bawah:

Jurnal

1. Rashid, F.J, Ehsan, A.A & Mohammad Haniff, MAS. 2025. Influence of structural design and electrode configuration on the electrical performance and reliability of polytetrafluoroethylene-based water drop triboelectric nanogenerators. *Energy and Environment, Online First*. (Q1, IF: 4.8)
2. Rashid, F.J, Mohammad Haniff, MAS & Ehsan, A.A. 2025 Electrical Performance of Water Drop Energy Harvesting Device Using Modified MXene-Coated Triboelectric Nanogenerators. *Physica Scripta*. (Q2, IF: 2.6)

Persidangan

1. Rashid, F.J, Ehsan, A.A & Mohammad Haniff, MAS. 2024. Biomimetic Microstructure Design for Superhydrophobic Structure in Triboelectric Nanogenerator Device. *2024 IEEE Internasional Conference on Semiconductor Electronics, Proceeding, ICSE*.
2. Rashid, F.J, Mohammad Haniff, MAS & Ehsan, A.A. 2025. Biomimetic Surfaces for Enhanced Water Drop Nanogenerator Triboelectric Performance. *Internasional Conference on Earth Science and Environment, ICEMEN 2025*.

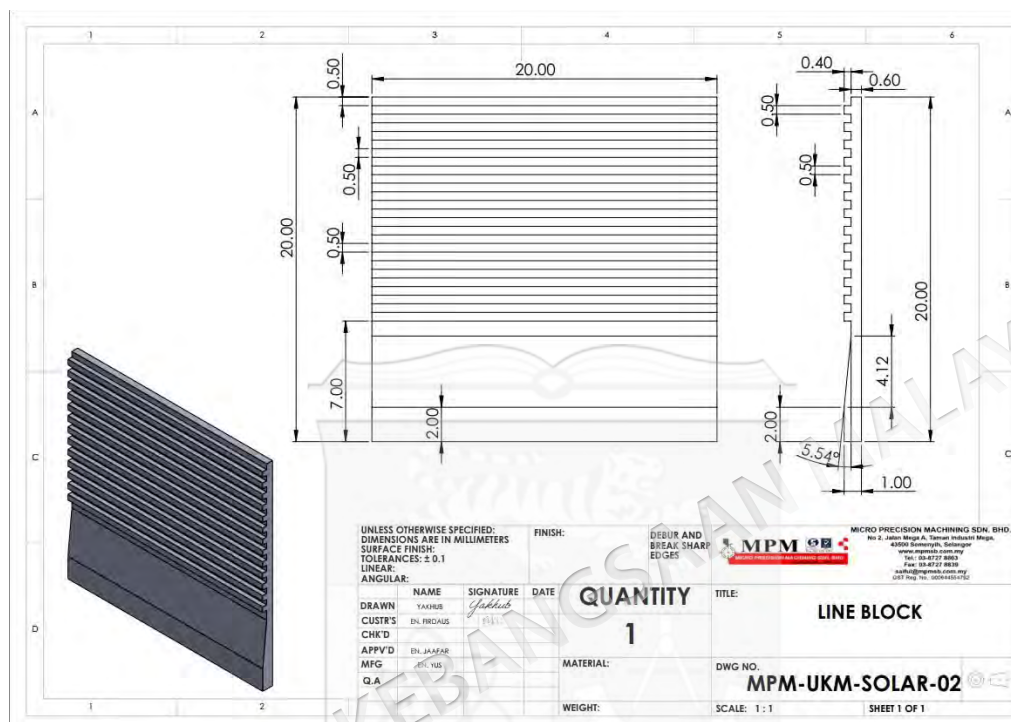
Kolokium

1. Rashid, F.J, Mohammad Haniff, MAS & Ehsan, A.A. 2023. Ciri-Ciri Superhidrofobik Terinspirasi Daripada Daun Keladi Untuk Aplikasi Biomimetik. *Kolokium Siswazah IMEN 2023*.

LAMPIRAN B

REKA BENTUK PEMESINAN STRUKTUR MIKRO BIOMIMETIK

1. Reka Bentuk Struktur Mikro Alur



2. Reka Bentuk Struktur Tiang Nano

