

**FORMULASI KELAKUAN PENGUATAN AA2024
KILAS TEKATAN TINGGI MENGGUNAKAN
KECERUNAN KEKUATAN-KEKERASAN
BERSEPADU**

FAUZIANA BINTI LAMIN

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

FORMULASI KELAKUAN PENGUATAN AA2024
KILAS TEKANAN TINGGI MENGGUNAKAN
KECERUNAN KEKUATAN-KEKERASAN
BERSEPADU

FAUZIANA BINTI LAMIN

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH
DOKTOR FALSAFAH

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2021

PENGAKUAN

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

5 Mei 2021

FAUZIANA BINTI LAMIN
P88837

**PERAKUAN TESIS SARJANA / DOKTOR FALSAFAH
(CERTIFICATION OF MASTERS / DOCTORAL THESIS)**

Nama Penuh Pengarang
(Author's Full Name)

: FAUZIANA BINTI LAMIN

No. Pendaftaran Pelajar
(Student's Registration
No.)

: P88837

Sesi Akademik
(Academic
Session)

: 1/2016-2017 - 2/2020-2021

Tajuk Tesis
(Thesis Title)

: Formulasi Kelakuan Penguatan AA2024 Kilas Tekanan Tinggi
Menggunakan Kecerunan Kekuatan-Kekerasan Bersepadu

Merujuk kepada Klausa 4.2 Dasar Harta Intelek Pelajar UKM (Tambahan), tesis adalah hak milik pelajar. Saya mengaku tesis ini sebagai:

(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:)

☐

**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 organisation/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.)

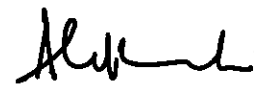
Bagi kategori Akses Terbuka/Tidak Terhad, saya membenarkan tesis (Sarjana/Doktor Falsafah) ini di simpan di Perpustakaan Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM)* dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut:

(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:)

1. 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.)
2. 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 purpose among higher education institutions and any government body/agency, subject to terms and conditions.)

DISAHKAN OLEH:
(VERIFIED BY:)


TANDATANGAN PELAJAR
(STUDENT'S SIGNATURE)

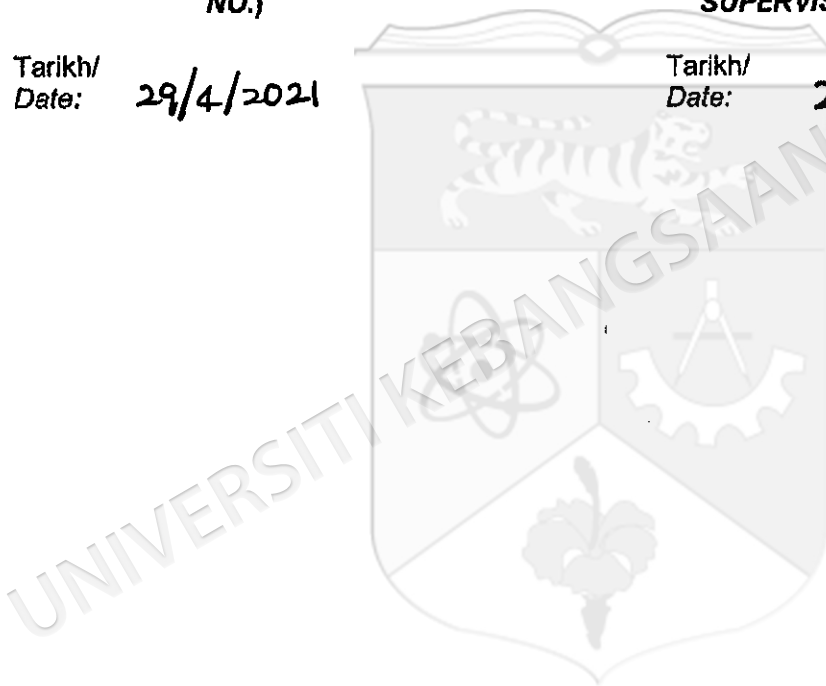

TANDATANGAN PENYELIA /
PENGURUSI JK SISWAZAH
(SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON
SUPERVISION COMMITTEE
SIGNATURE)

831215 - 05 - 5146
KAD PENGENALAN /
NO. PASPORT
(IDENTITY CARD/PASSPORT
NO.)

PROF. IR. DR. AHMAD KAMAL ARIFIN
NAMA PENYELIA/
PENGURUSI JK SISWAZAH
(SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON
SUPERVISION COMMITTEE NAME)

Tarikh/
Date: 29/4/2021

Tarikh/
Date: 29/4/2021



PENGHARGAAN

Alhamdulillah, setinggi-tinggi kesyukuran dipanjatkan kepada Allah, yang Maha Pengasih dan Maha Pemurah, atas kurniaan rezeki untuk melengkapkan tesis ini dengan jayanya. Hanya dengan izinNya tesis ini dapat disiapkan.

Penghargaan utama ditujukan untuk penyelia utama iaitu Professor Ir. Dr. Ahmad Kamal Ariffin Mohd Ihsan, atas bimbingan dan sokongan beliau yang tidak ternilai sepanjang pengajian saya. Kedinamikan, visi, kesabaran dan motivasi beliau amat menginspirasi saya untuk terus berusaha. Saya berasa amat bersyukur kerana diberi peluang untuk berkerja di bawah seliaan beliau kerana ilmu yang dikongsi tidak mungkin saya peroleh di mana-mana.

Penghargaan ini juga ditujukan kepada Ir. Dr. Intan Fadhlina Mohamed selaku penyelia bersama, terutamanya atas bimbingannya yang tidak terhingga dalam melaksanakan kerja-kerja uji kaji yang dilakukan di Kyushu University. Sekalung penghargaan juga ditujukan buat Prof. Emeritus Dr. Zenji Horita atas peluang dan kepercayaan yang diberikan dalam mengendalikan peralatan di makmal Giant Straining Process for Advanced Materials, Kyushu University. Tanpa usaha dan kesungguhan mereka, tidak mungkin usahasama di peringkat antarabangsa ini dapat dilaksanakan.

Ucapan terima kasih yang tidak terhingga juga saya tujukan buat suami, anak, ibu, ayah dan seluruh ahli keluarga atas segala pengorbanan dan kesabaran sepanjang perjuangan saya kali ini. Terima kasih kerana sentiasa berada bersama saya selama ini. Kasih sayang kalian yang tidak berbelah bahagi sentiasa menjadi pendorong dan pembakar semangat untuk saya terus memperbaiki diri. Semoga segala usaha, sumbangan dan pengorbanan kita ini diberkati dan dirahmati.

Terima kasih juga buat rakan-rakan seperjuangan, khususnya sahabat karib yang sentiasa memberi pengaruh positif serta sokongan berterusan. Perjalanan ini tidak pernah sunyi dengan sokongan semangat daripada kalian. Tidak lupa juga, terima kasih kepada semua yang terlibat secara langsung mahupun sebaliknya. Jasa baik kalian hanya Allah jua yang mampu membalasnya.

Sesungguhnya perjalanan PhD ini telah banyak mengajar saya bukan sahaja daripada aspek pembangunan intelektual malah emosional. Saya amat bersyukur kerana dianugerahkan insan-insan hebat bersama perjuangan ini. Akhir kata, semoga seluruh pasukan yang menjayakan tesis ini sentiasa di bawah perlindunganNya dan dianugerahkan ganjaran istimewa di akhirat kelak, Amin.

ABSTRAK

Penyelidikan ubah bentuk plastik melampau (SPD) semakin berkembang dengan berteraskan pencapaiannya dalam meningkatkan kekuatan pelbagai logam, aloi dan komposit. Antara bahan tersebut, kebolehan SPD dilihat paling bernilai untuk penguatan logam ringan. Kemajuan ini dipacu oleh permintaan tinggi untuk aplikasi cekap tenaga dan ergonomik, khususnya dalam bidang automotif, aeronautik dan biomekanik. Kilas tekanan tinggi (HPT) ialah teknologi SPD yang paling efektif dalam menghasilkan bahan berstruktur nano ira. Semasa pemprosesan, aliran tegasan yang tidak homogen merentasi dimensi sampel memerlukan penelitian tegasan yang komprehensif bagi memastikan keutuhan bahan HPT. Namun, sampel HPT yang bersaiz kecil menghadkan penilaian tegasan menyeluruh melalui ujian tegangan yang memerlukan penyediaan spesimen. Cabaran ini mendorong usaha permodelan kelakuan penguatan bahan HPT. Akan tetapi, permodelan mekanik mikro melibatkan prosedur penelitian berskala mikro yang kompleks. Pendekatan fenomenologi pula tidak mewakili kesemua julat terikan. Kekurangan ini menjustifikasikan keperluan kajian permodelan lanjut yang lebih tepat dan efisien. Objektif utama kajian ini ialah untuk memformulasikan kelakuan penguatan bahan HPT melalui penentuan integrasi sifat mekanikal setempat. Aloi aluminium AA2024 berdiameter 30 mm dikenakan beban mampatan sebanyak 4 GPa dan kilasan daripada 1 sehingga 6 putaran pada kadar 0.2 rpm dalam suhu bilik. Bagi mengukur penambahbaikan sifat bahan dengan peningkatan terikan, ujian tegangan, kekerasan dan mikrostruktur melalui pembelauan sinar-X (XRD) dilaksanakan. Hasilnya, HPT berjaya meningkatkan kekerasan sebanyak 68.4% (230 Hv) dan kekuatan tegangan sebanyak 88.7% (885.1 MPa). Analisis pelebaran puncak XRD melalui kaedah Williamson-Hall dan Halder-Wagner pula membuktikan penghalusan struktur hablur sehingga 27.2 nm, sebagai mekanisme penguatan utama. Keseluruhannya, kajian ini berjaya meningkatkan ciri mekanikal dan mikrostruktur AA2024 berdiameter 30 mm. Ia merupakan pencapaian penting dalam usaha meningkatkan skala sampel HPT bagi memperluaskan prospek aplikasinya. Integrasi antara kadar evolusi kekerasan dan kekuatan tegangan menghasilkan suatu formulasi kelakuan penguatan HPT dengan kebolehpercayaan 85%. Data kekerasan yang mudah dicapai menjadikan pendekatan ini lebih praktikal. Model analitikal yang berkebolehan menentukan tegasan setempat pada sebarang bilangan putaran ini memainkan peranan utama dalam menentusahkan model simulasi berangka. Analisis berparameter melalui model simulasi yang ditentusahkan ini menjelaskan, nisbah bidang $H'/D < 0.2$ dapat menghasilkan kehomogenan tegasan merentasi ketebalan sehingga $r/R = 0.6$. Ketidakhajajaran andas $\alpha > 0.2$ mm pula ditunjukkan sebagai faktor penguatan di pusat sampel. Selain itu, jurang aliran bebas $j \leq 0.2$ mm dan sudut kecondongan dinding andas $\psi \leq 10^\circ$ membantu menghasilkan tekanan balikan yang mencukupi untuk meningkatkan tegasan. Simulasi FEM jelas mempamerkan kepentingannya sebagai pelengkap uji kaji. Justeru, penentusahan model simulasi melalui formulasi kelakuan penguatan yang diterbitkan adalah kunci utama kejayaan ramalan aliran tegasan. Model yang ditentusahkan amat bernilai untuk kawalan proses ubah bentuk, pengoptimuman parameter pemprosesan dan analisis ketidakpastian secara sistematik. Analisis unsur terhingga ini menjimatkan bilangan uji kaji yang besar dengan kos pengiraan yang kecil, ke arah pengkomersilan aloi aluminium kekuatan tinggi.

FORMULATION OF HIGH-PRESSURE TORSION AA2024 STRENGTHENING BEHAVIOUR USING INTEGRATED STRENGTH-HARDNESS GRADIENT

ABSTRACT

Research on severe plastic deformation (SPD) has been emerging based on its exceptional achievement in enhancing the strength of various metals, alloys and composites. Among these materials, SPD is the most precious for producing strengthened lightweight metals. The lightweight material advancement is driven by the increasing demand for energy-efficient and ergonomic applications, particularly in automotive, aeronautics and biomechanics. High-pressure Torsion (HPT) is the most effective SPD technology in producing nano-grained materials. The inhomogeneous stresses flow across the HPT sample dimension requires a comprehensive stress evaluation to verify the integrity of the HPT material. Nevertheless, the tiny sized sample restricts thorough stress evaluation through tensile test. This bulk property assessment led to the modelling efforts for localised strengthening behaviour determination. However, the micro-mechanical modelling involves complex micro-scale examination procedures, while the phenomenological approach did not represent the entire plastic strain range. These drawbacks justify the current need for a more accurate and efficient model. The main objective of this study is to formulate the strengthening behaviour of HPT materials using an integrated localised mechanical characteristics validation. Aluminium alloy AA2024, having a diameter of 30 mm was subjected to a 4 GPa compressive loading and torsion from 1 to 6 revolutions at a rate of 0.2 rpm in ambient temperature. Tensile, hardness and microstructural test through X-ray diffraction (XRD) was conducted to examine the material properties enhancement. As a result, HPT increases hardness by 68.4% (230 Hv) and tensile strength by 88.7% (885.1 MPa). Meanwhile, XRD peak broadening analysis through Williamson-Hall dan Halder-Wagner method revealed crystallite refinement to 27.2 nm, as the primary strengthening mechanism. Overall, this study is successful in enhancing mechanical and microstructural properties of 30 mm diameter AA2024. This is a bold achievement towards upscaling the HPT samples for a broaden application prospect. Integration between hardness and tensile strength gradient then formulates HPT strengthening behaviour, with 85% reliability. The easily accessible hardness data provides a more practical solution. The analytical model that is capable of determining localised stress plays it vital role in validating numerical simulation model. A parametric study by using the validated simulation model implies that aspect ratio $H'/D < 0.2$ could generate homogeneous stress across sample thickness, until $r/R = 0.6$. Besides, anvil misalignment $\alpha > 0.2$ mm, clarifies strengthening at the disc centre. Whereas, the outflow gap $j \leq 0.2$ mm and wall inclination angle $\psi \leq 10^\circ$ assist in developing adequate back pressure that ultimately increases strength. FEM simulation demonstrates its significance as an experimental work complement. Hence, the simulation model validation using the formulated strengthening behaviour is the key to stress flow prediction success. The validated model is valuable for deformation process control, processing parameters optimisation, and systematic uncertainties analysis, towards the commercialisation of high strength aluminum alloys.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI ILUSTRASI	ix
SENARAI JADUAL	xv
SENARAI SIMBOL	xvi
SENARAI SINGKATAN	xxi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Ubah Bentuk Plastik Melampau	1
1.3 Motivasi Kajian	5
1.4 Potensi Pelaksanaan	8
1.5 Permasalahan Kajian	12
1.6 Objektif Kajian	14
1.7 Skop Kajian	14
1.8 Rangka Kajian	16
 BAB II KAJIAN KEPUSTAKAAN	
2.1 Pengenalan Kajian Kepustakaan	17
2.2 Kilas Tekanan Tinggi	17
2.2.1 Prinsip Asas HPT dan Pembolehubah Penguatan	18
2.2.2 Penambahbaikan Sifat Mikrostruktur dan Mekanikal Bahan HPT	23
2.2.3 HPT untuk Aluminium dan Aloinya	27
2.3 Permodelan Kelakuan Penguatan Bahan HPT	32

2.3.1	Ubah Bentuk Bahan Logam	32
2.3.2	Permodelan Kelakuan Ubah Bentuk Bahan HPT	35
2.4	Simulasi Unsur Terhingga Ubah Bentuk HPT	39
2.4.1	Kepentingan Kaedah Unsur Terhingga dalam Permasalahan HPT	40
2.4.2	Formulasi Keplastikan Bahan HPT	42
2.5	Rumusan Kajian Kepustakaan	47

BAB III METODOLOGI

3.1	Pengenalan Metodologi Kajian	51
3.2	Uji kaji dan Pencirian Sampel HPT	51
3.2.1	Penyediaan Sampel HPT	53
3.2.2	Uji kaji HPT	54
3.2.3	Penyediaan Sampel Pasca-HPT	56
3.2.4	Ujian Kekerasan	59
3.2.5	Ujian Tegangan	60
3.2.6	Ujian Pembelauan Sinar-X (XRD)	61
3.3	Pembangunan Model HPT	64
3.3.1	Model Analitikal	64
3.3.2	Model Simulasi HPT	67
3.4	Penentuan Model Simulasi HPT	82
3.5	Kawalan Ubah Bentuk HPT	84
3.6	Rumusan Metodologi Kajian	87

BAB IV KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pengenalan	89
4.2	Pencirian AA2024 Terproses HPT	89
4.2.1	Fizikal	90
4.2.2	Kekerasan	91
4.2.3	Kekuatan	96
4.2.4	Mikrostruktur	100
4.3	Permodelan Evolusi Sifat Mekanikal semasa Proses HPT	109
4.3.1	Model Empirik Evolusi Kekerasan HPT	109

4.3.2	Model Analitikal Tegasan HPT	113
4.4	Pengesahan dan Penentusahan Model Simulasi HPT	120
4.4.1	Ketepatan dan Kecekapan Pengiraan	121
4.4.2	Pengesahan	122
4.4.3	Penentusahan	125
4.5	Kawalan Ubah Bentuk melalui Analisis Berparameter	128
4.5.1	Pengaruh Dimensi Sampel terhadap Aliran Tegasan	128
4.5.2	Pengaruh Konfigurasi Andas terhadap Aliran Tegasan	134
4.6	Rumusan Hasil Kajian	145
BAB V	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
5.1	Pengenalan	146
5.2	Kesimpulan Kajian	146
5.3	Sumbangan Kajian	149
5.4	Cadangan Kajian Lanjutan	152
RUJUKAN		172
LAMPIRAN		
A	Senarai Penerbitan	173
B	Implementasi Berangka HPT	175
C	Algoritma Pengaturcaraan HPT	177

SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
1.1	Teknik pemprosesan bahan menggunakan teknologi SPD.	2
1.2	Kitaran lazim pembangunan bahan.	4
1.3	Perubahan peratusan komposisi dan jisim bahan bagi kenderaan ringan di US daripada 1995 – 2014 (Dai et al. 2016).	7
1.4	(a) Pengeluar aluminium dunia yang utama (Beethika Biswas, 2018), (b) perbandingan penghasilan aluminium primer dan sekunder (Steinbach & Wellmer 2010)	9
1.5	Perbandingan kos pengeluaran bahan (Friedrich, Brinkmann & Schwenk 2018)	11
2.1	Lakaran skematik HPT: (a) komponen yang terlibat secara langsung semasa pembebanan, (b) perbandingan konfigurasi andas, (c) graf pembebanan.	19
2.2	Terikan ricih pada sampel HPT.	21
2.3	Evolusi penguatan bahan HPT: (a) tanpa pemulihan, (b) dengan pemulihan dan (c) pelembutan (Kawasaki 2014; Kawasaki et al. 2010).	22
2.4	Analisis TEM dalam paparan imej bidang terang (kiri), imej bidang gelap (tengah) dan SAED (kanan) bagi AA6061 bagi tiga peringkat pembebanan $\varepsilon = 0.3, 15$ dan 70 (Mohamed et al. 2013).	25
2.5	Perbandingan saiz ira antara pusat dan pinggir cakera Al-3% Mg pada bilangan putaran tertentu (Lee et al. 2016).	26
2.6	Perbandingan evolusi kekerasan dengan peningkatan terikan HPT bagi: (a) aluminium tulen pada ketulenan berbeza (Ito et al. 2017) dan (b) aloi aluminium AA5483 (Bazarnik et al. 2018).	27
2.7	Lengkung tegasan-terikan bagi AA2024 yang diproses HPT dengan $N = 5$, hasil ujian tegangan pada $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ hingga $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ dan T : (a) $\sim 300^\circ\text{C}$, (b) $\sim 350^\circ\text{C}$ serta (c) pemanjangan superplastik maksimum pada $\sim 400^\circ\text{C}$ (Alhamidi & Horita 2015).	30
2.8	Kesan pembebanan HPT terhadap suhu aluminium dan ferum (Figueiredo et al. 2012b).	31

2.9	Kesan peningkatan tekanan terhadap nisbah gelinciran antara aluminium, kuprum dan ferum pada kadar putaran 0.5 rpm dan 1.0 rpm (Edalati, Horita & Langdon 2009).	32
2.10	Hubungan tegasan-terikan yang lazim bagi bahan mulur.	33
2.11	Pengklasifikasian julat terikan plastik mengikut lengkung lazim kelakuan evolusi kekuatan aloi aluminium terproses HPT.	34
2.12	Model ringkas kelakuan elastoplastik bahan logam.	36
2.13	Kepentingan FEM dalam permasalahan HPT.	40
2.14	Elemen yang ditakrifkan dalam model simulasi HPT beserta perincian parameter masukan.	43
2.15	Evolusi permukaan alah bagi hukum aliran sekutu.	45
2.16	Penentuan permukaan alah berdasarkan analogi bahan kepingan gelek: (a) konfigurasi sampel uji kaji dan (b) kedudukan titik alah bagi konfigurasi dan jenis pembebanan.	46
2.17	Perbandingan bentuk permukaan alah antara (a) aloi titanium Ti-6Al-4V dan (b) aloi aluminium AA2024-T3 (Janbakhsh, Loghmanian & Djavanroodi 2014).	47
2.18	Elemen utama yang dikenalpasti dalam kajian HPT. Kerangka kajian ini diwarnakan dan garisan putus-putus menunjukkan penghubung antara jurang kajian yang dikenalpasti.	48
3.1	Metodologi keseluruhan dan sumbangan kajian.	52
3.2	Proses rawatan haba pada suhu 520°C selama 12 jam terhadap sampel AA2024 menggunakan relau.	53
3.3	Kedudukan sampel pada andas semasa uji kaji menggunakan Mesin HPT 500 Mg.	54
3.4	Sampel HPT AA2024: (a) dengan dimensi sebenar atas kertas grid dan perbezaan antara permukaan sentuhan sampel yang terhasil daripada (b) keadaan dengan gelinciran pada tekanan 2 GPa, dan (c) keadaan tanpa gelinciran pada tekanan 4 GPa.	55
3.5	Proses penyediaan permukaan sampel tergilap menggunakan kaedah pencanaan dan penggilapan.	56
3.6	Pemotongan spesimen ujian tegangan: (a) kedudukan dan dimensi spesimen, (b) mesin EDM dan komponen pemotongan.	57

3.7	Pengukuran dimensi sebenar tolok spesimen ujian tegangan.	58
3.8	Ujian kekerasan Vickers: (a) peralatan ujian, (b) kedudukan pengukuran.	59
3.9	Kedudukan sampel: (a) peralatan ujian tegangan konfigurasi mendatar, (b) sebelum ujian dan (c) selepas ujian.	61
3.10	Analisis XRD untuk penelitian perubahan mikrostruktur bahan terproses HPT.	62
3.11	Geometri dan kedudukan koordinat asalan bagi model sampel HPT.	67
3.12	Pengubahsuaian bilangan unsur sehingga n_e dalam model HPT: (a) 226, (b) 378, (c) 617, (d) 895, (e) 1289 dan (f) 2548.	68
3.13	(a) Jejaring asal dengan 2548 elemen, (b) penjejaringan semula.	69
3.14	Penyelesaian masalah plastik berasaskan kawalan beban dan kawalan sesaran.	70
3.15	Konsep penentusahan dan pengesahan sesebuah permodelan.	83
3.16	Ilustrasi pembolehubah konfigurasi andas yang dinilai melalui pendekatan analisis undur sehingga iaitu jurang aliran bebas j , anjakan penjajaran andas atas dan bawah α serta sudut kecondongan dinding andas ψ .	85
4.1	Perubahan ketebalan sepanjang arah jejarian dan diameter gerigis yang terbentuk selepas proses HPT berbanding keadaan tanpa pembebanan.	90
4.2	Plot kekerasan melawan (a) jarak dari pusat cakera, (b) terikan setara HPT bagi sampel HPT AA2024 yang dikenakan bilangan putaran berbeza.	92
4.3	(a) Penentuan pekali perkadaran peningkatan H pada setiap r berbanding ε , (b) perbandingan kecerunan pengerasan bagi sampel AA2024 dengan diameter 10 mm (Alhamidi & Horita 2015), 14 mm (Vafaei et al. 2012) dan 30 mm (kajian ini).	95
4.4	Kelakuan tegangan bagi sampel AA2024 terproses HPT dengan beberapa putaran: (a) $N = 1$, (b) $N = 2$, (c) $N = 3$, (d) $N = 4$, (e) $N = 5$ dan (f) $N = 6$ pada 4 mm, 8 mm dan 12 mm dari pusat cakera.	97
4.5	Evolusi kekuatan alah σ_y , kekuatan tegangan σ_T dan terikan patah ε_b bagi sampel AA2024 terproses HPT.	99

4.6	Perbandingan kekuatan tegangan terhadap terikan patah bagi AA2024 yang diproses HPT (kajian ini) berbanding besi tuang, keluli karbon/ keluli aloi rendah dan keluli tahan karat (Cardarelli, 2008).	100
4.7	Profil XRD bagi spesimen HPT AA2024 pada: (a) $\varepsilon \sim 30$, (b) $\varepsilon \sim 80$, (c) $\varepsilon \sim 160$ dan (d) $\varepsilon \sim 240$.	101
4.8	Analisis pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Scherrer, pada (a) $\varepsilon \sim 30$, (b) $\varepsilon \sim 80$, (c) $\varepsilon \sim 160$ dan (d) $\varepsilon \sim 240$.	102
4.9	Analisis pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Williamson-Hall, pada (a) $\varepsilon \sim 30$, (b) $\varepsilon \sim 80$, (c) $\varepsilon \sim 160$ dan (d) $\varepsilon \sim 240$.	103
4.10	Analisis pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Halder-Wagner, pada (a) $\varepsilon \sim 30$, (b) $\varepsilon \sim 80$, (c) $\varepsilon \sim 160$ dan (d) $\varepsilon \sim 240$.	106
4.11	Perbandingan evolusi ciri mekanikal dan mikrostruktur sampel terproses HPT.	108
4.12	Pencirian umum kelakuan pengerasan melalui pemalar bahan: (a) C , (b) d , (c) F dan (d) g .	110
4.13	Penentuan pemalar pengerasan bahan AA2024: (a) C dan d , (b) F dan g .	112
4.14	Kekerasan melawan kekuatan tegangan bagi aloi aluminium yang diproses dan sebelum HPT.	115
4.15	Perbandingan evolusi kekuatan alah dan kekerasan bagi sampel AA2024 terproses HPT.	116
4.16	Pembetulan nilai kekerasan dan kekuatan tegangan awal melalui penyesuaian lengkung.	117
4.17	Kebolehpercayaan tegasan yang diramalkan melalui model I dan II berbanding tegasan eksperimen.	118
4.18	Taburan residu berbanding tegasan sebenar uji kaji.	118
4.19	Perbandingan evolusi tegasan ramalan menggunakan model analitikal yang dicadangkan berbanding tegasan uji kaji sebenar.	119
4.20	Analisis bilangan elemen jejaring terhadap pengiraan tegasan dan masa pengiraan.	121

4.21	Tegasan von-Mises maksimum yang dikira daripada analisis simulasi HPT dengan pembebanan mampatan bersamaan 4 GPa dan terikan kilas sehingga 30° putaran.	123
4.22	Penentuan sifat plastik AA2024 diproses HPT berdasarkan aliran tegasan von Mises dengan 10° putaran dan tekanan 4 GPa: (a) kekuatan alah awal σ_{y0} , (b) tangen modulus E_t .	124
4.23	Terikan setara sepanjang jejarian sampel dengan anjakan 0.065 mm dan 0° putaran berbanding anggaran teori untuk ketebalan sampel 1.0 mm (pembebanan awal) dan 0.945 mm (pembebanan akhir).	125
4.24	Penentusahan tegasan von Mises daripada simulasi berbanding tegasan uji kaji dengan peningkatan darjah putaran.	127
4.25	Tegasan von Mises daripada simulasi HPT pada pelbagai kedudukan jejari sampel.	127
4.26	Taburan tegasan von Mises sepanjang jejari bagi tiga saiz sampel, $R = 15$ mm, 30 mm dan 60 mm.	129
4.27	Taburan tegasan von Mises merentasi ketebalan bagi sampel dengan tebal H' antara 1.25 mm hingga 10 mm.	130
4.28	Sisihan piawai tegasan terhadap nisbah bidang pada beberapa kedudukan jejari sampel berbeza.	131
4.29	Evolusi tegasan von Mises menghampiri paksi putaran pada peringkat pembebanan berbeza, dengan kawasan $r \leq 2$ mm diperbesarkan.	132
4.30	Analisis pada kawasan berhampiran paksi putaran sampel $R = 15$ mm: (a) ubah bentuk, (b) corak tegasan pada sampel berlainan ketebalan dan (c) corak tegasan generik.	133
4.31	Kesan jurang aliran bebas j terhadap taburan tekanan pada pada separuh ketebalan sampel ($z = 0.5$ mm), dengan anjakan paksian 0.065 mm yang menyamai tekanan ~ 4 GPa.	135
4.32	Taburan tekanan merentasi ketebalan sampel hasil anjakan paksian andas $u_z = 0.065$ mm, yang bersamaan dengan 4 GPa, dalam konfigurasi HPT (a) tidak terkekang dan (b) kuasi-terkekang.	137
4.33	Perbandingan evolusi tegasan pada jejari 12 mm sempadan atas sampel dengan jurang aliran 0.2 mm, 0.6 mm dan 1.0 mm (tidak terkekang).	138

- 4.34 Aliran kelakuan tegasan Von Mises dengan peningkatan sudut putaran dengan beberapa keadaan ketidakjajaran: (a) pelembutan terikan dengan pemulihan, (b) pengerasan terikan. 140
- 4.35 Kebolehbandingan antara (a) profil tegasan hasil simulasi ketidakjajaran 0.21 mm, (b) pembentukan gerigis yang menyerupai keadaan ketidakjajaran andas dalam uji kaji HPT dengan penguatan ketara di pusat cakera (Todaka et al. 2008) dan (c) penghasilan gerigis yang sekata sepanjang perimeter sampel (Okeke et al. 2019). 141
- 4.36 Taburan tekanan sepanjang jejari sampel, dengan kepelbagaian sudut kecondongan dinding andas. 143
- 4.37 Evolusi tegasan pada jejari $r = 14$ mm permukaan atas sampel ($z = 1.0$ mm) dengan perbezaan sudut kecondongan dinding andas ψ daripada 0° sehingga 30° . 144



SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
2.1	Pengubahsuaian sifat mekanikal dan mikrostruktur bagi beberapa jenis bahan yang diproses menggunakan teknik HPT.	23
2.2	Pengkelasan siri aloi aluminium mengikut komposisi elemen utama (Gavrus & Francillette 2011).	28
2.3	Penambahbaikan sifat mekanikal dan mikrostruktur melalui HPT bagi beberapa siri aluminium dengan dimensi tertentu.	29
2.4	Model kelakuan keplastikan ringkas dan pengerasan terikan pelbagai bagi beberapa jenis bahan dalam kajian simulasi HPT.	36
2.5	Model analitikal berasaskan mikro mekanik yang digunakan dalam permasalahan HPT.	38
3.1	Komposisi kimia sampel AA2024 yang digunakan dalam kajian ini (Mohamed, Lee & Horita 2014).	53
3.2	Sifat mekanikal bagi sampel dan andas yang ditetapkan dalam model simulasi (Comsol Multiphysics Material Library).	74
3.3	Perbandingan kaedah kajian ini dengan kajian terdahulu.	88
4.1	Ciri mekanikal sampel AA2024 terproses HPT yang diperolehi daripada ujian tegangan.	98
4.2	Saiz hablur dan terikan kekisi yang ditentukan daripada kaedah Scherrer, Williamson-Hall dan Halder-Wagner.	107
4.3	Pekali kekerasan A dan kuasa pengerasan b yang ditentukan melalui padanan lengkung terbaik fungsi $H = H_0 + \bar{A}N^b$.	112
4.4	Pekali kepekaan bagi setiap pemalar pengerasan dengan pemprosesan HPT $N = 0.25$ dan pada kedudukan sampel $r = 5$ mm.	112
4.5	Perbandingan ciri mekanikal aloi aluminium yang diproses HPT dan tidak diproses HPT.	115
4.6	Perbandingan ketepatan ramalan Model I dan Model II.	119
5.1	Pengubahsuaian sifat mekanikal dan mikrostruktur bagi beberapa jenis bahan yang diproses menggunakan teknik HPT.	151

SENARAI SIMBOL

α	Ketidakjajaran paksi putaran andas
β	Pelebaran puncak
ς_1	Kecerunan hubungan linear $H - \sigma$
ς_2	Pintasan-y hubungan linear $H - \sigma$
ε	Terikan
$\dot{\varepsilon}$	Kadar terikan
ε_b	Terikan patah
ε_e	Terikan elastik
ε_p	Terikan plastik
ε_0	Terikan awal
ε_h	Terikan arah ketebalan
ε_w	Terikan arah lebar
λ	Panjang gelombang
$\dot{\lambda}$	Pengganda plastik
γ	Terikan ricih
μ	Pekali geseran
η	Nisbah penguatan-pengerasan
$\bar{\eta}$	η terubahsuai
ϕ	Fungsi alah
σ	Tegasan
σ_e	Tegasan setara von Mises/ tegasan efektif
σ_h	Fungsi pengerasan
σ_y	Kekuatan alah
σ_{y0}	Kekuatan alah awal
σ_i	Tegasan ramalan
$\check{\sigma}_i$	Tegasan uji kaji sebenar
$\bar{\sigma}$	tegasan uji kaji purata

σ_T	Kekuatan tegangan
σ_{T0}	Kekuatan tegangan awal
φ	Sudut Bragg
ψ	Sudut kecondongan dinding andas
θ	Sudut putaran
$\bar{\theta}$	Sudut putaran dalam unit radians
ω	Kadar putaran
ξ	Sistem koordinat intrinsik
Ω	Domain
Ω_a	Domain andas atas
Ω_b	Domain andas bawah
Γ	Permukaan sempadan
Γ_a	Sempadan atas sampel
Γ_b	Sempadan bawah sampel
A	Luas permukaan
$\bar{A}$	Pekali kekerasan
b	Beban
b	Kuasa pengerasan terikan
B_i	Matrik terikan-sesaran
C	Pemalar magnitud pengerasan
d	Pemalar kebergantungan H terhadap r
$\bar{d}$	Jarak antara satah susunan atom
$d\varepsilon$	Peningkatan terikan
$d\varepsilon_e$	Peningkatan terikan elastik
$d\varepsilon_p$	Peningkatan terikan plastik
$\check{d}$	Diagonal
$d\gamma$	Pemalar perkadaran
D	Diameter sampel

$\bar{D}$	Saiz hablur purata
$\mathbf{D}_e$	Matrik keelastikan
$\mathbf{D}_{ep}$	Matrik elastoplastik
$\bar{e}$	Terikan kekisi
e	Unsur
e_r	Residu
E	Modulus Young
E_t	Modulus tangen
$E_{t,H}$	Kecerunan kekerasan
$E_{t,\sigma}$	Kecerunan kekuatan tegangan
F	Pemalar kadar ketepuan pengerasan
F_z	Daya dalam arah paksi-z
$\bar{F}$	Kecerunan ubah bentuk
$\bar{F}_e$	Kecerunan ubah bentuk elastik
$\bar{F}_p$	Kecerunan ubah bentuk plastik
g	Pemalar kebergantungan kadar ketepuan terhadap r
h	Jarak daripada satah bawah sampel
$\bar{h}$	Fungsi pengerasan
H	Kekerasan
H_0	Kekerasan awal
H'	Ketebalan sampel
$\bar{H}$	Modulus pengerasan
ΔH	Peningkatan kekerasan
j	Jurang aliran bebas
k	Kedalaman ruangan sampel pada andas
$\mathbf{k}_e$	Matrik kekakuan unsur
$\mathbf{K}$	Matriks kekakuan global
K	Faktor bentuk
ΔL	Perubahan panjang tolok

L_0	Panjang asal tolok
l_0	Ubah bentuk asal
l	Ubah bentuk melampaui had elastik
l_p	Ubah bentuk kekal setelah beban dialihkan
M_D	Potensi pengerasan
m	Pekali perkadaran pengerasan
N	Bilangan putaran
N_i	Fungsi bentuk
n_e	Bilangan unsur terhingga
P	Tekanan
q	Tensor sesaran
q_i	Anjakan maya
q_e	Anjakan berperingkat
Q	Potensi aliran plastik
r	Jarak daripada pusat
r^e	Vektor residu daya pada unsur
R	Jejari sampel
$\mathbf{R}$	Vektor daya global
R_ϵ	Nisbah terikan
R^2	Pekali penentuan
sf	Nisbah gelinciran
SS	Jumlah ralat kuasa dua
t	Tebal tolok
$\mathbf{t}$	Beban jasad
T	Suhu
T_H	Suhu homolog
T_L	Suhu takat lebur
u_z	Anjakan beban mampatan

u_θ Anjakan beban kilas

ν Nisbah Poisson

w Lebar tolok



SENARAI SINGKATAN

ARB	Ikatan gelekkan terkumpul
ASR	Gelekkan simetri
CEC	Penyemperitan dan pemampatan berkitar
ECAP	Penekanan bersudut saluran sama
EDM	Pemotongan nyahcas elektrik
FCC	Kubik berpusat muka
FE	Unsur terhingga
FEA	Analisis unsur terhingga
FEM	Kaedah unsur terhingga
FSP	Pemprosesan kacauan geseran
FWHM	Lebar penuh pada separuh maksimum
HPT	Kilas tekanan tinggi
H-W	Kaedah Halder-Wagner
IB	Sinar tuju
RB	Sinar pantulan
LSEM	Pemesinan penyemperitan terikan tinggi
MAC	Mampatan pelbagai sudut
MBWG	Model berasaskan mikrostruktur
PDE	Persamaan pembezaan separa
RCS	Pengalunan dan pelurusan berulang
RMSE	Punca kuasa purata kuasa dua ralat
R.T.	Suhu persekitaran
SAED	Pembelauan elektron kawasan terpilih
SEM	Mikroskop elektron imbasan
SSE	Jumlah kuasa dua ralat
SPD	Ubah bentuk plastik melampau
TEM	Mikroskop elektron penghantaran

TMCP	Proses kawalan termo-mekanikal
UFG	Ira ultra halus
WLTP	<i>Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure</i>
XRD	Pembelauan sinar X
TD	Arah melintang
RD	Arah gelekkan
W-H	Williamson-Hall



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 PENGENALAN

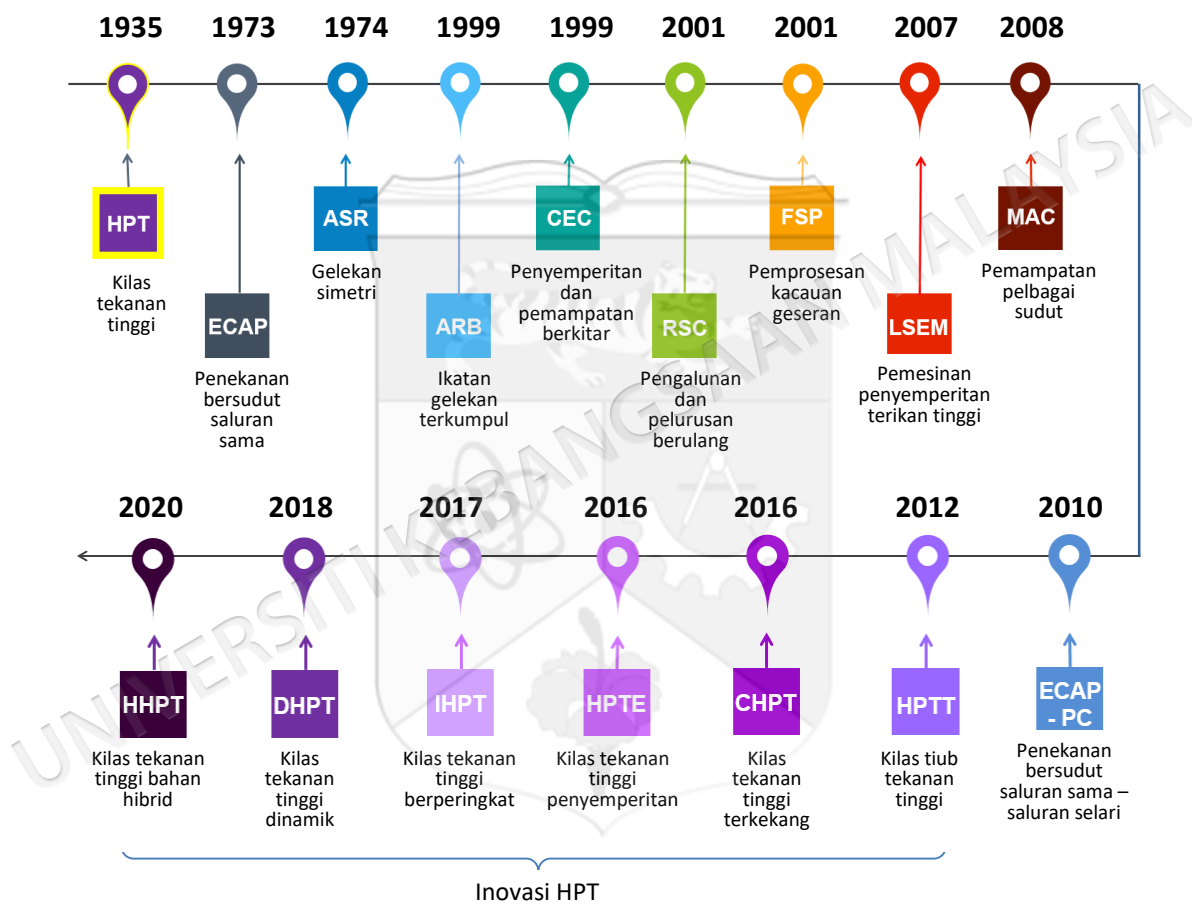
Bab ini memperkenalkan ubah bentuk plastik melampau (SPD) yang diaplikasikan menggunakan teknik kilas tekanan tinggi (HPT). Proses pembentukan ini menghasilkan bahan dengan ciri yang ditingkatkan, khususnya kekuatan. Perkembangan HPT dalam pengaplikasian teknologi SPD seawal penerimaan anugerah Nobel pada 1947 turut digariskan. Motivasi kajian penguatan bahan menggunakan teknik HPT yang berasaskan SPD ini dibentangkan berdasarkan keperluan reka bentuk industri terkini, khususnya dalam bidang automotif, untuk bahan ringan kekuatan tinggi. Seterusnya, potensi pelaksanaannya dan permasalahan kajian HPT dibincangkan. Ini disusuli dengan objektif, skop dan diakhiri dengan garis kasar keseluruhan tesis. Untuk memulakan bab ini, penjelasan berkenaan ubah bentuk plastik melampau diberikan dalam seksyen berikut.

1.2 UBAH BENTUK PLASTIK MELAMPAU

SPD ialah sebuah teknologi pembentukan bahan yang melibatkan terikan yang amat tinggi. Pendekatan ini mengecilkan saiz ira bahan pukal kepada struktur ira ultra halus (UFG). Hasilnya, kekuatan meningkat, lazimnya melebihi 50% kekuatan awal. Contohnya, peningkatan kekuatan telah direkodkan sebanyak ~90% bagi kuprum tulen (Um et al. 2014), ~200% bagi Al-5%Mg (Bazarnik et al. 2016) dan ~290% bagi Al-1% Mg (Andreau et al. 2014). Peningkatan kekuatan yang signifikan sebegini agak mencabar untuk diperoleh menggunakan teknik pembentukan logam termo-mekanikal

yang konservatif (Azushima et al. 2008), seperti penuangan, penempaan, gelean dan penyemperitan.

Usaha memperkuat bahan menggunakan teknologi SPD telah diperkenalkan pada 1935 oleh Percy W. Bridgman, sehingga dikurniakan anugerah Nobel dalam Fizik pada 1946. Teknologi ini kian berkembang saban hari sehingga kini. Perkembangan dalam rekaan teknik SPD yang utama ditunjukkan dalam Rajah 1.1.



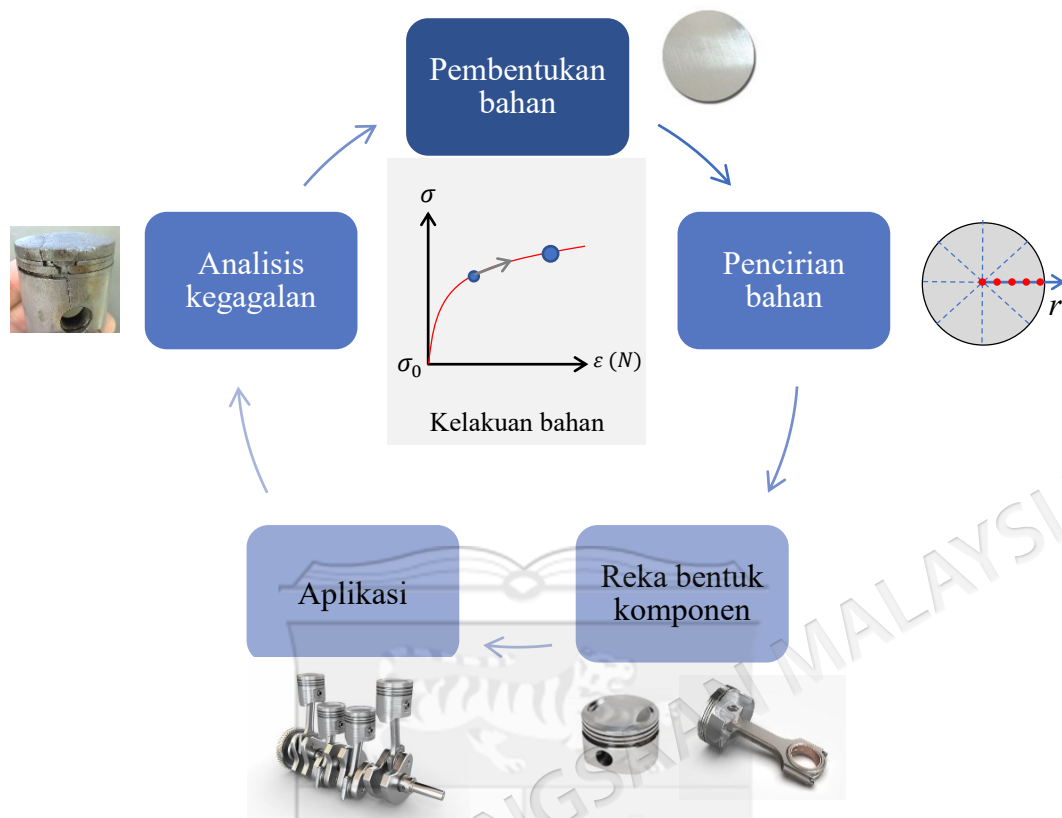
Rajah 1.1 Teknik pemprosesan bahan menggunakan teknologi SPD.

Antara teknik SPD termasuk HPT (Bridgman 1935), penekanan bersudut saluran sama (ECAP), gelean simetri (ASR) (Dewhurst, Collins & Johnson 1974), ikatan gelean terkumpul (ARB) (Saito et al. 1999), penyemperitan dan pemampatan berkitar (CEC) (Richert, Liu & Hansen 1999), pengalunan dan pelurusan berulang (RCS) (Zhu et al. 2001), pemprosesan kacauan geseran (FSP) (Mishra & Mahoney 2001), pemesinan

penyemperitan terikan tinggi (LSEM) (Moscoso et al. 2007) dan mampatan pelbagai sudut (MAC) (Kundu et al. 2008). Berdasarkan garis masa tersebut, perkembangan teknik SPD yang pesat dapat dilihat dalam 20 tahun kebelakangan ini. Dalam 10 tahun terkini, perkembangan teknik SPD lebih tertumpu kepada inovasi teknik-teknik sedia ada dan integrasi antara teknik SPD (Bazarnik et al. 2018; Zhilyaev et al. 2005). Seperti yang dapat dilihat, HPT masih lagi giat dikembangkan (Eskandarzade et al. 2017; Ivanisenko et al. 2016; Khoddam et al. 2016; Lanjewar, Kestens & Verleysen 2018; Sabirov et al. 2010) dan terkini, HPT diinovasikan untuk penghasilan bahan hibrid (Bartkowska et al. 2021; Korznikova et al. 2020). Corak perkembangan ini jelas mencerminkan bahawa teknologi SPD, khususnya HPT masih relevan sehingga hari ini.

Antara teknik-teknik SPD tersebut, kebolehan HPT mengatasi teknik SPD yang lain dalam menghasilkan bahan berstruktur UFG (Bhovi et al. 2016; Edalati & Horita 2015; Shi et al. 2018; Valiev et al. 1999; Xu et al. 2013). Pengecilan saiz ini adalah kebiasaannya kurang daripada 100 nm (Abd El Aal, Yoon & Kim 2013; Bhovi et al. 2016; Isik et al. 2016; Zheng et al. 2016). Penanda aras 100 nm ini lazimnya dirujuk sebagai had atas bagi struktur berhablur nano (Lowe Terry & Valliev Ruslan 2000). Selain penguatan bahan, kajian HPT turut merangkumi pelbagai aspek penambahbaikan fungsi bahan seperti kadar kakisan, rintangan elektrik dan kapasiti penyimpanan hidrogen (Markushev et al. 2018; Purcek et al. 2018; Sun, Qiao, Zheng, He et al. 2018; Tian et al. 2018). Walaupun begitu, aspek penguatan bahan menjadi fokus utama dalam penyelidikan pembentukan bahan termaju.

Rajah 1.2 menunjukkan kitaran lazim yang terlibat dalam pembangunan kekuatan bahan. Dalam fasa pembentukan, kekuatan awal diubah suai melalui pengaplikasian suatu terikan menghasilkan bahan dengan kekuatan yang lebih tinggi. Untuk itu, penyelakuan bahan adalah kritikal bagi menentukan kesan tegasan terhadap terikan pembebanan. Kedua, pencirian bahan setempat perlu dinilai secara terperinci berdasarkan kelakuan bahan. Pencirian yang tepat amat penting dalam fasa reka bentuk bagi memastikan keutuhan bahan yang diubah suai terhadap pelbagai magnitud dan arah pembebanan. Dalam pengoperasian aplikasi pula, terdapat kebarangkalian pengubahsuaian kekuatan diperlukan. Maka kitaran pembangunan bahan ini berulang.



Rajah 1.2 Kitaran lazim pembangunan bahan.

Keseluruhan proses ini menggambarkan kepentingan kajian penyelakuan dan pencirian bahan sebagai asas pembangunan bahan, sekaligus menjadi motivasi kajian.

Melalui penghalusan ira sebagai mekanisma penguatan utama, HPT telah berjaya menguatkan pelbagai jenis bahan ringan termasuk aluminium (Khajouei-Nezhad et al. 2017), magnesium (Bourezg et al. 2018), titanium (Zhang et al. 2018) dan beberapa siri aloi (Zhou et al. 2016; Lee et al. 2016; Chinh et al. 2017). Bagi industri automotif khususnya, tekanan untuk pengurangan jisim kenderaan telah menyaksikan penggantian penggunaan keluli dan besi tuang dalam kenderaan secara beransur-ansur dengan bahan alternatif yang lebih ringan, terutamanya aluminium dan plastik. Dalam kajian ini, pencapaian aloi aluminium dengan kekuatan yang ditingkatkan dibentangkan. Motivasi kajian ini dibincangkan dengan lebih lanjut dalam seksyen seterusnya.

1.3 MOTIVASI KAJIAN

Kajian penguatan bahan menggunakan teknik HPT ini adalah berdasarkan keperluan reka bentuk industri terkini. Motivasi utama termasuk penghasilan bahan ringan kekuatan tinggi, khususnya aluminium secara komersil, sebagai bahan gantian untuk aplikasi automotif dan aeronautik ke arah penjimatan bahan api dan pengurangan kesan rumah hijau. Selain itu usaha untuk meningkatkan dimensi sampel turut menjadi motivasi kajian ini. Perincian setiap elemen yang memotivasikan kajian ini dibincangkan seperti berikut.

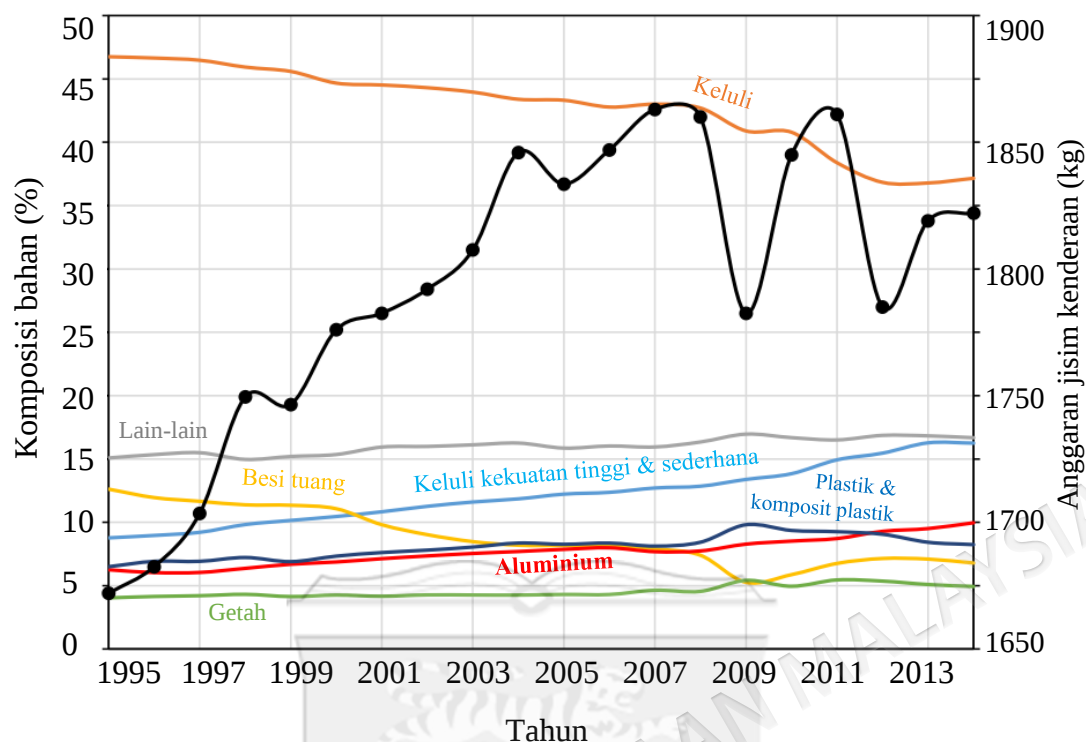
Reka bentuk automotif mahupun aeronautik moden ke arah aplikasi cekap tenaga menjadi pemangkin utama dalam usaha penghasilan bahan ringan kekuatan tinggi. Aluminium mempunyai potensi aplikasi yang luas disebabkan cirinya yang ringan, dengan anggaran nisbah ketumpatan 1:3 berbanding keluli (Schey, 2000). Logam ini juga memiliki ciri ketahanan karat dan konduktiviti haba yang baik. Aluminium membentuk sekitar 8.1% daripada jisim kerak bumi, iaitu unsur ketiga paling banyak selepas oksigen dan silikon (Lutgens & Tarbuck 2018). Komposisi ini menjadikannya sebagai unsur logam yang paling banyak boleh dijumpai. Walaupun pengeluaran aluminium tulen memerlukan tenaga yang intensif, kebolehannya untuk dikitar semula mengimbangi kekurangan ini (Hottle et al. 2017). Di samping sifat asas aluminium ini, kekuatan yang dipertingkatkan menyediakan prospek yang amat cerah untuk aluminium, menandingi logam lain termasuk keluli.

Peningkatan kekuatan aluminium ini boleh memberi impak yang besar terutamanya untuk industri automotif, aeronautik dan juga biomekanik (Abd El Aal & Kim 2014; Isik et al. 2016; Kunčická, Kocich & Lowe 2017). Dalam industri aeronautik khususnya, penjimatan bahan api yang ketara kesan pengurangan berat pesawat memberi manfaat kepada seluruh ekosistem industri, termasuk pengeluar pesawat, operator penerbangan dan seterusnya pengguna kerana tiket penerbangan boleh dibeli dengan harga yang lebih murah (Herold et al. 2018). Dalam bidang automotif juga, pengurangan jisim mengurangkan rintangan gulingan dan daya yang diperlukan untuk memecut kenderaan sekaligus menjimatkan penggunaan bahan api (Casadei & Broda 2008). Menurut Cheah (2010), maksimum 35% daripada purata

jisim kenderaan masa kini dianggarkan boleh dikurangkan melalui penggantian bahan dan pengecilan saiz kenderaan menjelang 2030. Kajian yang sama turut melaporkan bahawa sebanyak 5.6% bahan api boleh dijimatkan dengan setiap 10% pengurangan jisim kenderaan.

Rajah 1.3 menunjukkan peratusan komposisi dan jisim bahan bagi kenderaan ringan di US daripada 1995 – 2014. Peningkatan dalam jisim kenderaan keseluruhan mungkin disebabkan oleh penambahan komponen keselamatan dan pengendalian yang dititik beratkan dalam reka bentuk kenderaan moden. Sesebuah kenderaan di tahun 1995 terdiri daripada 47% keluli. Dalam tempoh ~20 tahun ini, penggunaan aluminium dilihat semakin meningkat saban tahun berbanding keluli dan besi tuang yang mengalami pengurangan masing-masing sebanyak 10% dan 6% (Dai, Kelly & Elgowainy 2016). Penggunaan plastik dan komposit plastik pula menunjukkan sedikit penurunan dalam tahun kebelakangan ini manakala getah dilihat lebih mendatar. Sementara itu, keluli kekuatan tinggi dan sederhana juga menunjukkan peningkatan. Justeru, kekuatan aluminium perlu ditingkatkan untuk mengatasi keluli kekuatan tinggi dan sederhana, selaku pesaing terdekatnya. Untuk itu, HPT dilihat berkeupayaan untuk menghasilkan aluminium kekuatan tinggi, sekaligus menandingi keluli yang lebih berat.

Corak perkembangan ini adalah selari dengan usaha ke arah mengkomersilkan bahan ringan diperkuat bagi menggantikan keperluan terhadap bahan logam berat. Ini menjelaskan potensi aluminium sebagai bahan gantian untuk komponen yang menggunakan bahan yang berketumpatan jauh lebih tinggi berbanding aluminium, termasuk keluli, besi tuang mahupun keluli kekuatan tinggi dan sederhana. Komponen yang memerlukan bahan kekuatan tinggi bersifat lebih keras, kaku dan lazimnya melibatkan komponen struktur asas dan komponen dalaman yang lasak seperti enjin. Dalam masa yang sama, penggunaan aluminium komersil yang terkenal dengan sifat kekuatan lesu yang tinggi perlu dikekalkan pada komponen yang memerlukan ketahanan lesu yang tinggi. Dengan memaksimumkan penggunaan bahan ringan, peratus pengurangan jisim kenderaan dapat dioptimumkan.



Rajah 1.3 Perubahan peratusan komposisi dan jisim bahan bagi kenderaan ringan di US daripada 1995 – 2014 (Dai et al. 2016).

Faedah daripada pengkomersilan bahan ringan diperkuat adalah lebih luas jika dilihat daripada aspek pengurangan kesan rumah hijau. Pembebasan karbon dioksida daripada sektor pengangkutan adalah antara penyumbang terbesar iaitu 16.2% daripada keseluruhan pembebasan gas rumah hijau sedunia (IPCC 2014), yang boleh mengganggu gugat kemandirian kesihatan manusia dan alam sekitar secara global. Justeru, kajian berkaitan penguatan aluminium adalah menepati usaha pengeluaran industri automotif untuk mengurangkan jisim kenderaan. Usaha ini merupakan komitmen pembuat kenderaan di seluruh dunia hasil desakan keperluan piawaian antarabangsa, *Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure* (WLTP) (2014) yang mula dikuatkuasakan pada 2017. Piawaian ini menggariskan prosedur ujian untuk mengukur penggunaan bahan api dan menetapkan pematuhan terhadap pembebasan bahan pencemar daripada kenderaan, sebagai inisiatif pengurangan gas rumah hijau secara bersepadu.

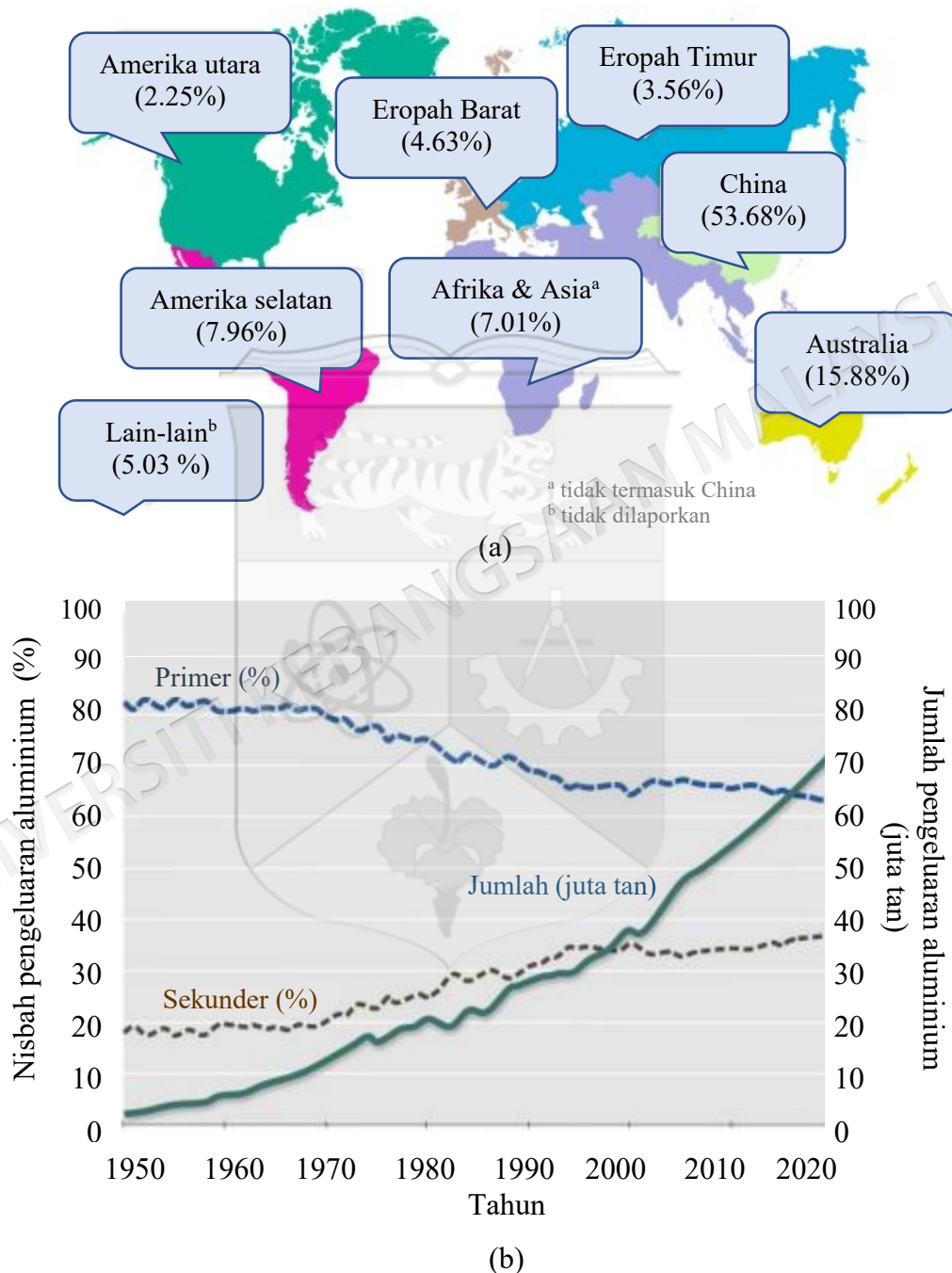
Bagi merealisasikan visi tersebut, teknik HPT dilihat berpotensi besar untuk menguatkan bahan ringan seperti aluminium. Pengkajian kesan pembebanan melampaui fasa plastik lazimnya diperhatikan dalam sektor kejuruteraan pembuatan (Boldyrev, Shchurov & Nikonov 2016). Daripada aspek reka bentuk dan penghasilan bahan termaju, pengkajian bahan juga melibatkan julat keplastikan. Proses ini memerlukan penilaian kuantitatif aliran tegasan menggunakan kaedah yang efektif kerana ia mempengaruhi sifat keplastikan bahan. Justeru, kajian lanjut berkenaan penyelakuan penguatan aluminium diperlukan ke arah penghasilannya secara komersial. Usaha ini juga dilihat mampu mempercepatkan perkembangan HPT kerana antara matlamat kajian HPT adalah untuk meningkatkan dimensi sampel yang berskala makmal untuk reka bentuk aplikasi yang lebih besar. Potensi aluminium sebagai bahan gantian dan permasalahan kajian diperincikan dalam bahagian seterusnya.

1.4 POTENSI PELAKSANAAN

Inovasi bahan gantian dalam sesebuah reka bentuk kejuruteraan perlu mengambil kira beberapa perkara. Bagi menilai potensi aluminium sebagai bahan gantian dalam industri automotif khususnya, penekanan diberikan terhadap tiga elemen utama iaitu ketersediaan sumber bahan, pemeliharaan alam sekitar serta kos yang munasabah (Fentahun & Savas 2018). Perkara ini menentukan kebolehlaksanaan dan kejayaan inovasi yang dicadangkan. Faktor-faktor tersebut dibincangkan dalam perenggan seterusnya.

Elemen pertama iaitu ketersediaan aluminium adalah berkait langsung dengan kapasiti pengeluarannya. Secara umumnya, aluminium boleh dihasilkan secara primer mahupun sekunder. Sumber bahan mentah aluminium primer adalah daripada pelombongan bauksit yang diproses bagi menghasilkan alumina. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.4(a), logam ini boleh dihasilkan di serata pelusuk dunia dengan peratusan tertentu. Sehingga kini, pengeluaran aluminium didominasi oleh negara China dengan peratusan >50% daripada kapasiti pengeluaran sedunia (Biswas 2018). Selain itu, penghasilan aluminium sekunder juga semakin meningkat dan ianya dilihat mampu menampung permintaan aluminium sedunia dengan signifikan. Seperti

yang dilaporkan oleh Steinbach & Wellmer (2010) dalam Rajah 1.4(b), pengeluaran aluminium sekunder pada 2020 dijangka mencecah 40% daripada jumlah keseluruhan pengeluaran aluminium. Jumlah penghasilan logam ini dijangka meningkat dan melebihi 70 juta tan menjelang 2025.



Rajah 1.4 (a) Pengeluar aluminium dunia yang utama (Beethika Biswas, 2018), (b) perbandingan penghasilan aluminium primer dan sekunder (Steinbach & Wellmer 2010)

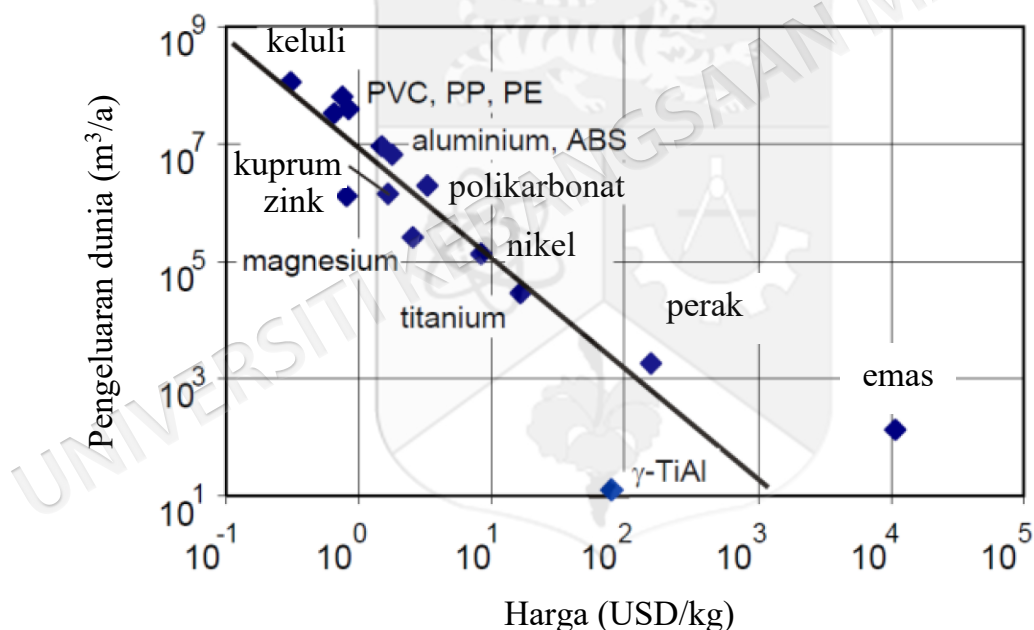
Penghasilan aluminium sekunder adalah berkait dengan elemen kedua yang ditekankan dalam penggantian bahan iaitu pemeliharaan alam sekitar. Penggantian bahan yang baik haruslah menyokong pelaksanaan teknologi hijau yang menitikberatkan penggunaan bahan terbiodegrasi. Dalam kes kebarangkalian penggunaan bahan terbiodegradasi adalah rendah, pilihan untuk bahan kitar semula perlu dipertimbangkan. Ini adalah seiring dengan usaha pemeliharaan alam sekitar dan kelestarian sumber bahan mentah sedunia. Namun begitu, terdapat beberapa isu semasa yang dihadapi oleh industri kitar semula sedunia. Umum mengetahui bahawa selaku pengeluar aluminium primer terbesar, China juga merupakan pengimport bahan kitar semula terbesar dunia semenjak 1980-an. Namun, berkuatkuasa 1 Januari 2018, polisi baru China yang dikenali sebagai *Operation National Sword* (2017) mengenakan larangan import terhadap bahan buangan tercemar dan bahan buangan berketulenan rendah kerana ianya tidak boleh dikitar semula. Tindakan ini memberi kesan kepada pasaran global untuk bahan kitar semula khususnya kertas dan plastik (Alademi 2020).

Tidak seperti kertas dan plastik yang mengalami penyusutan nilai kerana cenderung menjadi bahan buangan tercemar, tin aluminium masih mempunyai nilai pasaran yang tinggi secara relatif (Husock 2020). Kebolehkitaran semula aluminium secara 100% berbanding bahan lain menjadi penyelamat utama kerana sifatnya dapat dikekalkan walaupun setelah dikitar semula. Hampir 75% daripada penghasilan aluminium dunia masih digunakan sehingga hari ini menjadikan aluminium sebagai sumber boleh diperbaharui, dan hampir 90% daripada aluminium sekunder ini digunakan dalam sektor pengangkutan dan pembinaan (Beheshti 2017). Sebaliknya, hanya 9% daripada pengeluaran plastik boleh dikitar semula (Geyer, Jambeck & Law 2017). Di samping itu, penghasilan aluminium sekunder melalui kitar semula juga adalah lebih mesra alam sekitar. Ia hanya memerlukan 5% tenaga dan membebaskan 5% gas rumah hijau berbanding pengeluaran aluminium primer (Gerber 2009).

Di samping penggunaan tenaga yang intensif, pengeluaran aluminium primer juga melibatkan isu pemeliharaan alam sekitar, yang mana penghasilan alumina disertai dengan lumpur merah yang mengancam alam sekitar. Namun begitu, *Bauxite Residue Roadmap* (2020) yang dilancarkan pada 15 November 2020 baru-baru ini memberikan sinar baru dalam mengatasi cabaran ini. Perancangan tersebut menggariskan usaha ke

arah memaksimumkan penggunaan lebihan bauksit untuk aplikasi pembuatan simen. Selain membuka peluang baru, inovasi ini merupakan suatu langkah penting dalam menyelesaikan isu alam sekitar yang dihadapi pengeluaran aluminium semasa pengeluaran aluminium primer.

Elemen seterusnya dalam membincangkan potensi bahan gantian yang perlu diperhalusi adalah kos. Kos ini melibatkan kos bahan mentah dan juga kos implementasi. Rajah 1.5 menunjukkan perbandingan kos pengeluaran beberapa bahan logam. Dapat diperhatikan bahawa kos pengeluaran aluminium adalah secara relatifnya lebih rendah berbanding bahan ringan yang lain seperti titanium dan magnesium. Kebolehkitaan aluminium yang tinggi dengan kos yang lebih kompetitif ini menjelaskan kelebihan bahan ringan ini daripada sudut kos-efektif.



Rajah 1.5 Perbandingan kos pengeluaran bahan (Friedrich, Brinkmann & Schwenk 2018)

Seterusnya, pengenalan teknologi maju semestinya melibatkan kos yang lebih tinggi pada peringkat awal pelaksanaannya. Namun begitu, beberapa alternatif boleh dilaksanakan bagi mengurangkan kos pelaksanaan ini. Selain daripada pengurangan kos keseluruhan melalui pengeluaran secara pukal dan komersil, pengubahsuaian terhadap dimensi reka bentuk mampu mengurangkan penggunaan bahan. Oleh itu, kos

keseluruhan dapat dikurangkan hasil penjimatan bahan. Situasi ini telah didemonstrasikan melalui penggantian teras-B kenderaan yang lebih nipis menggunakan keluli kekuatan tinggi (Adam 2009). Pendekatan ini turut diguna pakai dalam konsep reka bentuk komponen kenderaan moden yang lebih kompak dan dalam masa yang sama mengekalkan keutuhan struktur yang dikehendaki.

Potensi aluminium dalam semua elemen yang telah digariskan menjadi kunci utama pemilihan bahan ini sebagai bahan gantian untuk dikembangkan. Di samping potensi penguatan aluminium menggunakan teknik HPT dan kebolehlaksanaannya yang tinggi daripada aspek kelestarian sumber, pemeliharaan alam sekitar dan kos, masih terdapat permasalahan yang perlu diberi perhatian. Permasalahan kajian diperincikan dalam bahagian seterusnya.

1.5 PERMASALAHAN KAJIAN

Dalam usaha ke arah pengkomersilan aluminium kekuatan tinggi, permasalahan dalam pembentukan bahan melalui teknik HPT menjustifikasikan keperluan kajian lanjut. Antara masalah yang dikenalpasti termasuk saiz sampel yang kecil, kaedah permodelan kelakuan penguatan bahan HPT sedia ada yang kurang tepat dan efisien, dan ketidakpastian fenomena aliran tegasan semasa HPT yang masih belum dirungkai. Huraian bagi setiap permasalahan ini adalah seperti berikut.

Penghasilan bahan HPT masih tidak dapat dihasilkan secara komersil walaupun terdapat permintaan tinggi daripada pelbagai industri pembuatan terhadap bahan ringan yang kuat. Sampel HPT yang berskala makmal adalah antara kekangan utama. Selain faktor perkakasan, pembesaran sampel memerlukan pencirian sampel secara efektif. Ini kerana pembebanan kilas HPT menghasilkan terikan yang tidak seragam merentasi jejari sampel cakera. Ketidakteraturan ubah bentuk plastik juga berlaku sepanjang arah ketebalan disebabkan geseran tinggi dan geometri andas (Hohenwarter et al. 2009; Lee et al. 2012). Bagi memastikan keutuhan bahan HPT pada pembebanan tertentu, penelitian kehomogenan bahan secara menyeluruh amat dititikberatkan (Panda et al. 2017; Almazrouee et al. 2015; Shahmir et al. 2016). Prosedur yang lazimnya dikaitkan

dengan penilaian tegasan adalah ujian tegangan. Namun, ujian tegangan melibatkan menyediakan spesimen, menjadikannya bersifat ujian musnah. Sampel HPT yang biasa dilaporkan adalah berdiameter antara 10 mm hingga 20 mm. Saiz sampel HPT yang kecil ini menghadkan bilangan spesimen ujian tegangan dan penilaian tegasan secara menyeluruh.

Pengujian ciri pukal ini mendorong usaha permodelan penguatan bahan HPT. Namun, ketersediaan kajian permodelan penguatan bahan HPT adalah terhad berbanding uji kaji dan simulasi. Kekurangan ini ditambah pula dengan kelemahan teknik permodelan sedia ada. Permodelan mekanik mikro melibatkan prosedur yang kompleks dan penelitian berskala mikro yang teliti. Penilaian mikrostruktur bahan HPT yang bergantung kepada pengetahuan dan pengalaman berasaskan individu memakan masa dan penilaian yang konsisten antara individu adalah sukar. Kesesuaian permodelan berasaskan termal pula bergantung kepada jenis bahan dan parameter pemprosesan. Bagi sesetengah bahan khususnya seperti aluminium dan kuprum, perubahan suhu adalah tidak ketara pada kadar terikan yang rendah (Edalati et al. 2011; Figueiredo et al. 2012a). Keadaan ini menjelaskan keperluan terhadap pendekatan permodelan makro mekanikal.

Seterusnya, masih terdapat ketidakpastian dalam menyediakan penjelasan teori untuk fenomena aliran tegasan semasa HPT. Sebagai contoh, fenomena yang paling ketara tidak dapat dijelaskan melalui pengetahuan aliran tegasan adalah penguatan yang berlaku di pusat cakera. Peningkatan tegasan di pusat cakera adalah tidak selari dengan kefahaman teori asas berkenaan terikan sifar pada paksi putaran. Selain itu, kajian berkaitan kesan pembolehubah andas terhadap aliran tegasan juga kurang ditekankan kerana tidak praktikal untuk dilaksanakan melalui pendekatan uji kaji, atas faktor kos dan kebolehlaksanaan. Sebagai alternatif, perkembangan terkini dalam kejuruteraan komputer dan pengiraan berangka terbantu komputer mendorong pementapan pengetahuan HPT melalui pendekatan simulasi.

Walaupun pendekatan simulasi adalah efektif untuk mensimulasikan fenomena yang terjadi kesan pembebanan, fungsi pengerasan HPT yang sedia ada mempunyai beberapa kelemahan. Sebagai contoh, penggunaan tingkahlaku plastik sempurna

(Kamrani, Levitas & Feng 2017) dan plastik tegar (Figueiredo et al. 2012a; Kulagin et al. 2019; Pereira et al. 2014) adalah kurang tepat kerana pengerasan kerja dianggap sifar. Maka, kesesuaian penggunaannya adalah hanya pada julat terikan tertentu. Manakala persamaan menjujuk berasaskan fenomenologi (Kulagin et al. 2017) pula memerlukan data uji kaji yang komprehensif untuk menentukan pemalar bahan. Di samping itu, terdapat juga kajian simulasi HPT (Khiavi & Emadoddin 2018; Song et al. 2014) yang tidak melaporkan butiran model HPT dengan jelas. Berdasarkan permasalahan kajian tersebut, objektif kajian digariskan dalam bahagian berikut. Ia diikuti dengan pembentangan skop kajian.

1.6 OBJEKTIF KAJIAN

Objektif utama kajian ini ialah untuk membangunkan formulasi kelakuan penguatan HPT yang ditentukan untuk bahan logam ringan aloi aluminium AA2024. Secara spesifik, kajian ini menggariskan objektif khusus seperti berikut:

1. Untuk meningkatkan sifat mekanikal dan mikrostruktur aloi aluminium AA2024 melalui ubah bentuk plastik melampau HPT,
2. Untuk membangunkan model kelakuan penguatan aloi aluminium AA2024 terproses HPT menggunakan pendekatan makro mekanik,
3. Untuk menentusahkan model kelakuan penguatan yang dibangunkan berbanding data uji kaji, dan
4. Untuk mengawal ubah bentuk HPT melalui analisis berparameter simulasi berangka yang telah ditentukan.

1.7 SKOP KAJIAN

Bagi mencapai objektif kajian yang telah digariskan, kajian ini memfokuskan kepada beberapa perkara. Perbincangan yang memerlukan perincian terhadap mana-mana elemen di luar skop kajian seperti analisis kepatahan hanya dibincangkan melalui sokongan kajian kepustakaan. Skop kajian ini diringkaskan seperti berikut.

1. Penambahbaikan sifat bahan memfokuskan kepada peningkatan kekuatan tegangan. Kekuatan tegangan merupakan sifat yang paling banyak mendapat perhatian di kalangan penyelidik HPT. Kesan pemprosesan HPT terhadap sifat bahan yang lain seperti kakisan, kemagnetan, kekonduksian dan sebagainya diabaikan. Jenis ukuran kekuatan lain seperti kekuatan retakan, kekuatan lesu, kekuatan pengkaratan dan hentaman tidak dipertimbangkan,
2. Kaedah penilaian pukal dan setempat dipertimbangkan dalam penyelakuan bahan melalui pendekatan uji kaji. Bagi kaedah penilaian pukal, ujian tegangan dan XRD dilakukan bagi mengesahkan pencirian kekuatan dan mikrostruktur bahan. Bagi kaedah penilaian setempat pula, ujian kekerasan Vickers digunakan untuk menilai kekerasan sepanjang jejari sampel pada setiap bilangan putaran. Pencirian bahan melalui ujian yang lain tidak dipertimbangkan,
3. Pendekatan permodelan mekanik makro diambil kira dalam memformulasikan kelakuan penguatan bahan HPT. Sifat mekanikal dipilih berdasarkan kebolehcapaian data uji kaji bagi menyediakan kaedah permodelan penyelakuan sampel yang efektif. Sebaliknya, faktor mikro seperti jenis ira dan pergerakan kehelan yang terangkum dalam pendekatan mikro mekanik tidak diambil kira dalam permodelan,
4. Simulasi kaedah unsur terhingga dipertimbangkan untuk analisis berparameter dalam penilaian aliran tegasan,
5. Faktor suhu diabaikan dalam model simulasi kerana aluminium menunjukkan peningkatan suhu yang minimal dengan peningkatan terikan,
6. Kesan geseran turut diabaikan dalam model simulasi yang mana pemprosesan dianggap mematuhi keadaan permukaan sentuhan ideal tanpa gelinciran.
7. Kekasaran permukaan tidak mempengaruhi penguatan bahan. Oleh itu, pengukuran parameter ini tidak dilakukan, dan
8. Kadar terikan hanya memberi kesan yang sedikit terhadap tegasan. Oleh itu, parameter ini tidak diambil kira dalam model simulasi.

1.8 RANGKA KAJIAN

Tesis ini dibahagikan kepada lima bab. Menyusuli bab pendahuluan ini ialah Bab 2, iaitu kajian kepustakaan yang berkaitan. Penerangan yang dirangkumkan membantu kefahaman untuk pembacaan bab seterusnya, terutamanya daripada sudut asas kajian seperti pemilihan parameter, kaedah dan sebagainya. Bab 2 diakhiri dengan rangkuman kajian kepustakaan yang dibentangkan.

Dalam Bab 3, keseluruhan metodologi kajian diperincikan. Penerangan dimulai dengan prosedur uji kaji HPT. Ia menjadi asas pelaksanaan dan pengesahan proses seterusnya iaitu pembangunan model kelakuan penguatan dan simulasi penguatan HPT. Penerangan berkaitan pengekstrakan sifat mekanikal daripada data uji kaji sehingga pembangunan model penyelakuan bahan AA2024 diterangkan dan ia adalah fokus kajian ini. Prosedur implementasi simulasi unsur terhingga untuk ramalan penyelakuan aliran tegasan turut dijelaskan. Seterusnya, elemen penambahbaikan yang diutarakan dalam kajian ini diringkaskan di akhir Bab 3.

Dapatan kajian dibincangkan dalam Bab 4. Perbincangan dapatan ini disusun mengikut objektif kajian yang telah ditetapkan. Bab 5 pula menyimpulkan pencapaian utama dan kesimpulan hasil kerja yang dilaksanakan. Kemudiannya, kajian masa hadapan dicadangkan.

Tesis ini diakhiri dengan senarai rujukan dan lampiran berkaitan. Ini termasuk senarai penerbitan, implementasi berangka HPT dan algoritma pengaturcaraan yang digunakan dalam simulasi unsur terhingga.

BAB II

KAJIAN KEPUSTAKAAN

2.1 PENGENALAN KAJIAN KEPUSTAKAAN

Bab ini menghuraikan analisis kajian literatur yang membentuk asas kajian ini. Perbincangan ini dimulai dengan konsep dan keupayaan teknik HPT dalam meningkatkan sifat bahan, khususnya aloi aluminium. Ini diikuti oleh penerangan berkaitan asas ubah bentuk bahan logam sehingga permodelan ubah bentuk bahan HPT sedia ada. Seterusnya, kepentingan kajian simulasi unsur terhingga untuk bahan HPT dibincangkan dan formulasi keplastikan bahan HPT yang telah dilaporkan sehingga kini dijelaskan. Rangkuman ini adalah penting dalam mengukuhkan kefahaman teori yang membawa kepada pengenalanpastian jurang kajian. Berdasarkan jurang kajian yang dikenalpasti, kajian ini dirangka dan metodologi kajian diperincikan dalam bab yang seterusnya. Kajian literatur pertama yang membincangkan tentang keupayaan HPT dijelaskan dalam seksyen selepas ini.

2.2 KILAS TEKanan TINGGI

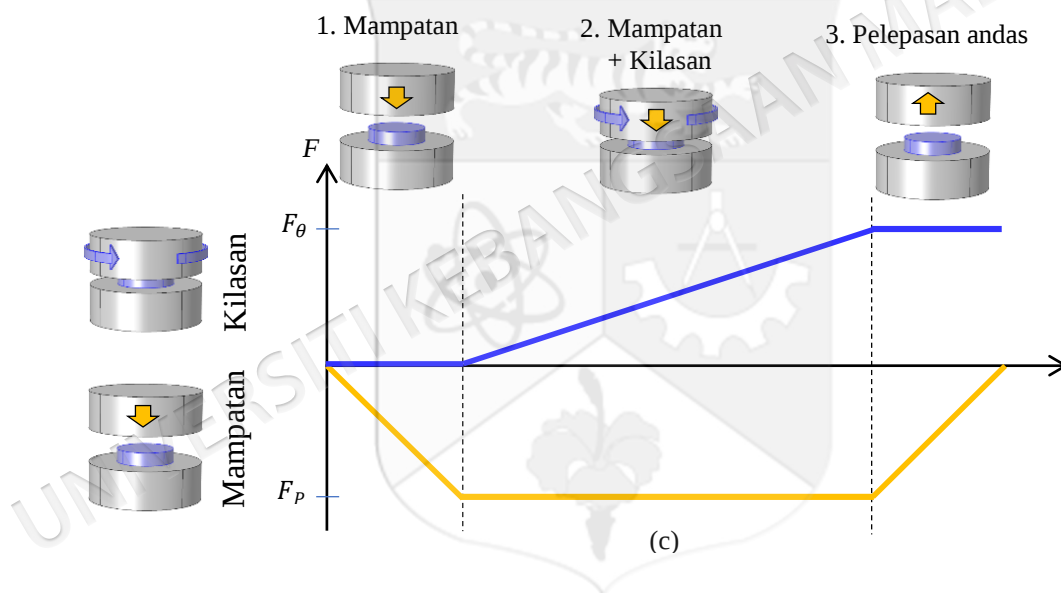
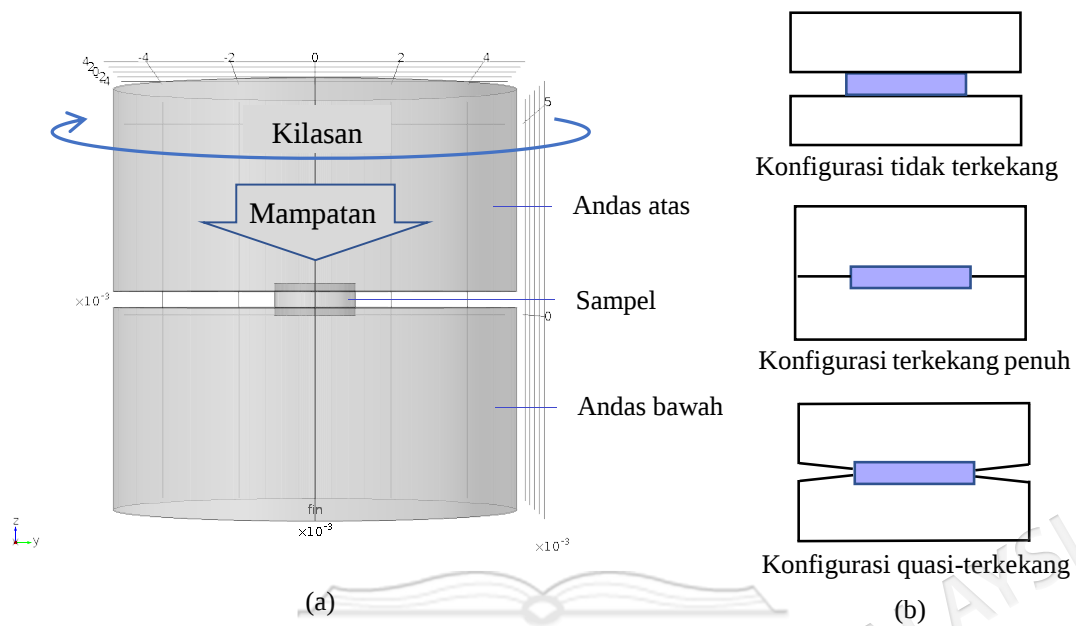
Teknik HPT adalah berlandaskan konsep penghalusan ira melalui terikan ricih yang besar secara berterusan. Pelbagai aspek diberi penekanan dalam kajian HPT ke arah transformasi bahan ringan kekuatan tinggi, khususnya aloi aluminium untuk aplikasi industri. Usaha penyelidikan yang mendalam ini jelas mempamerkan keyakinan penyelidik terhadap prospek aloi aluminium kekuatan tinggi untuk reka bentuk kejuruteraan akan datang. Prinsip asas dan keupayaan HPT dalam meningkatkan ciri mikrostruktur dan makrostruktur aloi aluminium dibincangkan seperti berikut.

2.2.1 Prinsip Asas HPT dan Pembolehubah Penguatan

Kajian ulasan HPT yang terperinci boleh dirujuk daripada Kaveh & Horita (2016) dan Borodachenkova, Wen & Pereira (2017). Rajah 2.1 menunjukkan lakaran skematik, konfigurasi dan mekanisma pembebanan HPT. Rajah 2.1(a) memperkenalkan andas, iaitu komponen yang bersentuh secara langsung dengan sampel semasa HPT. Rajah 2.1(b) menunjukkan konfigurasi andas untuk sampel berbentuk cakera nipis, dan Rajah 2.1(c) pula menunjukkan graf pembebanan yang dikenakan melalui andas ke atas sampel. Berdasarkan rajah tersebut, pembebanan HPT dan evolusi konfigurasi andas dihuraikan seperti berikut.

Semasa HPT, sampel yang berbentuk cakera diletakkan di antara dua andas. Lebih besar isipadu andas, lebih kecil kesan kenaikan suhu sampel (Pereira et al. 2014). Sampel dan andas ini disambungkan dengan pemegang yang besar yang bertindak sebagai penyerap haba (Edalati et al. 2011). Reka bentuk HPT sentiasa ditambahbaik dari semasa ke semasa bagi mengoptimumkan hasil pemprosesan. Ia diperkenalkan dengan reka bentuk andas tidak terkekang, terkekang penuh, sehingga kuasi terkekang. Dalam rekaan terawal HPT (Bridgman 1935), konfigurasi andas tidak terkekang yang diperkenalkan membenarkan aliran keluar bahan pada pinggir sampel semasa pembebanan diperkenalkan. Mekanisma ini menghasilkan tekanan balikan yang kecil dan menyebabkan penipisan sampel yang berterusan. Penipisan sampel ini adalah kritikal kerana andas mungkin bersentuhan pada sebahagian kawasan sampel dan menghasilkan permukaan tidak sekata yang menjadikan dimensi akhir sukar dikawal (Zhilyaev & Langdon 2008). Rekaan ini kemudiannya ditambah baik melalui pengenalan konfigurasi terkekang penuh.

Secara teori, konfigurasi HPT terkekang penuh dilakukan dengan kehadiran tekanan balikan efektif. Namun, tekanan yang tinggi menyebabkan bahan dipaksa keluar pada pinggir sampel, mengisi ruang antara tolerans geometri sampel dan andas, dan mengakibatkan pembentukan pinggir terbina (Hohenwarter et al. 2009). Kesannya, geseran meningkat menyebabkan daya kilas yang diperlukan lebih tinggi untuk memutar andas. Selain itu, pemprosesan bahan berkekuatan tinggi seperti keluli menggunakan konfigurasi ini adalah cenderung untuk merosakkan andas akibat



Rajah 2.1 Lakaran skematik HPT: (a) komponen yang terlibat secara langsung semasa pembebanan, (b) perbandingan konfigurasi andas, (c) graf pembebanan.

faktor penumpuan tegasan (Yogo et al. 2017).

Sebagai alternatif dalam mengatasi masalah penipisan sampel dan geseran andas, konfigurasi andas kuasi-terkekang pula diperkenalkan. Konfigurasi ini membenarkan sejumlah kecil aliran keluar bahan pada pinggir cakera sampel dan menghasilkan gerigis. Oleh kerana kesan penumpuan tegasan dapat dikurangkan,

risiko kegagalan retak terhadap andas yang bersifat rapuh dapat dielakkan (Yogo et al. 2017). Konfigurasi ini banyak diaplikasikan dalam kajian HPT masa kini kerana lebih praktikal (Ahmadkhaniha et al. 2018; Kawasaki et al. 2016; Lage et al. 2019).

Dengan konfigurasi andas yang ringkas, keunikan HPT juga terletak pada teknik pembebanannya. HPT mengaplikasikan gabungan beban mampatan dan kilasan secara serentak. Dengan menetapkan sebuah andas, sebuah andas lagi mengenakan beban mampatan dan kilasan terhadap sampel. Beban mampatan yang tinggi dikenakan melalui anjakan andas dalam arah paksian sehingga mencapai beberapa GPa. Selain tekanan tinggi, permukaan andas yang kasar disediakan bagi memastikan tiada gelinciran semasa pembebanan. Beban kilas pula dihasilkan apabila andas yang sama diputar pada paksi putaran menegak sehingga mencapai darjah putaran yang ditetapkan. Tindakan ini membolehkan pengaplikasian terikan terhadap sampel secara berterusan. Kelebihan ini mengatasi pesaing terdekat HPT dalam teknologi SPD iaitu ECAP yang memerlukan proses ulangan untuk penambahan terikan.

Rajah 2.2 menjelaskan terikan ricih pada sampel HPT semasa beban kilas. Terikan ricih γ pada jejari r dan sudut putaran θ ditakrifkan dalam Persamaan 2.1.

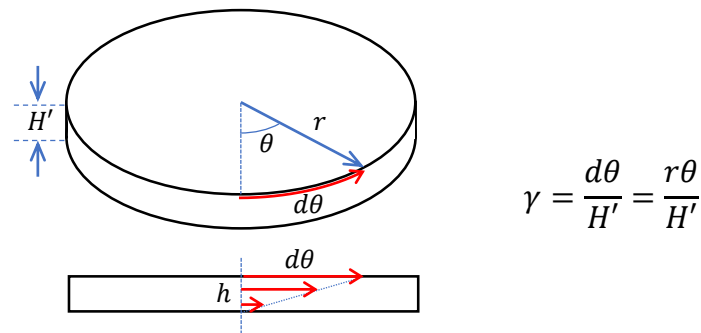
$$\gamma = \frac{d\theta}{H'} \quad (2.1)$$

yang mana anjakan bersudut $d\theta = r\theta$. Persamaan ini diguna pakai dalam HPT dengan andaian bahawa tiada perubahan pada ketebalan sampel H' . Kriteria lazim yang digunakan untuk menganggar terikan HPT adalah berdasarkan tenaga ubah bentuk setara (Stüwe 2003), iaitu $\varepsilon = \gamma/\sqrt{3}$. Jadi terikan ricih dalam Persamaan 2.1 ditakrifkan sebagai terikan setara von Mises, seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.2.

$$\varepsilon = \frac{r\theta}{\sqrt{3}H'} \quad (2.2)$$

yang mana θ juga boleh digantikan dalam sebutan bilangan putaran N , $\theta = 2\pi N$.

Lazimnya, terikan plastik tinggi dalam pembebanan HPT mencecah 100 sehingga 1500 kali ganda berbanding julat terikan gelean dan penempaan (Alhamidi & Horita 2015; Bazarnik et al. 2015; Isik et al. 2016; Mohamed et al. 2015; Naghdy et al.



Rajah 2.2 Terikan ricih pada sampel HPT.

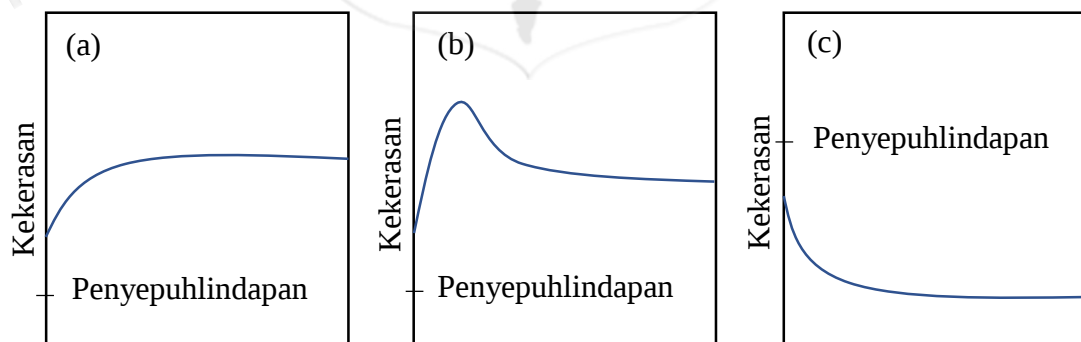
2016). Terikan dalam proses konvensional kebiasaannya berada antara julat 0.1 hingga 0.5 (Kalpakjian & Schmid 2017). Walaupun terikan HPT adalah jauh lebih besar, perubahan dimensi keratan rentas sampel HPT adalah tidak ketara jika dibandingkan dengan proses pembentukan logam konvensional. Faktor ini juga memberi kelebihan kepada pemprosesan HPT kerana sifat bahan boleh diubah suai dengan mengekalkan bentuk asal sampel HPT.

Namun begitu, terikan plastik yang tinggi lazimnya dikaitkan dengan penjaan haba. Kesan kenaikan suhu dialami oleh sesebuah bahan semasa HPT akibat ubah bentuk plastik yang sangat tinggi. Walau bagaimanapun, peningkatan suhu adalah lebih ketara untuk bahan yang lebih keras (Figueiredo et al. 2012b). Selain jenis bahan, masa pemprosesan, kadar putaran dan jarak daripada pusat putaran yang lebih tinggi juga merekodkan suhu yang lebih tinggi (Pereira et al. 2014). Menurut kajian tersebut, pengubahsuaian parameter kadar putaran adalah paling efisien untuk mengurangkan kesan kenaikan suhu.

Selain daripada faktor yang telah disebutkan, proses kawalan termo-mekanikal (TMCP) dalam pembentukan logam seperti yang diperincikan oleh Ishikawa (2012) juga memberi kesan dalam memahami dan mengawal evolusi penguatan HPT. Sampel biasanya dirawat haba dan dilindapkejut sebelum HPT untuk menghomogenkan larutan pepejal (Straumal et al. 2017; Zafari et al. 2015). Keadaan morfologi fasa mikrostruktur awal seperti martensit, sferoid, cementit, mempengaruhi tahap penguatan. Bagi keluli contohnya, struktur sementit yang nipis membolehkan

penghalusan ira yang signifikan berbanding struktur karbida (Ganeev, Ivanisenko & Valiev 2019). Manakala TMCP dijalankan selepas HPT melalui proses penyepuhlindapan dan penuaan. Proses penyepuhlindapan jangka pendek (Shahmir et al. 2016) dan semulajadi pada suhu bilik (Zhang et al. 2016) mampu mencegah pertumbuhan ira yang menghasilkan paduan kekuatan tinggi dan kemuluran yang baik. Penuaan bahan HPT juga berupaya meningkatkan kekuatan disebabkan pembentukan mendakan (Dobatkin et al. 2016; Mohamed et al. 2017; Purcek et al. 2018).

Sehingga kini, terdapat tiga corak evolusi penguatan dengan peningkatan terikan setara semasa HPT yang telah dikenapasti (Kawasaki 2014; Kawasaki, Ahn & Langdon 2010). Rajah 2.3 menunjukkan tiga kelakuan penguatan bahan secara umum iaitu penguatan tanpa pemulihan, penguatan dengan pemulihan dan pelembutan. Aloi aluminium cenderung untuk menunjukkan kelakuan penguatan tanpa pemulihan iaitu berlaku penguatan sehingga mencapai peringkat tepu. Manakala kelakuan pelembutan lebih cenderung untuk berlaku dalam logam tulen seperti aluminium, magnesium dan zink berketulenan tinggi, pada suhu homolog T_H yang lebih besar daripada 0.3 (Kawasaki, Lee et al. 2014), yang mana $T_H = T/T_L$ dan T_L adalah suhu takat lebur. Kelakuan pelembutan adalah disebabkan tenaga gagal tindanan yang sangat tinggi yang memudahkan gelinciran silang dan pemulihan mikrostruktur yang pantas (Xu, Horita & Langdon 2007).



Rajah 2.3 Evolusi penguatan bahan HPT: (a) tanpa pemulihan, (b) dengan pemulihan dan (c) pelembutan (Kawasaki 2014; Kawasaki et al. 2010).

2.2.2 Penambahbaikan Sifat Mikrostruktur dan Mekanikal Bahan HPT

Jadual 2.1 menunjukkan pengubahsuaian sifat mekanikal dan mikrostruktur untuk beberapa jenis bahan yang diproses HPT. Ujian kekerasan Vickers digunakan dalam menilai kekerasan bahan HPT kerana pelekukan yang terhasil menggunakan kaedah ini adalah lebih kecil berbanding kaedah yang lain. Oleh itu, kaedah ini lebih sesuai untuk mengukur kekerasan setempat untuk sampel HPT yang berdiameter kecil ($D \leq 30$ mm) dan nipis ($H' \leq 1$ mm). Berdasarkan jadual tersebut, bahan merangkumi logam dan komposit mengalami pengerasan yang signifikan hasil pemprosesan HPT. Parameter pemprosesan bagi setiap bahan yang berbeza menunjukkan keperluan kajian tersendiri dalam penentuan parameter pemprosesan optimum untuk bahan tertentu.

Jadual 2.1 Pengubahsuaian sifat mekanikal dan mikrostruktur bagi beberapa jenis bahan yang diproses menggunakan teknik HPT.

Bahan	Kekerasan (Hv)	Kekuatan tegangan (MPa)	Pemanjangan (%)	Saiz ira (nm)
Kuprum tulen ^a	–	414 (↑ 89%)	25 (↓ 43%)	550
Komposit Al–Si–Cu ^b	230 (↑ 188%)	420 (↑ 100%)	–	60–70
Aloi Al–4 wt% Cu ^c	210 (↑ 200%)	820 (↑ 241%)	25 (↓ 46%)	210
Aloi Ti–24Nb–4Zr–8Sn ^d	300 (↑ 50%)	1000 (↑ 50%)	2.5 (↓ 84%)	20–50
Keluli karbon C45 ^e	–	1200 (↑ 94%)	12 (↓ 14%)	1000

^a $N = 1$, $P = 0.9$ GPa, $\omega = 1.0$ rpm, T = suhu bilik (Um et al. 2014).

^b $N = 5$, $P = 5$ GPa, $\omega = 0.5$ rpm, T = suhu bilik (Gode et al. 2014).

^c $N = 5$, $P = 6$ GPa, $\omega = 1.0$ rpm, T = suhu bilik (Mohamed et al. 2015).

^d $N = 50$, $P = 3$ GPa, $\omega = 1.0$ rpm, T = suhu bilik (Sharman et al. 2015).

^e $N = 10$, $P = 6$ GPa, $\omega = 0.2$ rpm, $T = 350$ °C (Ganeev et al. 2019).

Selain daripada bahan yang disenaraikan, peningkatan kekerasan juga dibuktikan dalam julat bahan yang luas, seperti yang dilaporkan oleh pelbagai kajian terdahulu (Abd El Aal et al. 2013; Alhajeri et al. 2016; Andreau et al. 2014; Bazarnik et al. 2015, 2016; Chen et al. 2015; Gode et al. 2014; Kawasaki, Foissey & Langdon 2013; Lee et al. 2016). Pada peringkat awal pembebanan kilas, kekerasan adalah lebih tinggi pada jejari luaran disebabkan terikan yang lebih tinggi. Namun, taburan kekerasan yang lebih homogen merentasi jejari sampel boleh dicapai dengan peningkatan bilangan putaran.

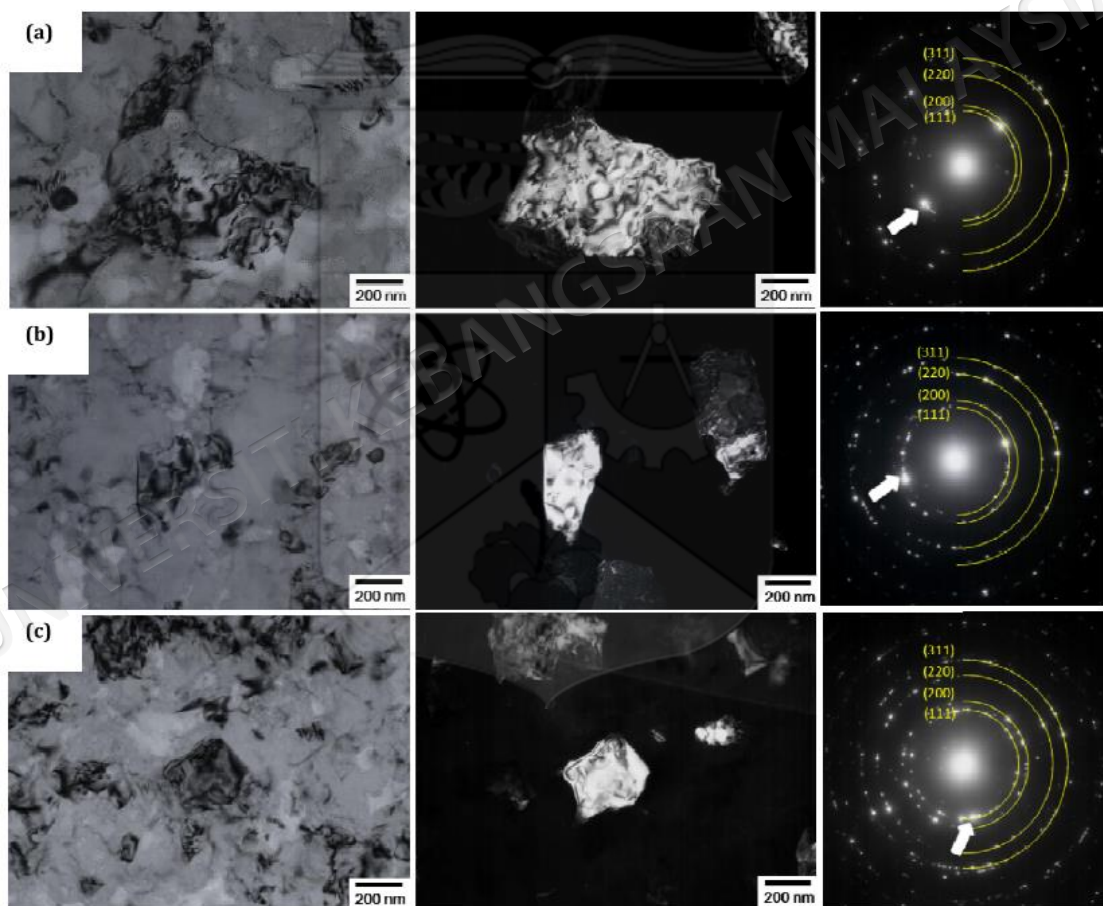
Seperti kekerasan, kekuatan juga meningkat dengan penambahan jejari dan darjah putaran. Bahan-bahan diproses HPT biasanya mencapai kekuatan alah dan kekuatan tegangan yang lebih tinggi berbanding teknik SPD yang lain (Bazarnik et al. 2016; Zheng et al. 2016; Bhovi et al. 2016; Gode et al. 2014; Huang et al. 2016; Valiev et al. 1999; Xu et al. 2013). Daripada perbandingan yang ditunjukkan dalam Jadual 2.1, aloi aluminium menunjukkan peningkatan kekerasan dan kekuatan yang amat ketara. Walaupun begitu, kajian-kajian tersebut turut melaporkan pengurangan kemuluran dengan peningkatan kekuatan dan kekerasan. Pengurangan kemuluran memberi impak terhadap kebolehbentukan bahan.

Walaupun kemuluran bahan berkurang dengan peningkatan kekuatan, kebolehbentukan bahan HPT dapat ditingkatkan pada suhu tinggi. Pada suhu tertentu, bahan HPT menunjukkan kebolehan ubah bentuk superplastik (Dobatkin et al. 2005; Kawasaki et al. 2013; Kawasaki & Langdon 2011; Lee et al. 2016). Sifat superplastik adalah merujuk kepada pemanjangan bahan melebihi 400% (Langdon 2009). Selain suhu pembentukan, kemuluran bahan HPT juga bergantung kepada fasa mikrostruktur bahan. Shahmir et al. (2018) membuktikan bahawa pembentukan kubik berpusat muka berstruktur martensit dalam aloi martensit semasa HPT boleh membantu mempertingkatkan ciri superplastik sesebuah bahan berbanding stuktur lamela.

Kekuatan dan kemuluran bahan juga adalah sangat bergantung kepada saiz dan taburan ira kerana sempadan ira bertindak sebagai halangan terhadap pergerakan kehelan. Secara keseluruhannya, penguatan bahan HPT boleh disumbangkan oleh mekanisme pengerasan sempadan ira, ketumpatan kehelan, larutan pepejal dan mendakan (Mohamed et al. 2015). Bagi kebanyakan bahan terutamanya aloi, mekanisme paling utama yang menyumbang kepada penguatan adalah pengerasan sempadan ira (Tejedor et al. 2019). Analisis menggunakan mikroskop elektron penghantaran (TEM), mikroskop elektron imbasan (SEM) dan pembelauan sinar X (XRD) mengesahkan penambahbaikan sifat mikrostruktur dengan peningkatan terikan semasa HPT.

Rajah 2.4 menunjukkan penelitian TEM bagi AA6061 yang diproses HPT pada terikan berbeza iaitu $\varepsilon = 0.3$ (awal), $\varepsilon = 15$ (pertengahan) dan $\varepsilon = 70$ (akhir), yang mana kekerasan tepu dicapai (Mohamed, Lee & Horita 2013). Ketumpatan kehelan

yang tinggi pada awal pembebanan ($\varepsilon = 0.3$) ditunjukkan pada imej bidang gelap. Corak pembelauan elektron kawasan terpilih (SAED) yang membentuk lingkaran pula menggambarkan peningkatan sudut misorientasi antara ira yang bersebelahan, membuktikan pengecilan ira. Penyerakan titik belauan pada lingkaran SAED yang lebih sekata pada peringkat tepu ($\varepsilon = 70$) pula membuktikan pengecilan saiz ira yang lebih seragam. Perbandingan ketiga-tiga peringkat pembebanan ini membuktikan penghalusan ira dengan peningkatan terikan HPT. Keadaan ini menjelaskan bahawa terikan daripada kilasan tinggi menghasilkan tenaga yang mencukupi untuk pergerakan kehelan sekaligus menghaluskan ira.

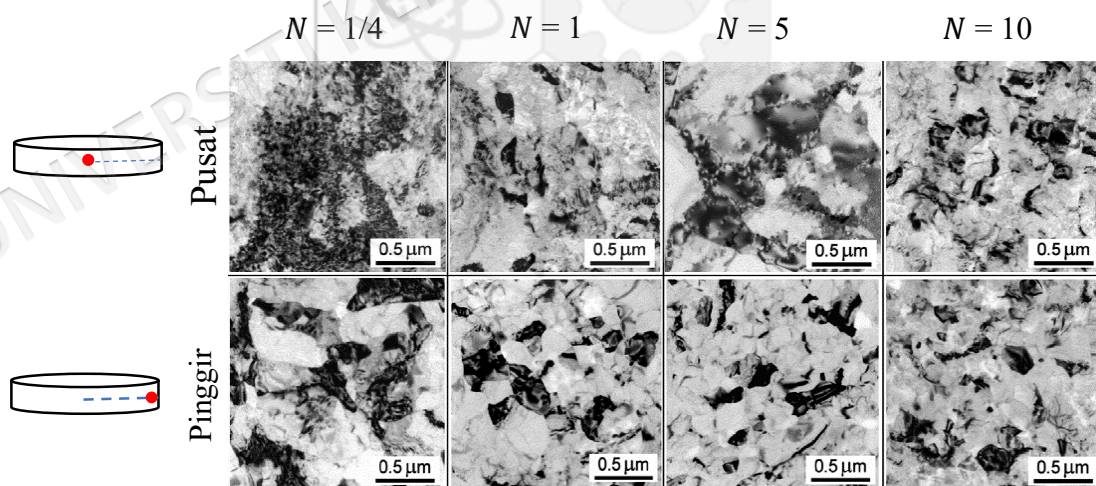


Rajah 2.4 Analisis TEM dalam paparan imej bidang terang (kiri), imej bidang gelap (tengah) dan SAED (kanan) bagi AA6061 bagi tiga peringkat pembebanan $\varepsilon = 0.3$, 15 dan 70 (Mohamed et al. 2013).

Ketiga-tiga peringkat terikan yang dibincangkan mungkin dialami oleh sampel HPT pada suatu masa pembebanan. Keadaan ini disebabkan oleh terikan yang

berkadar terus dengan jejari sampel pada darjah putaran tertentu (yang diberikan pada Persamaan 2.2). Kesannya, kadar penghalusan ira adalah lebih perlahan di pusat berbanding jejari yang lebih besar (Almazrouee et al. 2015). Rajah 2.5 membandingkan saiz ira yang terbentuk di pusat dan pinggir cakera Al-3% Mg dengan peningkatan terikan (Lee et al. 2016). Perbezaan saiz ira adalah ketara pada awal pembebanan ($N = 1/4$). Namun, ketidakhomogenan saiz ira dapat dikurangkan pada $N = 10$. Ini membuktikan bahawa pencapaian kehomogenan merentasi jejari sampel boleh dicapai dengan meningkatkan bilangan putaran.

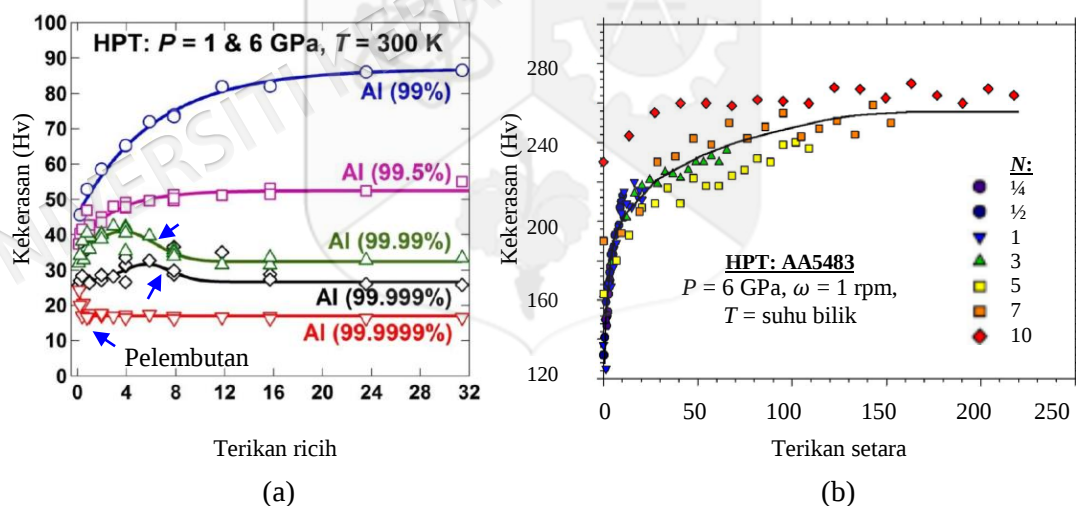
Selain penambahbaikan sifat mikrostruktur dan makrostruktur yang menyumbang kepada peningkatan kekuatan, HPT juga dilaporkan berupaya menambah baik sifat bahan selainnya. Antaranya termasuk peningkatan kadar kakisan (Yusuf et al. 2018, Wang et al. 2015), ketahanan haus (Purcek et al. 2018), keberaliran elektrik (Rijal et al. 2019, Dobatkin et al. 2015) dan kapasiti penyimpanan hidrogen (Edalati, Akiba & Horita 2018; Gajdics et al. 2016). Pencapaian ini menjadikan HPT sebagai teknik pemprosesan yang serba boleh.



Rajah 2.5 Perbandingan saiz ira antara pusat dan pinggir cakera Al-3% Mg pada bilangan putaran tertentu (Lee et al. 2016).

2.2.3 HPT untuk Aluminium dan Aloinya

Aloi aluminium merupakan antara bahan yang paling mendapat perhatian penyelidik HPT (Edalati et al. 2011; Hohenwarter 2015; Kawasaki et al. 2014; Mahallawy et al. 2010; Naghdy et al. 2016; Okeke et al. 2019; Parimi, Robi & Dwivedy 2011). Rajah 2.6(a) menunjukkan evolusi kekerasan bagi aluminium tulen pada ketulenan berbeza terhadap pembebanan HPT. Pada peratus ketulenan yang tinggi ($\geq 99.99\%$), aluminium mempamerkan kelakuan pelembutan (Ito, Edalati & Horita 2017; Kawasaki, Figueiredo et al. 2014). Aluminium tulen diketahui mempunyai tenaga gagal tindanan yang tinggi. Tenaga gagal tindanan ialah sifat bahan yang mengukur tenaga yang terjana akibat gangguan terhadap aturan tindanan normal bagi satah atom dalam struktur kristal padat. Apabila tenaga gagal tindanan tinggi, kehelan separa tidak dipisahkan dan ini memudahkan gelinciran silang. Tenaga gagal tindanan yang tinggi menyebabkan kekerasan awal lebih tinggi di bahagian pusat disebabkan pemulihan dinamik di pinggir cakera (Zhilyaev & Langdon 2008).



Rajah 2.6 Perbandingan evolusi kekerasan dengan peningkatan terikan HPT bagi: (a) aluminium tulen pada ketulenan berbeza (Ito et al. 2017) dan (b) aloi aluminium AA5483 (Bazarnik et al. 2018).

Sebaliknya, aloi aluminium mengalami pengerasan kerja dengan pembebanan HPT. Rajah 2.6(b) menunjukkan kelakuan aliran tegasan yang biasa dilaporkan dalam aloi aluminium. Peningkatan kekerasan berlaku pada awal fasa terikan ($\epsilon < 50$) dan

kemudiannya lebih mendatar pada terikan yang lebih tinggi ($\varepsilon > 50$). Rajah 2.6 menjelaskan bahawa walaupun mengalami pengerasan kerja, kekerasan aluminium tulen yang diproses HPT adalah lebih rendah berbanding aloi aluminium.

Pengaloian boleh mengurangkan tenaga gagal tindanan, kadar pemulihan dan mengubah kelakuan pengerasan bahan (Haasen 1996). Oleh itu, evolusi mikrostruktur berlaku pada kadar yang lebih perlahan dan kehomogenan mikrostruktur memerlukan terikan yang lebih tinggi (Zhilyaev & Langdon 2008). Penambahan elemen pengaloian juga mengurangkan kesan ketepuan saiz ira (Pippan et al. 2010). Bagi bahan berfasa tunggal, pengecilan ira dihadkan oleh migrasi sempadan ira. Pengenalan zarah fasa kedua dibuktikan dapat menstabilkan mikrostruktur, menghapuskan had ketepuan pengecilan ira serta menyumbang kepada kestabilan terma.

Jadual 2.2 merujuk kepada pengkelasan aloi aluminium berdasarkan komposisi elemen utama (Gavrus & Francillette 2011). Setiap siri mempunyai mikrostruktur yang berbeza bergantung kepada komposisi kimianya. Sehingga kini, kekuatan logam berasaskan aluminium berjaya ditingkatkan untuk julat siri yang luas. Aluminium yang berjaya ditingkatkan kekuatannya termasuk siri 1000, iaitu aluminium tulen (Murashkin, Kil'Mametov & Valiev 2008), 2000 (Mohamed et al. 2017), 5000 (Bazarnik et al. 2018; Khiavi & Emadoddin 2018), 6000 (Cepeda-Jiménez et al. 2017) dan 7000 (Ghosh, Gao & Starink 2012).

Jadual 2.2 Pengkelasan siri aloi aluminium mengikut komposisi elemen utama (Gavrus & Francillette 2011).

Siri	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Komposisi utama	Al	Al-Cu	Al-Mn	Al-Si	Al-Mg	Al-Mg-Si	Al-Zn-Mg

Jadual 2.3 pula menunjukkan penambahbaikan sifat mekanikal dan mikrostruktur bagi beberapa siri aluminium dengan dimensi tertentu yang diproses menggunakan teknik HPT. Kebanyakan kelengkapan pemprosesan HPT berupaya memproses sampel yang berdiameter < 15 mm, dan lazimnya ≤ 10 mm. Pemprosesan HPT untuk AA2024 khususnya, menunjukkan penghasilan kekerasan yang konsisten pada ~ 250 Hv, walaupun menggunakan parameter pemprosesan yang berbeza. Nilai ini menjelaskan pencapaian kekerasan tepu bagi AA2024.

Jadual 2.3 Penambahbaikan sifat mekanikal dan mikrostruktur melalui HPT bagi beberapa siri aluminium dengan dimensi tertentu.

Aloi aluminium	Dimensi sampel (mm)		Kekerasan (Hv)	Kekuatan (MPa)	Saiz ira (nm)
	Diameter	Tebal			
AA1570 ^a	20	1.0	235	950	130
AA2024 ^b	14	1.5	250	–	70
AA2024 ^c	10	0.8	249	1160	80
AA2024 ^d	10	1.0	250	–	240
AA2024 ^e	10	1.0	250	43	240
AA5483 ^f	10	0.8	255	–	79
AA6082 ^g	10	1.0	160	580	250
AA7150 ^h	10	0.9	230	–	120

^a $N = 20$, $P = 6$ GPa, $T =$ suhu bilik (Murashkin et al. 2008).

^b $N = 5$, $P = 2.5$ GPa, $\omega = 0.2$ rpm, $T =$ suhu bilik (Vafaei, Toroghinejad & Pippin 2012).

^c $N = 5$, $P = 6$ GPa, $T =$ suhu bilik (Patil et al. 2014).

^d $N = 5$, $P = 6$ GPa, $\omega = 0.2$ rpm, $T =$ suhu bilik (Mohamed, Lee & Horita 2014).

^e $N = 5$, $P = 6$ GPa, $\omega = 1.0$ rpm, $T =$ suhu bilik (Alhamidi & Horita 2015).

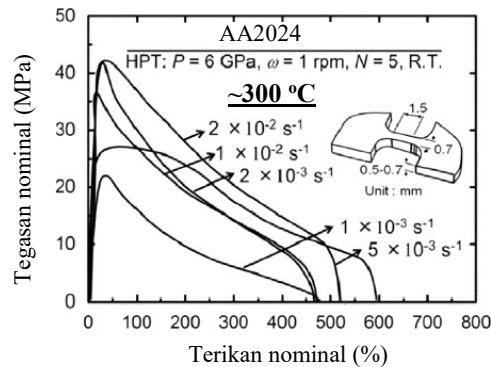
^f $N = 10$, $P = 6$ GPa, $\omega = 1.0$ rpm, $T =$ suhu bilik (Bazarnik et al. 2018).

^g $N = 5$, $P = 6$ GPa, $\omega = 1.0$ rpm, $T =$ suhu bilik (Cepeda-Jiménez et al. 2017).

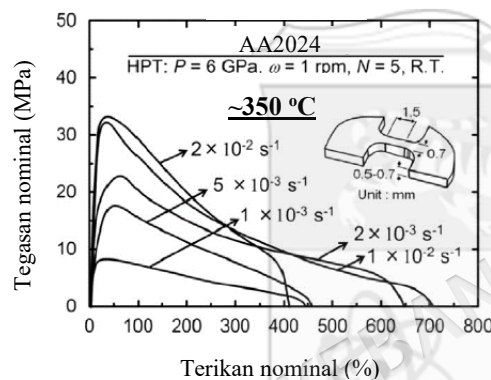
^h $N = 5$, $P = 4$ GPa, $T =$ suhu bilik (Ghosh et al. 2012).

Seperti bahan HPT yang lain, pengurangan kemuluran diatasi dengan pemprosesan pada suhu tinggi. Rajah 2.7 menunjukkan penyelakuan superplastik AA2024 yang diproses HPT pada $N = 5$. Secara umumnya, sifat superplastik bahan HPT adalah bergantung kepada suhu T dan kadar terikan $\dot{\epsilon}$ (Kawasaki & Langdon 2012; Lee et al. 2016; Sabbaghianrad & Langdon 2016). Bagi AA2024, sifat superplastik dicapai melalui $\dot{\epsilon}$ antara $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ dan $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ pada $T \sim 300^\circ\text{C}$ dan 350°C (Alhamidi & Horita 2015). Rajah 2.7(c) membuktikan sifat kebolehbentukannya yang tinggi dengan pemanjangan maksimum (740%). Kadar gelinciran sempadan ira melalui penyerapan sempadan ira bertanggungjawab dalam ubah bentuk superplastik AA2024. Namun begitu, sifat superplastik AA2024 menurun apabila suhu terus ditingkatkan melampaui 350°C . Keadaan ini terjadi disebabkan berlakunya pertumbuhan ira yang mana menyebabkan sumbangan gelangsaran

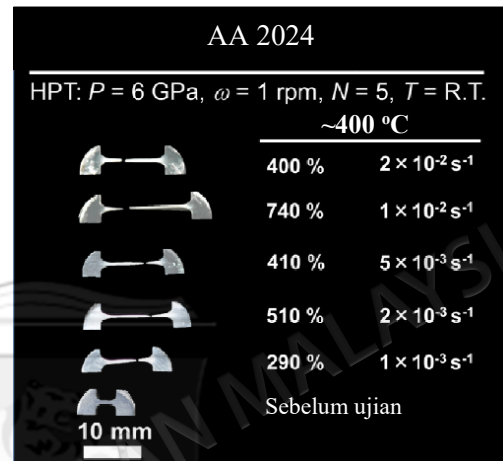
sempadan ira terhadap jumlah terikan berkurang kerana pecahan sempadan ira berkurang.



(a)



(b)

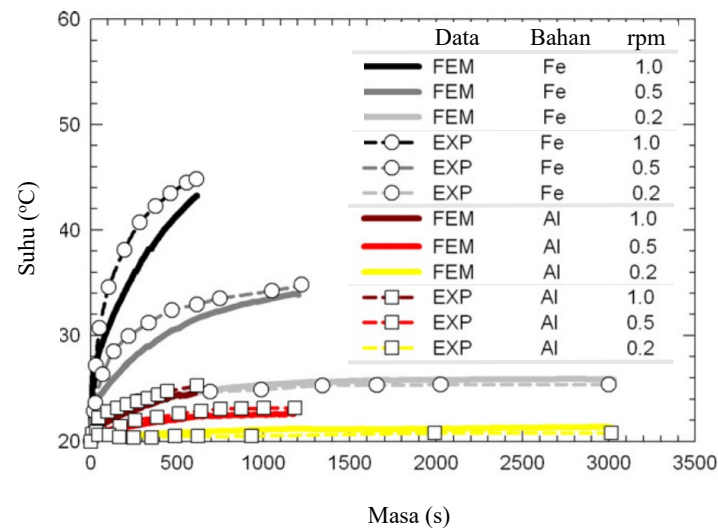


(c)

Rajah 2.7

Lengkung tegasan-terikan bagi AA2024 yang diproses HPT dengan $N = 5$, hasil ujian tegasan pada $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ hingga $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ dan T : (a) $\sim 300^\circ\text{C}$, (b) $\sim 350^\circ\text{C}$ serta (c) pemanjangan superplastik maksimum pada $\sim 400^\circ\text{C}$ (Alhamidi & Horita 2015).

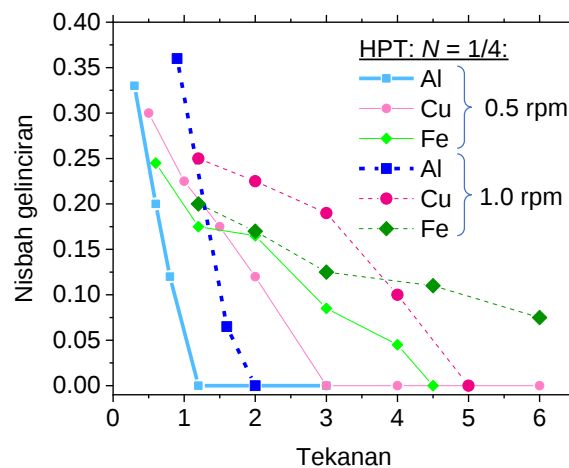
Di samping penambahbaikan sifat mikrostruktur dan mekanikal, suhu sampel juga meningkat kesan HPT. Rajah 2.8 menunjukkan kesan pembebanan HPT terhadap peningkatan suhu aluminium dan ferum (Figueiredo et al. 2012b). Ferum, logam yang secara relatifnya lebih kuat berbanding aluminium menunjukkan peningkatan suhu yang lebih ketara berbanding aluminium. Pada kadar putaran serendah 0.2 rpm, peningkatan suhu aluminium adalah mendatar (Edalati et al. 2011). Selain jenis bahan yang mempengaruhi kekuatan, kajian yang sama turut melaporkan bahawa fluks haba juga meningkat dengan peningkatan kadar putaran dan tekanan kesan geseran gerigis.



Rajah 2.8 Kesan pembebanan HPT terhadap suhu aluminium dan ferum (Figueiredo et al. 2012b).

Semasa HPT, gelinciran antara permukaan sampel dan andas yang bersentuhan menentukan kecekapan pembebanan HPT. Secara ideal, keadaan tanpa gelinciran diharapkan dalam proses HPT. Nisbah gelinciran sf dikira berdasarkan peratus perbezaan antara darjah putaran sebenar θ_a dan tetapan θ_s ($sf = |\theta_a - \theta_s| / \theta_s \times 100\%$). Berdasarkan Rajah 2.9, jenis bahan, kadar putaran dan tekanan menentukan nisbah gelinciran (Edalati, Horita & Langdon 2009). Pada tekanan > 1 GPa, bahan yang lebih lembut merekodkan nisbah gelinciran yang lebih rendah ($sf_{Al} < sf_{Cu} < sf_{Fe}$). Gelinciran juga meningkat pada kadar putaran yang lebih tinggi dan tekanan yang lebih rendah. Bagi aluminium, minimum 1.2 GPa tekanan diperlukan untuk 0.5 rpm kadar putaran dan minimum 2 GPa diperlukan pada kadar putaran yang lebih tinggi (1.0 rpm).

Dalam bahagian ini, HPT telah dijelaskan mampu meningkatkan kekuatan bahan dengan ketara. Di samping itu, parameter pemprosesan yang mempengaruhi penguatan aloi aluminium khususnya turut dibincangkan. Bagi mewakili kelakuan penguatan bahan HPT ini, beberapa model telah diperkenalkan. Permodelan kelakuan penguatan bahan HPT sehingga kini dibincangkan dalam bahagian seterusnya.



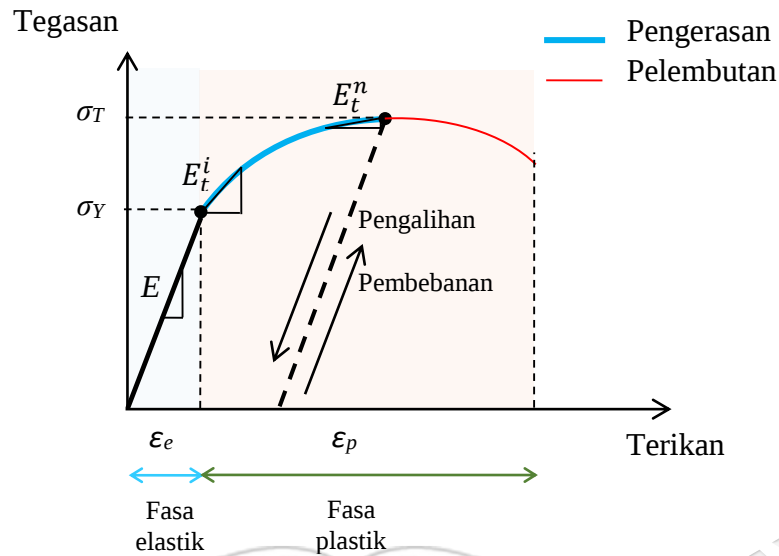
Rajah 2.9 Kesan peningkatan tekanan terhadap nisbah gelinciran antara aluminium, kuprum dan ferum pada kadar putaran 0.5 rpm dan 1.0 rpm (Edalati, Horita & Langdon 2009).

2.3 PERMODELAN KELAKUAN PENGUATAN BAHAN HPT

Proses pembentukan bahan logam merangkumi fasa elastik dan plastik. Bagi membolehkan reka bentuk dan pengoptimuman sesebuah proses pembentukan, permodelan kelakuan bahan yang tepat dan efektif diperlukan. Perbincangan asas berkenaan ubah bentuk bahan logam dan kaedah permodelan makro-mekanikal dalam penyelakuan ubah bentuk bahan diberikan dalam seksyen di bawah.

2.3.1 Ubah Bentuk Bahan Logam

Rajah 2.10 menunjukkan hubungan tegasan-terikan yang lazim bagi bahan mulur. Secara umumnya, bahan mulur mengalami dua fasa sifat bahan yang nyata iaitu bermula dengan fasa elastik dan diikuti dengan fasa plastik. Ubah bentuk elastik adalah bersifat sementara iaitu bahan akan kembali kepada bentuk asalnya setelah pembebanan dialihkan. Dalam fasa elastik, perubahan tegasan terhadap terikan adalah linear. Kecerunan graf atau kadar perubahan tegasan terhadap terikan dipanggil modulus Young E . Nilai E adalah berkadar songsang dengan kemuluran. Semakin tinggi E , semakin rendah kemuluran bahan.



Rajah 2.10 Hubungan tegasan-terikan yang lazim bagi bahan mulur.

Apabila tegasan melampaui titik alah σ_y , bahan melalui fasa plastik. Fasa plastik menghasilkan ubah bentuk kekal pada bahan setelah pembebanan dialihkan. Dalam fasa plastik, hubungan tegasan-terikan adalah tidak linear dan bahan mengalami terikan elastik ϵ_e dan plastik ϵ_p . Apabila pembebanan dialihkan, terikan elastik dikembalikan mengikut laluan kelakuan elastik linear, meninggalkan hanya terikan plastik sebagai terikan kekal. Memasuki fasa plastik, lazimnya bahan logam mengalami pengerasan kerja sehingga mencapai tegasan maksimum iaitu nilai kekuatan tegangan σ_T . Evolusi tegasan σ sehingga fasa pengerasan ini boleh dinyatakan dalam Persamaan 2.3.

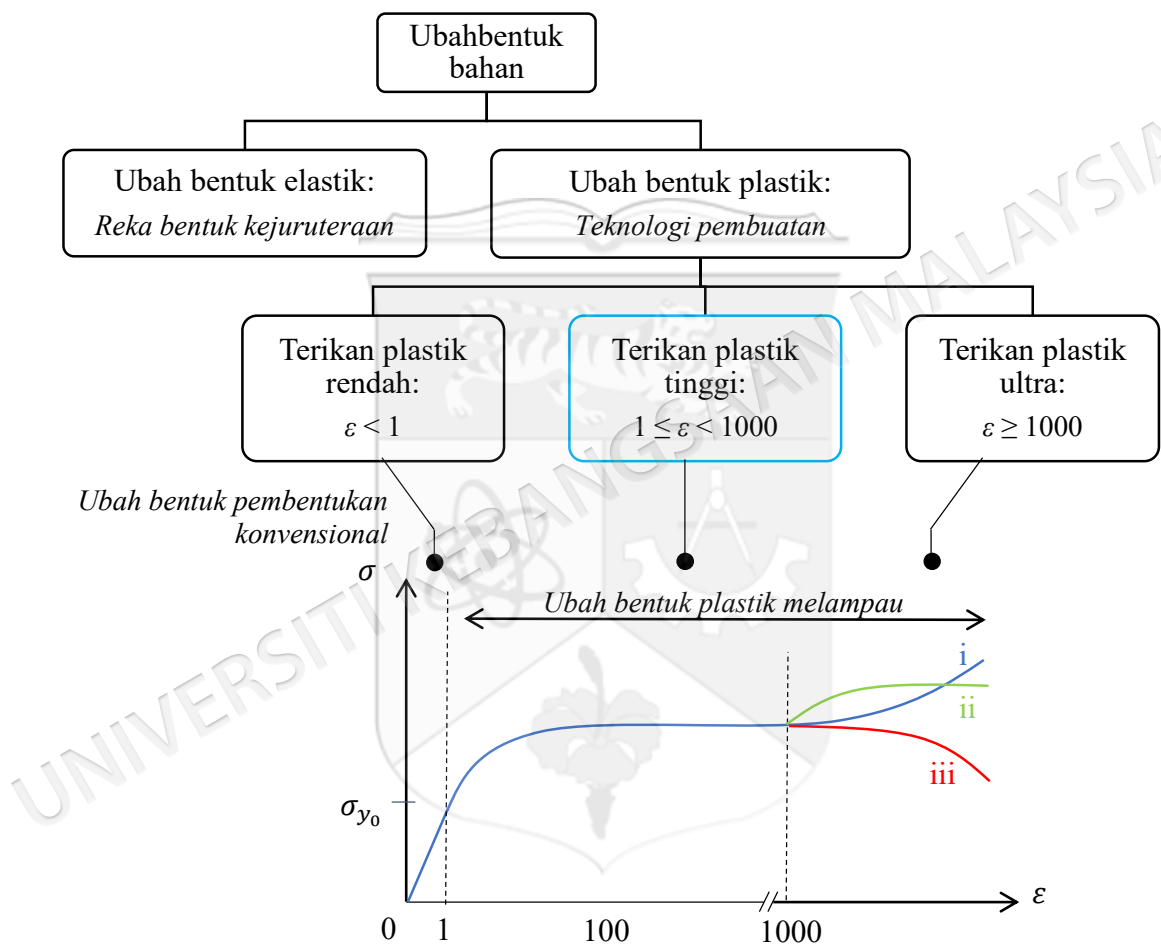
$$\sigma = E\epsilon_e + \sigma_h(\epsilon_p) \quad (2.3)$$

yang mana $\sigma_h(\epsilon_p)$ adalah fungsi pengerasan kerja yang bergantung kepada ϵ_p . Dengan andaian kadar tegasan terhadap terikan adalah linear pada sela terikan tertentu, fungsi pengerasan terikan pelbagai ini diringkaskan dan σ boleh ditakrifkan seperti Persamaan 2.4.

$$\sigma = E\epsilon_e + \sum_{i=1}^n E_t^i \epsilon_p^i \quad (2.4)$$

yang mana E_t^i adalah modulus tangen iaitu kecerunan graf tegasan-terikan dalam fasa plastik pada terikan plastik ϵ_p^i tertentu. Rajah 2.11 menunjukkan ringkasan

pengklasifikasian ubah bentuk plastik bahan mengikut julat terikan. Teknik pembentukan bahan logam secara konvensional melibatkan terikan yang rendah ($\varepsilon < 1$). Sebagai contoh proses pengelekan melibatkan terikan $\varepsilon < 0.13$ untuk keluli berkekuatan tinggi (Çavuşoğlu et al. 2018) dan $\varepsilon < 0.8$ untuk aluminium tulen (Rekov 2018). Proses pembentukan ini menghasilkan bahan dengan bentuk bersih atau hampir bersih mengikut spesifikasi reka bentuk pembuatan.



Rajah 2.11 Pengklasifikasian julat terikan plastik mengikut lengkung lazim kelakuan evolusi kekuatan aloi aluminium terproses HPT.

Proses pembentukan logam yang melibatkan peningkatan ciri bahan menggunakan teknologi SPD, lazimnya diklasifikasikan dalam julat terikan plastik tinggi ($1 \leq \varepsilon < 1000$). Oleh yang demikian, tumpuan kajian HPT berada dalam julat terikan ini. Melalui SPD, kebanyakan bahan mengalami pengerasan kerja sehingga mencapai fasa tepu disebabkan oleh ketepuan penghalusan mikrostruktur pada

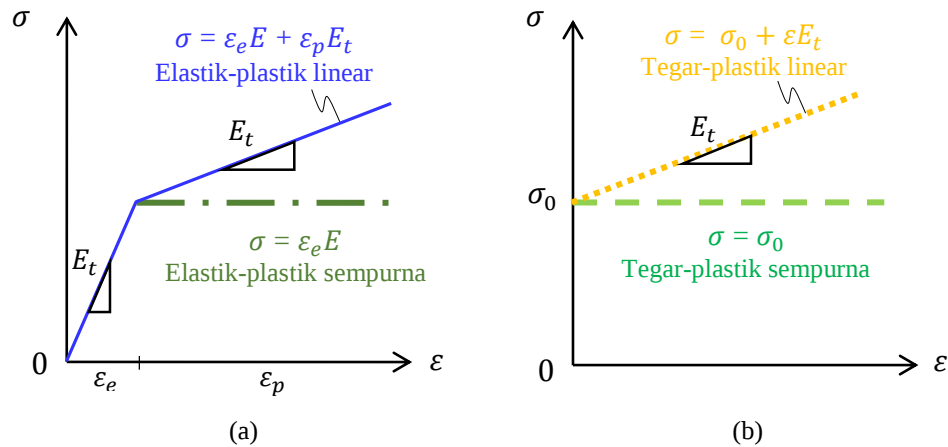
keseluruhan sampel (Almazrouee et al. 2015), atau timbal balik antara mekanisma pengerasan oleh pengecilan ira dan pelembutan oleh pemusnahan kehelan (Ito et al. 2017; Naghdy et al. 2016).

Terkini, terdapat juga teknologi SPD yang melibatkan terikan ricih melebihi 1000, dikenali sebagai ultra SPD (Edalati 2019; Edalati et al. 2017). Dalam julat terikan ultra SPD, bahan HPT mempamerkan kelakuan yang berbeza (Edalati et al. 2017). Seperti dilabelkan dalam Rajah 2.11, bahan mungkin mengalami (i) pengerasan berterusan disebabkan pelarutan elemen sesama sendiri dan pembentukan fasa metastabil nanoira, (ii) pengerasan dan tepu disebabkan pembentukan fasa amorfus atau (iii) pelembutan disebabkan gelinciran sempadan ira, yang menunjukkan sifat superplastik pada suhu bilik atau pembentukan fasa peralihan.

2.3.2 Permodelan Kelakuan Ubah Bentuk Bahan HPT

Rajah 2.12 menunjukkan kelakuan ubah bentuk elastoplastik sesebuah bahan. Ia boleh dimodelkan kepada empat jenis kelakuan ringkas iaitu elastik-plastik linear, elastik-plastik sempurna, tegar-plastik linear dan tegar-plastik sempurna. Dalam model tegar, fasa elastik diabaikan. Model ini diambil kira sekiranya terikan plastik terlalu besar jika dibandingkan dengan terikan elastik. Dalam model plastik sempurna pula, pengerasan kerja dianggap tidak signifikan. Model ringkas ini memudahkan pengiraan berangka, namun kebolegunaannya dalam julat terikan tertentu untuk simulasi aliran bahan HPT perlu dikenalpasti dengan teliti bagi memastikan ketepatan ramalan aliran tegasan. Ini kerana kelakuan bahan mempengaruhi aliran tegasan merentasi jejari dan ketebalan sampel semasa pembebanan, seperti yang dibandingkan oleh Figueiredo et al. (2012) melalui kelakuan pengerasan terikan, tegar-plastik sempurna dan pelembutan.

Jadual 2.4 menunjukkan permodelan kelakuan penguatan bahan HPT untuk beberapa jenis bahan berbeza. Seperti model ringkas, model terikan pelbagai juga hanya sesuai untuk julat terikan tertentu. Sebagai contoh dalam pemprosesan HPT bahan serbuk termampat, model fungsi kuasa hanya dibuktikan konsisten dengan uji kaji antara julat terikan antara 0.5 hingga 5 (Beygelzimer et al. 2016).



Rajah 2.12 Model ringkas kelakuan elastoplastik bahan logam.

Pada terikan tinggi pula, ketepuan pengerasan terikan sebenar untuk sesebuah bahan perlu dipastikan kerana kajian ultra-SPD menunjukkan kebarangkalian kelakuan pengerasan atau pelembutan pada $\varepsilon \geq 1000$ (Edalati et al. 2017). Walau bagaimanapun, model plastik sempurna adalah sesuai untuk penilaian parameter selain tegasan seperti kenaikan suhu kerana tidak menghasilkan perbezaan pengiraan berbanding simulasi

Jadual 2.4 Model kelakuan keplastikan ringkas dan pengerasan terikan pelbagai bagi beberapa jenis bahan dalam kajian simulasi HPT.

Pengkelasan	Model	Bahan	Rujukan
Model ringkas	Elastik-plastik sempurna $\sigma = E\varepsilon_e$	Titanium gred 2	Pereira et al. (2014)
	Elastik-plastik sempurna $\sigma = E\varepsilon_e$	Ferum	Khoddam et al. (2016)
	Tegar-plastik sempurna $\sigma = \sigma_0$	—	Kulagin et al. (2019)
Model pengerasan terikan pelbagai (fungsi kuasa)	Hollomon: $\sigma = 670\varepsilon^{0.2}$ Hollomon: $\sigma = 740\varepsilon^{0.18}$ Hollomon: $\sigma = 340\varepsilon^{0.25}$	Titanium berketulenan 99.2% Serbuk besi (Ferum) mampat Kuprum	Shahmir & Langdon (2016) Beygelzimer et al. (2016) Figueiredo, Cetlin & Langdon (2011)

menggunakan model pengerasan terikan pelbagai (Pereira et al. 2014).

Selain model kelakuan elastoplastik ringkas, model pengerasan terikan pelbagai dengan fungsi kuasa juga digunakan. Ia berdasarkan hubungan fenomenologi daripada lengkung uji kaji tegasan-terikan sebelum fasa peleheran. Persamaan empirik yang paling banyak digunakan dalam mewakili lengkung tegasan-terikan logam adalah persamaan Hollomon ($\sigma = A\varepsilon^n$), Ludwik ($\sigma = \sigma_{y0} + A\varepsilon^n$), Swift ($\sigma = A(\varepsilon + \varepsilon_0)^n$) dan Voce ($B - (B - A)\exp(-n\varepsilon)$) (Kleemola & Nieminen 1974). Persamaan Hollomon dan Ludwik adalah merupakan bentuk ringkas kepada persamaan menjuzuk Johnson-Cook (Johnson & Cook 1983), yang turut mempertimbangkan kesan kadar terikan dan suhu ubah bentuk selain terikan.

Dalam HPT, penggunaan persamaan Hollomon dan Ludwik digunakan apabila kadar terikan dan suhu diabaikan. Pengabaikan kadar terikan dibuat sejajar dengan laporan Serre et al. (2011) bahawa peningkatan kadar terikan tidak mempengaruhi peningkatan kekerasan dengan ketara. Walaupun begitu, penentuan pemalar bahan memerlukan data uji kaji yang komprehensif bagi memastikan ketepatan ramalan. Seperti model ringkas, pendekatan empirik yang menggunakan padanan lengkung ini juga tidak menggambarkan kelakuan pengerasan pada julat tertentu, seperti yang dibuktikan oleh Beygelzimer et al. (2016). Sebagai contoh, apabila ubah bentuk HPT mencapai tahap tepu, fungsi kuasa tidak lagi disahkan.

Selain model makro mekanik, penyelakuan bahan menggunakan pendekatan mikro mekanik juga ada diperkenalkan. Jadual 2.5 meringkaskan antara model analitikal berasaskan mikro mekanik yang digunakan dalam permasalahan HPT. Teknik permodelan berasaskan mikrostruktur dalam proses pembentukan logam dibincangkan dengan mendalam oleh Chastel, Logé & Bernacki (2012). Bagi bahan HPT, antara model yang popular adalah berdasarkan ketumpatan kehelan (Estrin et al. 2008, Lee et al. 2014). Um et al. (2014) dan Lee et al. (2012) menggunakan model menjuzuk evolusi sel kehelan. Naghdy et al. (2016) pula menggunakan model Taylor kekangan penuh dan keplastikan hablur konsisten sendiri viscoplastik (VPSC) untuk penjanaan tekstur bahan semasa HPT. Walau bagaimanapun model-model tersebut memfokuskan kepada evolusi mikrostruktur tanpa hubungan terus dengan sifat mekanikal.

Jadual 2.5 Model analitikal berasaskan mikro mekanik yang digunakan dalam permasalahan HPT.

Model analitikal	Formulasi
Ketumpatan kehelen	$\dot{\rho}_w = \frac{6\beta^* \gamma_c (1-f)^{2/3}}{bdf} + \frac{\sqrt{3}\beta^* \dot{\gamma}_c (1-f) \sqrt{\rho_w}}{fb}$ $-k_0 \left(\frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n} \dot{\gamma}_w \rho_w$ $\dot{\rho}$ = kadar ketumpatan kehelan, ρ = ketumpatan kehelan, w = dinding sel, c = dalaman sel, γ = terikan, $\dot{\gamma}$ = kadar terikan, f = pecahan isipadu dinding sel, b = magnitud vektor Burger, d = saiz sel purata, n = kepekaan kadar terikan, β^* = pemalar berangka, k_0 = pemalar.
Hall-Petch	$\Delta\sigma_{GB} = \sigma_y - \sigma_0 = \frac{k_y}{\sqrt{d}}$ $\Delta\sigma_{GB}$ = kenaikan tegasan normal disebabkan pengerasan sempadan ira, σ_y = kekuatan Hall-Petch, σ_0 = tegasan geseran (170 MPa untuk Al-Cu), $\bar{D}$ = saiz ira purata, k_y = kecerunan Hall-Petch (0.13 MNm^{-3/2} untuk Al-Cu).
Bailey-Hirsch	$\sigma_D = \dot{\alpha} G b \sqrt{\rho_d}$ σ_D = kenaikan tegasan ricih disebabkan pengerasan kehelan, $\dot{\alpha} = 0.2$ untuk bahan kubik berpusat muka, G = modulus ricih, b = vektor Burger.
Orowan	$\sigma_P = \frac{Gb}{\bar{\lambda}}$ σ_P = kenaikan tegasan kilas disebabkan pengerasan mendakan, $\bar{\lambda} = L - d_P$ ialah ruang antara zarah dengan L = jarak antara zarah dan d_P = saiz zarah.

Berbeza dengan model mikro mekanik yang telah disebutkan, hubungan Hall-Petch dalam fungsi saiz ira seperti yang dibuktikan oleh Tejedor et al. (2019) dapat menganggarkan kekuatan tegangan dengan baik. Akan tetapi, sisihan data eksperimen berbanding model ini adalah tinggi pada terikan rendah ($N \leq 1$) kerana hubungan ini mengambil kira purata saiz ira, sedangkan terdapat variasi yang besar pada saiz ira di awal pembebanan (Pereira et al. 2015). Model berasaskan mikrostruktur (MBWG) yang mengikut hubungan Bailey-Hirsch dan Orowan seperti

yang digunakan oleh Borodachenkova et al. (2015) pula boleh meramal pengerasan dalam fungsi parameter ketumpatan kehelan, saiz, penjarakan dan kepekatan mendakan mengikut jenis mekanisma pengerasan. Walaupun begitu, penilaian parameter mikrostruktur dalam model-model ini melibatkan prosedur metalografi yang kompleks dan penelitian yang teliti dalam menilai saiz ira dan mendakan.

Selain itu, terdapat juga pendekatan model berasaskan termodinamik (Parvin & Kazeminezhad 2020) dan kelakuan kakisan (Lage et al. 2019) yang diperkenalkan untuk mewakili kelakuan bahan HPT. Walau bagaimanapun, model sebegini tidak sesuai untuk bahan yang mempunyai tahap kepekaan yang rendah terhadap perubahan parameter termal mahupun kakisan. Seperti yang telah dibincangkan dalam seksyen 2.2.3, kepekaan perubahan suhu aluminium terhadap ubah bentuk HPT adalah rendah. Selain itu, sifat rintangan kakisan aluminium juga adalah tinggi.

Kajian di atas menerangkan tentang dapatan uji kaji makmal dan permodelan berdasarkan uji kaji. Selain pendekatan yang dibentangkan, pendekatan simulasi semakin menjadi tumpuan pada masa kini. Berikut dibincangkan kajian simulasi unsur terhingga untuk ubah bentuk HPT.

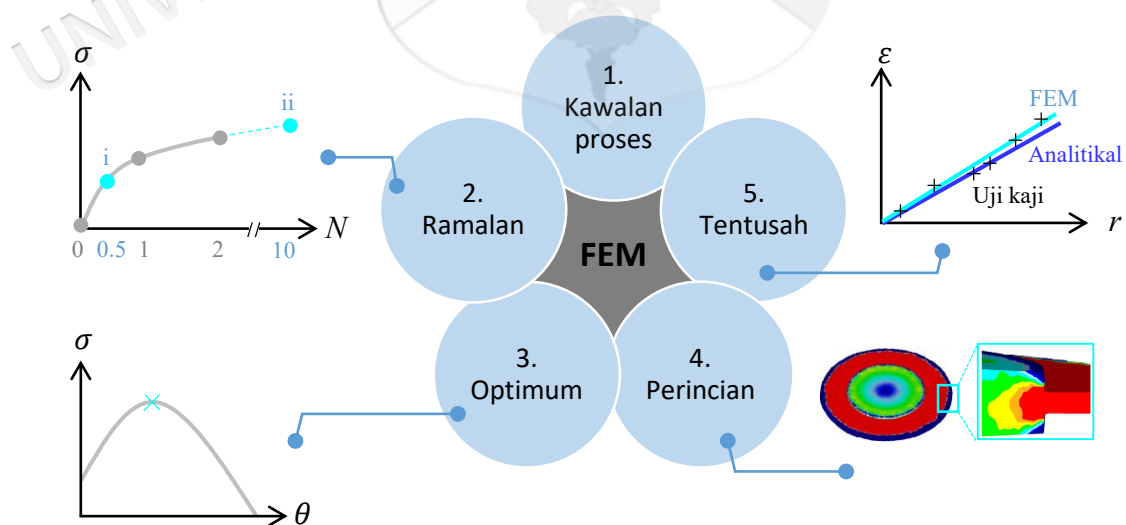
2.4 SIMULASI UNSUR TERHINGGA UBAH BENTUK HPT

Pengiraan berangka menggunakan kaedah unsur terhingga (FEM) untuk HPT adalah rumit kerana melibatkan ketidaklinearan bahan dan geometri hasil ubah bentuk plastik melampau. Kepentingan FEM yang mengatasi cabaran ini ditunjukkan melalui perkembangan simulasi FEM dalam kajian HPT yang kian meningkat. Penghasilan model HPT yang ringkas bagi memastikan penyelesaian lelaran pengiraan yang menumpu tanpa menjejaskan permodelan pemprosesan sebenar menjadi keutamaan. Kepentingannya FEM dalam kajian HPT dan formulasi keplastikan untuk permodelan simulasi FEM HPT dibincangkan dalam seksyen seterusnya.

2.4.1 Kepentingan Kaedah Unsur Terhingga dalam Permasalahan HPT

Rajah 2.13 menunjukkan kepentingan analisis FEM, khususnya dalam permasalahan HPT. Pertama, kawalan sesebuah proses pembuatan diperlukan bagi memenuhi keperluan spesifikasi dan analisis kegagalan sesebuah reka bentuk kejuruteraan. Bagi tujuan tersebut, FEM merupakan sebuah kaedah yang universal dalam mengawal kelakuan bahan. Sebagai contoh, FEM digunakan untuk kawalan terhadap kualiti pengerasan selepas proses gelekkan permukaan untuk memperbaiki had terima kerosakan dan lesu pada kawasan penumpuan tegasan (Zaharevskis, Kurushin & Kovzels 2018). Dalam HPT pula, FEM telah merungkai pengaruh sifat bahan (Figueiredo, Aguilar et al. 2012), pekali geseran (Figueiredo et al. 2011), pembolehubah pemprosesan seperti tekanan (Khoddam et al. 2016) serta mikrostruktur seperti tekstur (Naghdy et al. 2016) dan ketumpatan kehelan (Lee et al. 2014) terhadap taburan terikan dan suhu. Parameter ubah bentuk dapat dipelbagaikan dengan mudah dan dikawal dengan baik, membolehkan kajian terperinci terhadap aliran tegasan dilakukan. Rangkuman kebarangkalian integrasi pembolehubah sebegini merupakan analisis berparameter yang penting dalam mengawal hasil pemprosesan HPT.

Kedua, model unsur terhingga (FE) amat berguna untuk ramalan sifat bahan



Rajah 2.13 Kepentingan FEM dalam permasalahan HPT.

dan beban yang diperlukan untuk suatu proses pembentukan. Contohnya, ketumpatan kehelan dan saiz sel kehelan yang diproses HPT dan ECAP berjaya diramal menggunakan simulasi FEM melalui model menjuzuk berasaskan ketumpatan kehelan (Baik et al. 2003; Lee et al. 2014). FEA juga telah menunjukkan sambutan kilasan-sudut putaran sampel HPT tidak dipengaruhi oleh parameter pengerasan terikan tetapi bergantung kepada pekali geseran antara andas dan gerigis sampel (Kamrani et al. 2017). Selain itu, simulasi FEM juga membantu mengurangkan bilangan uji kaji dengan menyediakan ramalan aliran bagi parameter di luar julat uji kaji. Ini kerana seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.13, penilaian aliran tegasan mungkin diperlukan (i) antara julat parameter kajian, atau (ii) melampaui julat parameter kajian.

Ketiga, pengoptimuman pembolehubah pemprosesan juga boleh dilaksanakan melalui simulasi FEM. Contohnya, dalam mengoptimumkan proses penghalusan ira, sumber ketidakhomogenan aliran semasa HPT iaitu sifat bahan dan geseran telah berjaya dirungkai melalui simulasi FEM (Figueiredo et al. 2012a). Kepentingan ini juga didemonstrasikan dalam pemprosesan logam kepingan, yang mana reka bentuk acuan yang optimum dianalisis menggunakan simulasi FEM berdasarkan algoritma unjuran sempadan (Vafaeesefat 2011). Penyelesaian analitikal melalui simulasi berangka menterjemahkan penjimatan kos pelaksanaan ulangan uji kaji yang besar berbanding kos pengiraan yang kecil.

Selain itu, pengiraan FEM diperlukan untuk analisis aliran bahan yang lebih terperinci bagi menyediakan penerangan teori bagi sesebuah fenomena semasa pembebanan. Penelitian kehomogenan merentasi dimensi sampel melalui simulasi FEM menunjukkan bahawa terikan efektif adalah lebih tidak sekata pada arah paksian berbanding jejarian (Yoon, Horita & Kim 2008). Keheterogenan terikan efektif yang bergantung kepada ketebalan sampel dan tekanan nominal ini berjaya dibuktikan melalui FEM walaupun tidak dapat diramal melalui teori (Figueiredo et al. 2013). Simulasi FEM dilihat amat penting dalam meningkatkan pemahaman dan mendorong penjanaaan idea dan inovasi HPT.

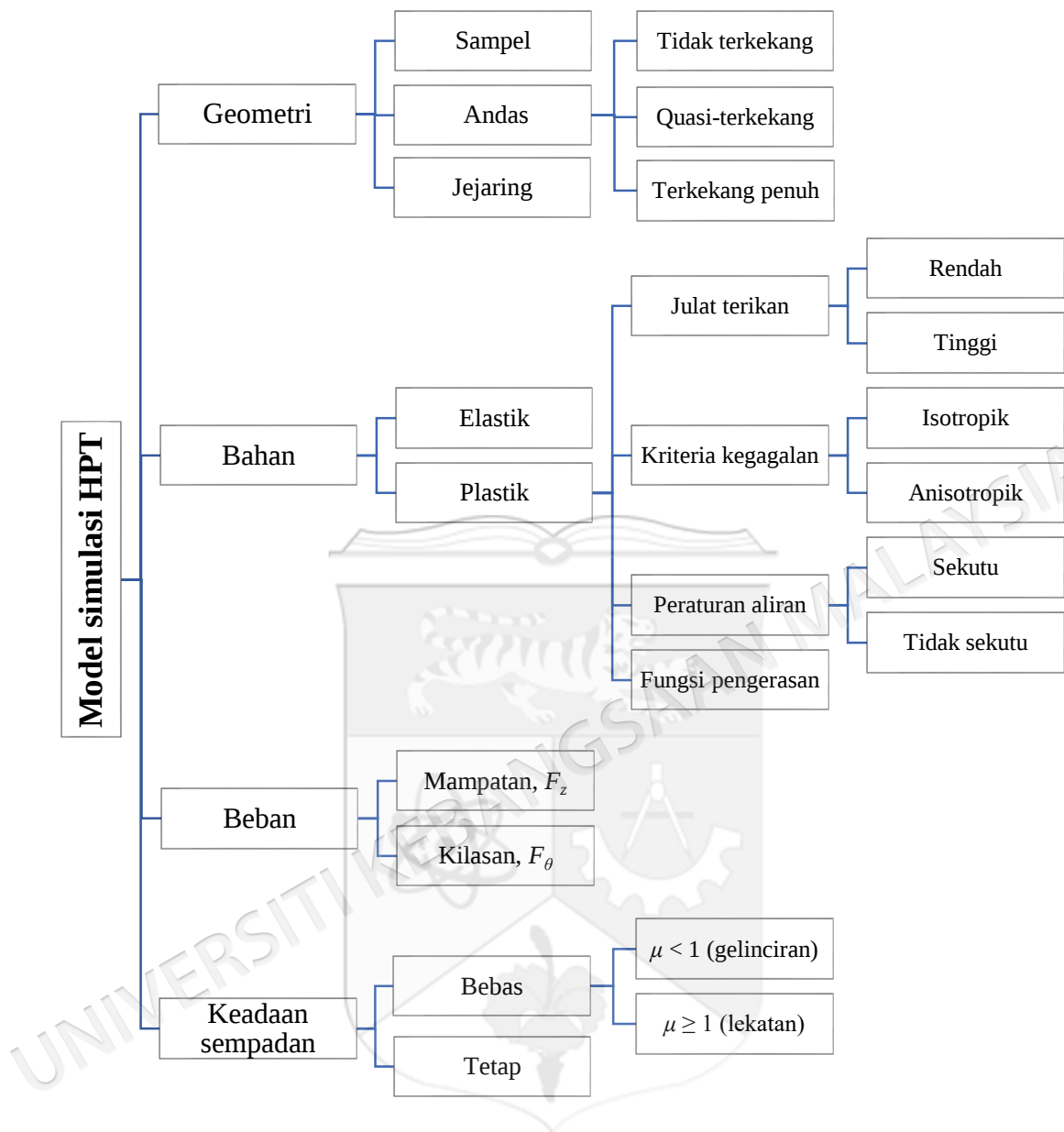
Seterusnya, FEM juga berperanan dalam penentusahan data uji kaji mahupun analitikal. Analisis aliran plastik dalam HPT kuasi-terkekang menunjukkan taburan

terikan efektif sepanjang diameter sampel menepati ramalan teori (Figueiredo et al. 2012a). Sebaliknya, kehomogenan merentasi ketebalan sampel adalah tidak konsisten dengan ramalan teori terikan plastik (Figueiredo et al. 2013). Walau bagaimanapun, taburan ini adalah konsisten dengan ramalan model analitikal keplastikan kecerunan terikan (Estrin et al. 2008). Justeru FEM dilihat sebagai pelengkap dalam menentusahkan dapatan kajian. Secara keseluruhannya, faedah daripada simulasi FEM ini akan dapat membantu meningkatkan kualiti dan kecekapan, sekaligus mengurangkan kos pembangunan HPT.

2.4.2 Formulasi Keplastikan Bahan HPT

Pengiraan berangka yang tepat melalui simulasi unsur terhingga sememangnya mampu meningkatkan kecekapan sesebuah proses pembuatan yang konvensional. Ketepatan sesebuah simulasi pula amat bergantung kepada parameter masukan. Rajah 2.14 menunjukkan empat elemen utama bagi parameter masukan yang membentuk sesebuah model simulasi. Ia terdiri daripada geometri, bahan, beban dan keadaan sempadan. Ketepatan takrifan elemen-elemen ini adalah penting bagi mensimulasikan uji kaji HPT sebenar. Model yang lebih kompleks mampu menjangka aliran bahan dengan lebih tepat. Namun, ia melibatkan kos komputeran yang tinggi, termasuk peningkatan langkah pengiraan, lelaran dan masa penyelesaian. Oleh itu, suatu keseimbangan dalam menentukan model yang lebih ringkas tanpa menjejaskan output simulasi menjadi keutamaan.

Bagi meringkaskan pengiraan, HPT telah dimodelkan dengan hanya mengambil kira komponen yang berkait langsung dengan ubah bentuk iaitu sampel dan andas (Edalati et al. 2016; Kamrani et al. 2017). Permodelan menggunakan konfigurasi andas tidak terkekang (Kim et al. 2003; Larijani, Kammerhofer & Ekh 2015a; Yoon et al. 2008) adalah lebih ringkas berbanding kuasi-terkekang (Pereira et al. 2015) dan terkekang penuh (Khoddam et al. 2016). Walaupun tidak menggambarkan konfigurasi sebenar, ia mampu menganalisa kelakuan ubah bentuk bagi sesebuah bahan merentasi dimensi sampel pada pelbagai parameter pemrosesan.



Rajah 2.14 Elemen yang ditakrifkan dalam model simulasi HPT beserta perincian parameter masukan.

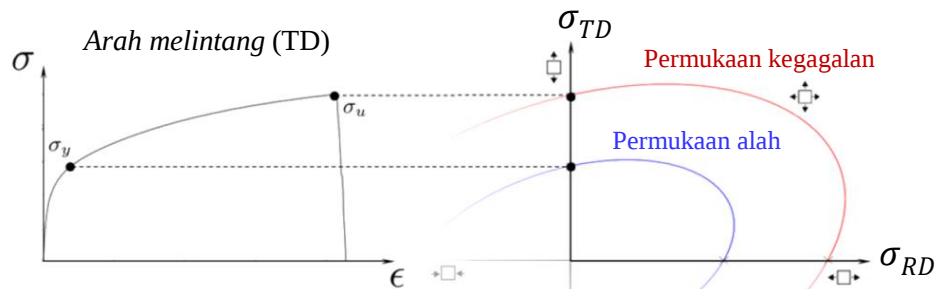
Untuk konfigurasi tidak terkekang, terdapat juga kajian yang meringkaskan permasalahan HPT dengan hanya memodelkan komponen sampel (Lee et al. 2014; Wei et al. 2017). Jejaring seterusnya dijana untuk analisis menggunakan pendekatan unsur terhingga. Untuk sampel, minimum jejaring sebanyak 1000 dilaporkan memadai untuk pengiraan ubah bentuk setempat sampel berdiameter 10 mm dan berketebalan 0.7 mm (Kim 2001). Bagi menyediakan analisis aliran plastik setempat yang lebih terperinci, saiz elemen yang lebih halus dijana pada kawasan tumpuan kajian.

Daripada aspek pembebanan, tekanan dimodelkan sebagai beban seragam dalam arah paksi z (F_z). Daya F_z per unit luas permukaan A membentuk tekanan P ($P = F_z/A$). Daya kilas pula dimodelkan melalui pembebanan kawalan anjakan θ terhadap paksi putaran z . Kedudukan kedua-dua pembebanan ini dikenakan pada sebuah permukaan rata silinder sampel dengan sebuah permukaan rata lagi ditetapkan. Bagi meringkaskan pengiraan, terdapat juga kajian yang mengabaikan beban mampatan dan menganggap HPT sebagai masalah ricih ringkas dengan hanya mengambil kira beban kilas (Khoddam et al. 2016; Naghdy et al. 2016). Andaian ini disahkan oleh Song et al. (2014), berdasarkan amaun terikan yang jauh lebih tinggi disumbangkan oleh beban kilas berbanding mampatan.

Pemilihan geometri dan pembebanan ini disesuaikan dengan penetapan keadaan sempadan. Bagi mewakili uji kaji HPT sebenar, sebuah permukaan rata silinder sampel ditetapkan bagi mengurangkan darjah kebebasan model. Selain itu, kajian terdahulu menunjukkan suatu julat pekali geseran μ diaplikasikan terhadap permukaan atau sempadan komponen yang bersentuhan. Permukaan rata sampel yang bersentuh dengan andas mengambil kira keadaan lekatan, bermakna tiada gelinciran dibenarkan pada permukaan tersebut. Manakala pekali geseran μ antara 0.3 (Figueiredo et al. 2013), 0.6 (Pereira et al. 2014) dan 0.7 (Figueiredo, Pereira et al. 2012b) dikenakan pada permukaan sampel dan andas yang lainnya bagi mensimulasikan aliran keluar bahan pada permukaan andas yang digilap.

Bagi kelakuan keplastikan bahan pula, parameter masukan adalah termasuk julat terikan, kriteria kegagalan, peraturan aliran dan fungsi pengerasan. Namun, kajian yang melaporkan tentang ciri keplastikan bahan HPT ini dengan terperinci amat terhad. Antara parameter masukan yang dilaporkan oleh penyelidik terdahulu termasuk:

1. Model HPT diformulasikan untuk terikan tinggi, menggunakan penguraian pendaraban kecerunan ubah bentuk (Larijani, Kammerhofer & Ekh 2015).
2. Hukum aliran sekutu yang menerangkan evolusi permukaan alah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.15 digunakan untuk mewakili aliran plastik bahan yang dikenakan beban mampatan dan kilasan semasa HPT (Kulagin et al. 2017; Levitas & Zarechnyy 2010).

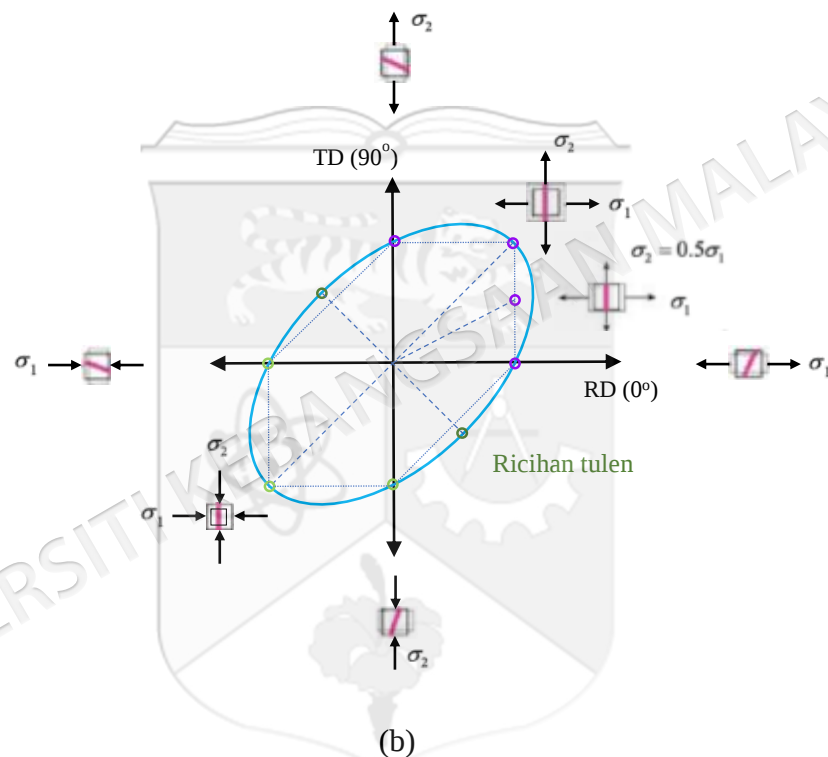
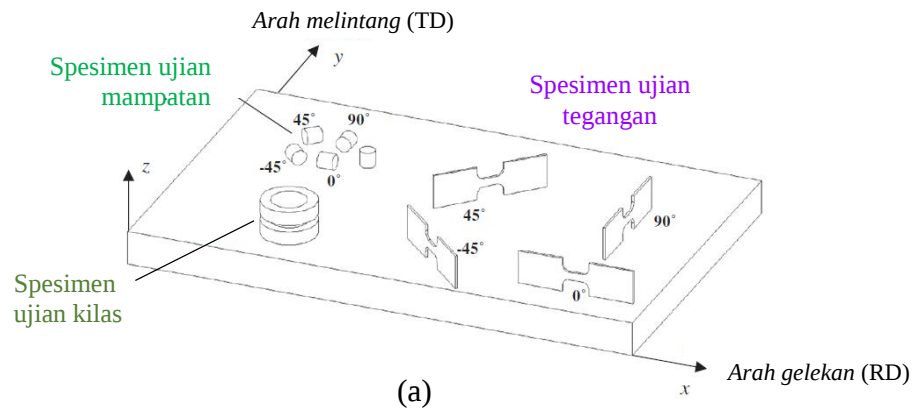


Rajah 2.15 Evolusi permukaan alah bagi hukum aliran sekutu.

3. Penentuan kriteria kegagalan adalah berdasarkan sifat isotropik bahan. Rajah 2.16 menunjukkan penentuan permukaan alah bagi sesebuah bahan. Analogi bahan gelean digunakan untuk menentukan kedudukan sampel berbanding arah pembebanan. Seperti yang ditunjukkan, ujian tegangan pada satu arah pembebanan menghasilkan titik alah manakala gabungan beberapa ujian tegangan pada beberapa arah pembebanan menghasilkan permukaan alah. Berdasarkan asas penentuan permukaan alah ini, Rajah 2.17 menunjukkan perbandingan permukaan alah bagi aloi titanium Ti-6Al-4V dan aloi aluminium AA2024-T3 menggunakan fungsi alah isotropik von Mises dan anisotropik, Hill-48 dan Hill-93 (Janbakhsh, Loghmanian & Djavanroodi 2014). Tidak seperti Ti-6Al-4V, permukaan alah AA2024-T3 menggunakan fungsi isotropik dan anisotropik adalah hampir sama. Dapatan sebegini adalah lazim untuk bahan seperti AA2024-T3, yang mempunyai sifat rintangan penipisan yang rendah (Janbakhsh et al. 2014).

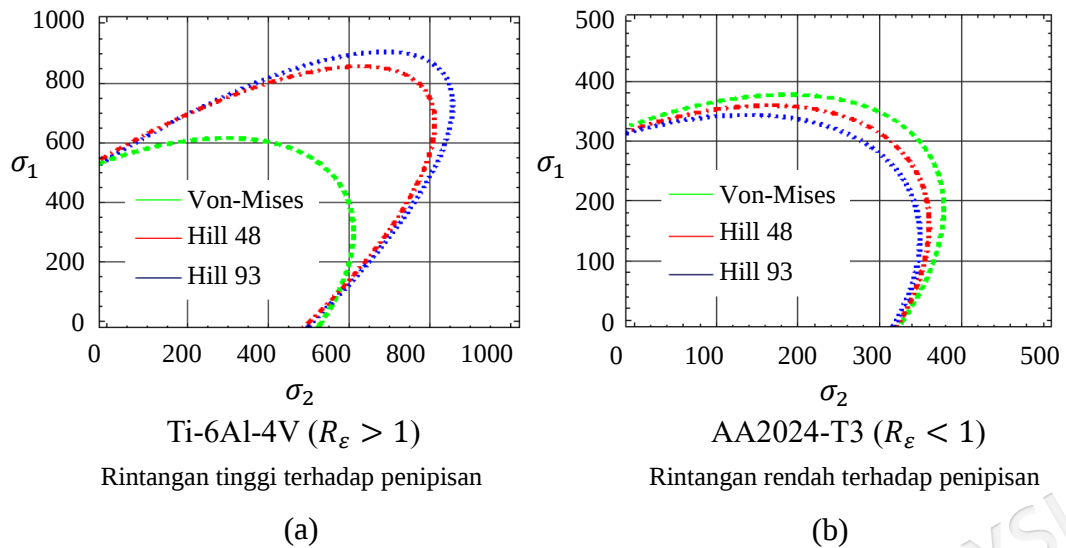
Sifat rintangan penipisan ini diukur melalui nisbah terikan $R_\epsilon = \epsilon_w / \epsilon_h$, yang mana ϵ_w adalah terikan arah lebar dan ϵ_h adalah terikan arah ketebalan. Sifat semula jadi AA2024-T3 ini adalah konsisten dengan penggunaan kriteria alah Von-Mises (Estrin et al. 2008; Kim 2001; Levitas & Zarechnyy 2010) dalam penelitian beberapa aspek kelakuan bahan HPT menggunakan kaedah berangka. Di samping itu, penghasilan struktur ira sama dimensi (Li et al. 2020; Markushev et al. 2018; Sun et al. 2018) juga menunjukkan sifat isotropik bahan HPT.

4. Fungsi pengerasan ditentukan berdasarkan hubungan analitikal persamaan



Rajah 2.16 Penentuan permukaan alah berdasarkan analogi bahan kepingan gelekan: (a) konfigurasi sampel uji kaji dan (b) kedudukan titik alah bagi konfigurasi dan jenis pembebanan.

menjuzuk bahan. Persamaan menjuzuk merupakan parameter masukan kritikal bagi sesebuah simulasi FE. Ia boleh ditakrifkan berdasarkan pendekatan makro mekanik (Descartes, Desrayaud & Rauch 2011; Feng & Levitas 2017), mikro mekanik (Yoon et al. 2008), termodinamik (Parvin & Kazeminezhad 2016) mahupun lengkung tegasan-terikan bahan sebenar (Edalati et al. 2016; Pereira et al. 2015). Oleh kerana HPT mengaplikasikan terikan tinggi hasil



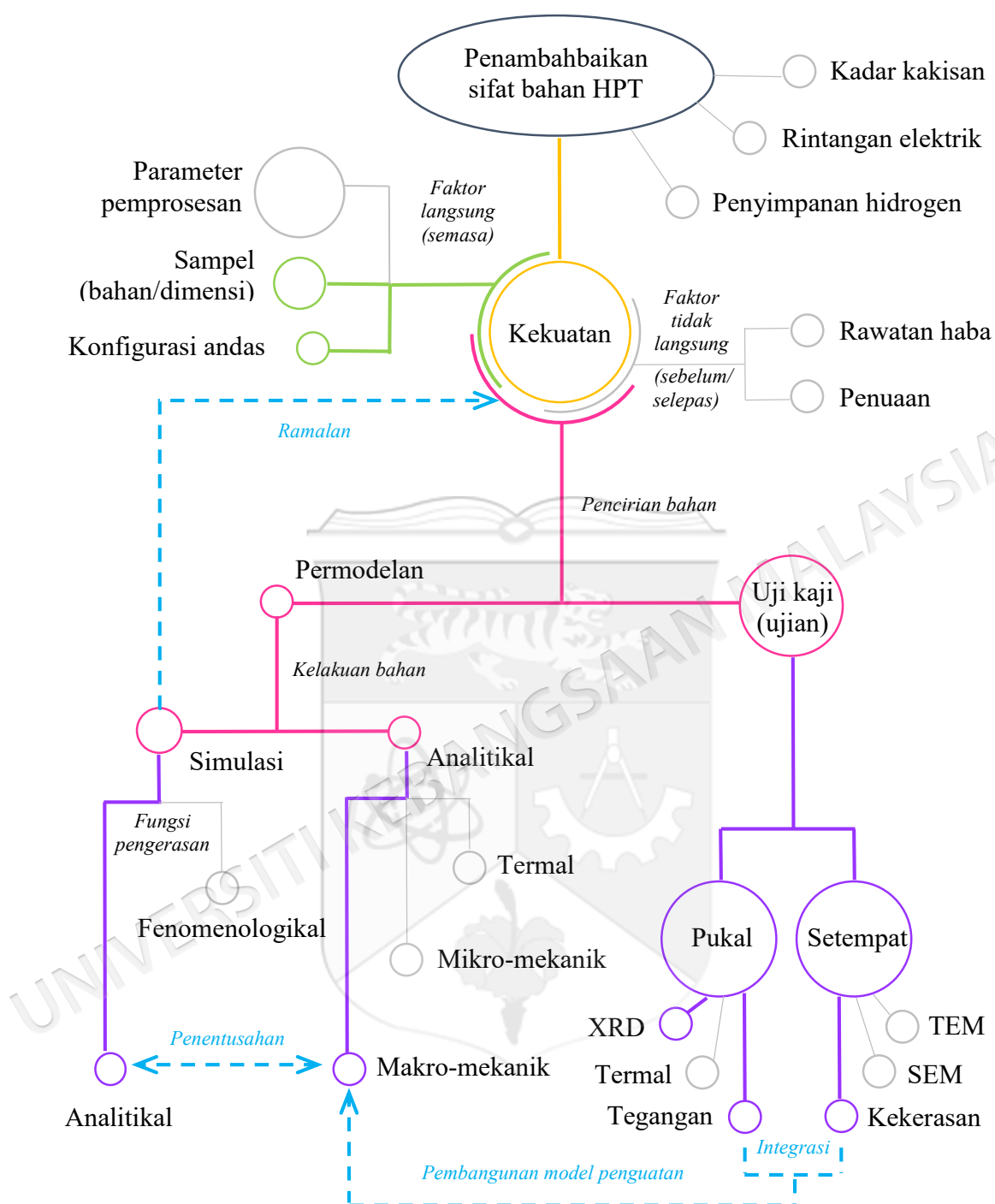
Rajah 2.17 Perbandingan bentuk permukaan alah antara (a) aloi titanium Ti-6Al-4V dan (b) aloi aluminium AA2024-T3 (Janbakhsh, Loghmanian & Djavanroodi 2014).

pembebanan kilas yang berterusan, fasa ubah bentuk elastik boleh diabaikan, menjadikan model HPT sebagai tegar-plastik (Estrin et al. 2008; Song et al. 2014).

2.5 RUMUSAN KAJIAN KEPUSTAKAAN

Bab ini membincangkan dapatan kajian terdahulu merangkumi tiga bidang penyelidikan iaitu HPT, permodelan kelakuan penguatan dan simulasi berangka. Rajah 2.18 meringkaskan elemen utama yang dilaporkan berdasarkan kajian-kajian HPT yang telah dibincangkan. Elemen yang berwarna adalah terangkum dalam skop kajian ini manakala elemen yang tidak diwarnakan adalah sebaliknya. Peratusan kajian yang lebih tinggi dalam peringkat yang sama diwakili oleh saiz bulatan yang lebih besar secara relatif, bagi tujuan perbandingan.

Dalam seksyen 2.2, HPT dilaporkan berupaya menambah baik sifat bahan seperti kadar kakisan, rintangan elektrik, keupayaan penyimpanan hidrogen dan yang paling utama kekuatan. Peningkatan kekuatan dipengaruhi oleh faktor langsung atau tidak



Rajah 2.18 Elemen utama yang dikenalpasti dalam kajian HPT. Kerangka kajian ini diwarnakan dan garisan putus-putus menunjukkan penghubung antara jurang kajian yang dikenalpasti.

langsung. Faktor langsung merangkumi pembolehubah yang boleh diubah suai semasa HPT seperti jenis bahan, parameter pemprosesan dan konfigurasi andas. Faktor tidak langsung pula merangkumi pembolehubah yang dikawal sebelum/selepas HPT seperti

kesan rawatan haba dan penuaan yang juga dikenali sebagai TMCP. Pencirian bahan HPT terhadap pembolehubah yang dikaji seterusnya dinilai menggunakan pendekatan uji kaji fizikal atau model analitikal mahupun simulasi. Ujian pencirian bahan secara uji kaji fizikal boleh dilakukan secara pukal mahupun bersifat setempat. Ujian pukal menilai sifat bahan secara purata bagi mewakili keseluruhan spesimen uji kaji. Ia termasuk analisis XRD, termal dan ujian tegangan. Manakala ujian setempat pula adalah sebaliknya, yang mana penilaian dilakukan pada titik tertentu pada sampel yang lebih kecil julat pengukurannya berbanding ujian pukal. Ia termasuk TEM, SEM dan ujian kekerasan. Kedua-dua jenis penilaian ini adalah penting dalam penilaian bahan HPT dan saling melengkapi, mengikut keperluan penilaian.

Kajian kepustakaan dalam seksyen 2.3 pula membincangkan permodelan kelakuan penguatan bahan yang telah dilaporkan sehingga kini. Hubungan tegasan dan terikan diwakilkan oleh sesebuah model matematik menerusi suatu pendekatan analitikal. Kelakuan penguatan ini boleh diwakili oleh model makro mekanik, mikro mekanik dan termal. Integrasi antara penilaian pukal dan setempat dalam memodelkan kelakuan penguatan secara makro mekanik dilihat mempunyai potensi berdasarkan prosedur ujian yang lebih ringkas berbanding mikro mekanik dan termal. Tambahan lagi, model simulasi HPT diulas dalam seksyen 2.4. Ketepatan ramalan penyelakuan bahan melalui sesebuah model simulasi adalah bergantung kepada penentuan persamaan menjuzuk. Antara parameter kelakuan plastik yang perlu ditakrifkan termasuk fungsi pengerasan. Untuk itu, pendekatan fenomenologi mahupun analitikal boleh digunakan. Secara keseuruhannya, uji kaji HPT lebih banyak menumpukan kepada pembolehubah parameter pemprosesan. Kurang tumpuan diberikan pada pembolehubah konfigurasi andas yang mungkin disebabkan oleh faktor kebolehlaksanaan dan kos uji kaji. Sebaliknya, pembolehubah konfigurasi andas lebih banyak dilaporkan dalam kajian simulasi HPT, menjelaskan kebolehlaksanaannya melalui pendekatan ini. Walaupun begitu, bilangan kajian simulasi HPT secara keseluruhannya adalah masih terhad sehingga kini.

Jurang kajian yang digariskan menjelaskan keperluan terhadap kajian lanjut untuk formulasi kelakuan penguatan. Garisan putus-putus berwarna biru dalam Rajah 2.18 menunjukkan penghubung yang dicadangkan antara jurang dan peluang kajian yang

dikenalpasti. Seterusnya, kajian ini dirancang bagi memenuhi kekurangan yang telah dibincangkan. Metodologi kajian ini yang merangkumi uji kaji HPT, permodelan dan simulasi berangka HPT diperincikan dalam bab seterusnya.



BAB III

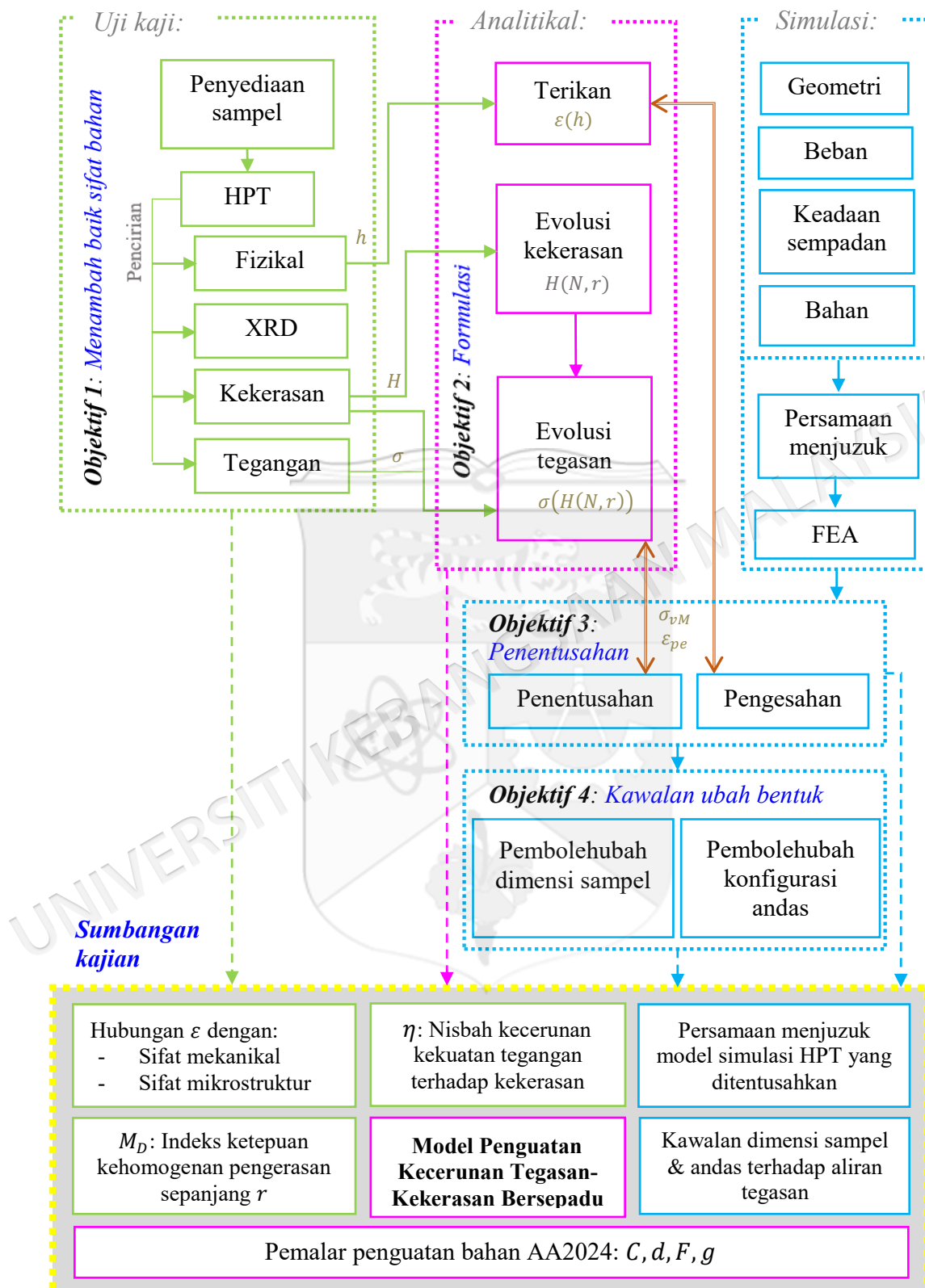
METODOLOGI

3.1 PENGENALAN METODOLOGI KAJIAN

Dalam bab ini, metodologi kajian dibentangkan. Rajah 3.1 menjelaskan metodologi kajian mengikut empat fasa utama kajian iaitu uji kaji, permodelan analitikal, penentusahan dan ramalan aliran bahan melalui analisis simulasi berangka. Kajian ini dimulai dengan uji kaji penguatan bahan dengan pengaplikasian ubah bentuk plastik melampau menggunakan teknik HPT. Peningkatan sifat bahan kemudiannya dihuraikan melalui pencirian sifat mekanikal dan mikrostruktur. Ia disusuli dengan pembangunan model analitikal berdasarkan evolusi sifat bahan sepanjang proses HPT. Kemudiannya, model simulasi HPT dirangka dan ditentusahkan menggunakan model analitikal yang dibangunkan. Akhir sekali, aliran tegasan merentasi dimensi sampel diramal melalui analisis simulasi berangka menggunakan model simulasi yang telah ditentusahkan. Penerangan lanjut bagi setiap metodologi ini diterangkan dalam bahagian berikut.

3.2 UJI KAJI DAN PENCIRIAN SAMPEL HPT

Proses HPT dilaksanakan terhadap sampel AA2024 dengan objektif utama untuk meningkatkan sifat mekanikal dan mikrostruktur bahan. Bagi memastikan pencapaian objektif tersebut, ia melibatkan empat proses utama iaitu penyediaan sampel uji kaji, uji kaji pemprosesan HPT, penyediaan sampel pasca-HPT dan seterusnya ujian pencirian sampel terproses HPT bagi menentukan tahap kekuatan yang dicapai. Setiap prosedur ini diterangkan seperti berikut.



Rajah 3.1 Metodologi keseluruhan dan sumbangan kajian.

3.2.1 Penyediaan Sampel HPT

Kajian ini menggunakan aloi aluminium AA2024 dengan komposisi kimia seperti Jadual 3.1, merujuk kepada laporan kajian kumpulan penyelidik yang sama (Mohamed, Lee & Horita 2014) kerana sumber bahan ini adalah sama. Sampel uji kaji berbentuk cakera dengan jejari 15 mm dipotong daripada kepingan AA2024 berketebalan ~ 1 mm, yang dihasilkan daripada pembentukan gelean. Pemotongan ini dilakukan menggunakan mesin pemotongan nyahcas elektrik (EDM) dalam persekitaran berair sebagai medium penyejukan bagi mengurangkan kesan haba.

Jadual 3.1 Komposisi kimia sampel AA2024 yang digunakan dalam kajian ini (Mohamed, Lee & Horita 2014).

Bahan	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Tl+Zr	Al
Komposisi (% jisim)	4.6	1.5	0.6	0.24	0.09	0.07	0.03	0.01	0.01	Baki

Kemudian, sampel cakera nipis AA2024 tersebut dirawat pada suhu 520°C selama 12 jam di dalam relau elektrik seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.2. Untuk itu, relau dipanaskan sehingga mencapai suhu tersebut. Suhu yang dipaparkan pada relau ditentu ukur menggunakan pengganding suhu yang mengukur suhu secara terus.



Pengganding
suhu

Relau

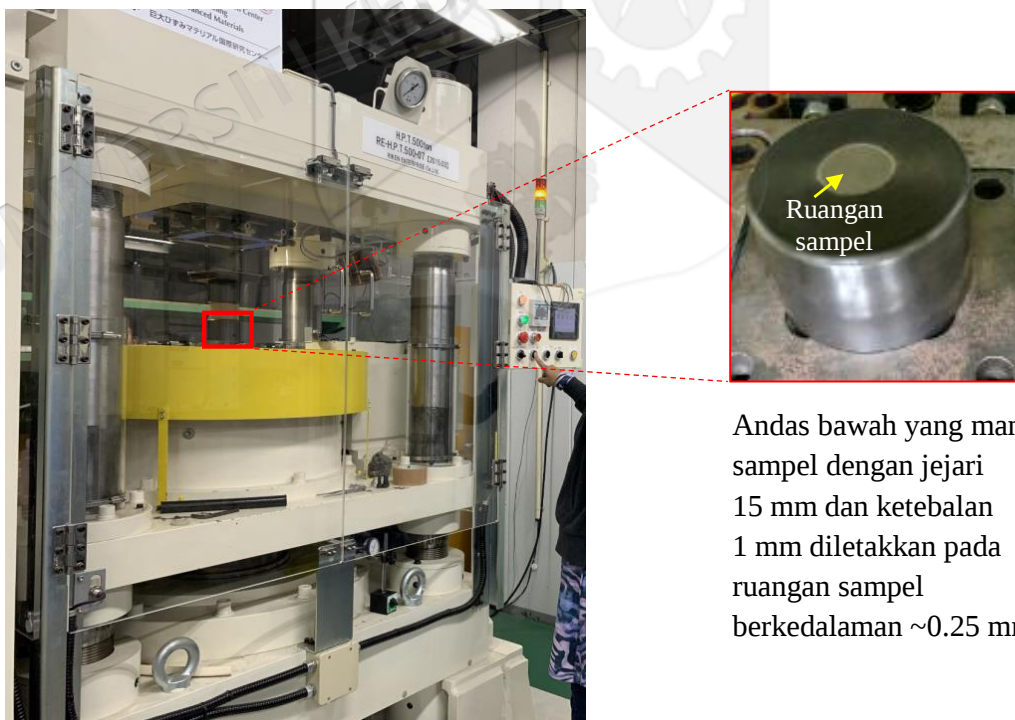
Paparan suhu
relau

Rajah 3.2 Proses rawatan haba pada suhu 520°C selama 12 jam terhadap sampel AA2024 menggunakan relau.

Sejurus proses rawatan haba selesai, sampel yang telah dirawat dilindapkejut dalam air berair. Proses rawatan haba ini bertujuan untuk melarutkan elemen pengalioan dalam larutan pepejal aloi aluminium bagi menghasilkan taburan elemen yang homogen (Lukyanova et al. 2016). Kehomogenan sampel penting untuk mendapatkan kesan penguatan larutan pepejal yang maksimum (Murashkin et al. 2008).

3.2.2 Uji kaji HPT

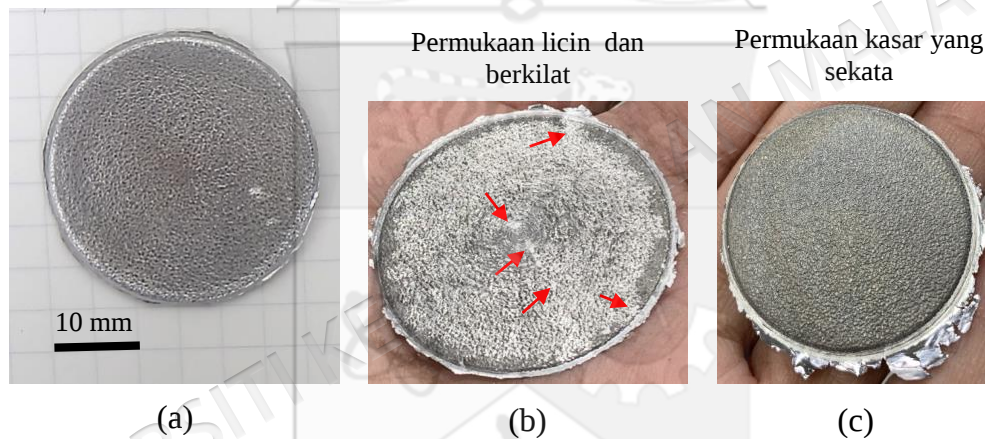
Mesin HPT 500 Mg yang ditunjukkan dalam Rajah 3.3 disediakan sebelum proses HPT. Andas dengan ruangan sampel berkedalaman 0.25 mm dan berjari 15 mm dipasang dengan teliti. Sampel diletakkan pada pada andas bawah dan kemudiannya platform yang memegang andas tersebut dinaikkan ke arah andas atas, meletakkan sampel antara dua andas tersebut. Penjajaran antara andas atas dan bawah dilaraskan dengan baik antara ± 0.01 mm bagi menghasilkan taburan terikan ricih yang sekata terhadap sampel AA2024 berdiameter 30 mm.



Andas bawah yang mana sampel dengan jejari 15 mm dan ketebalan 1 mm diletakkan pada ruangan sampel berkedalaman ~ 0.25 mm.

Rajah 3.3 Kedudukan sampel pada andas semasa uji kaji menggunakan Mesin HPT 500 Mg.

Proses HPT dijalankan pada suhu bilik menggunakan tekanan 4 GPa. Seperti yang dibincangkan dalam seksyen 2.2.3, tekanan tinggi yang dikenakan ini bertujuan untuk menyediakan keadaan permukaan sentuhan tanpa gelinciran terhadap sampel. Tekanan ini dipastikan memadai dalam mengelakkan keadaan gelinciran melalui pemerhatian permukaan sentuhan sampel-andas. Keadaan dengan gelinciran menghasilkan permukaan yang berkilat pada sebahagian permukaan sampel seperti Rajah 3.4(b). Tekanan 2 GPa didapati tidak memadai untuk menghasilkan keadaan tanpa gelinciran bagi sampel berjejari 15 mm tersebut. Sebaliknya keadaan tanpa gelinciran dicapai pada 4 GPa, menghasilkan permukaan yang kasar dengan lebih sekata seperti Rajah 3.4(c).



Rajah 3.4

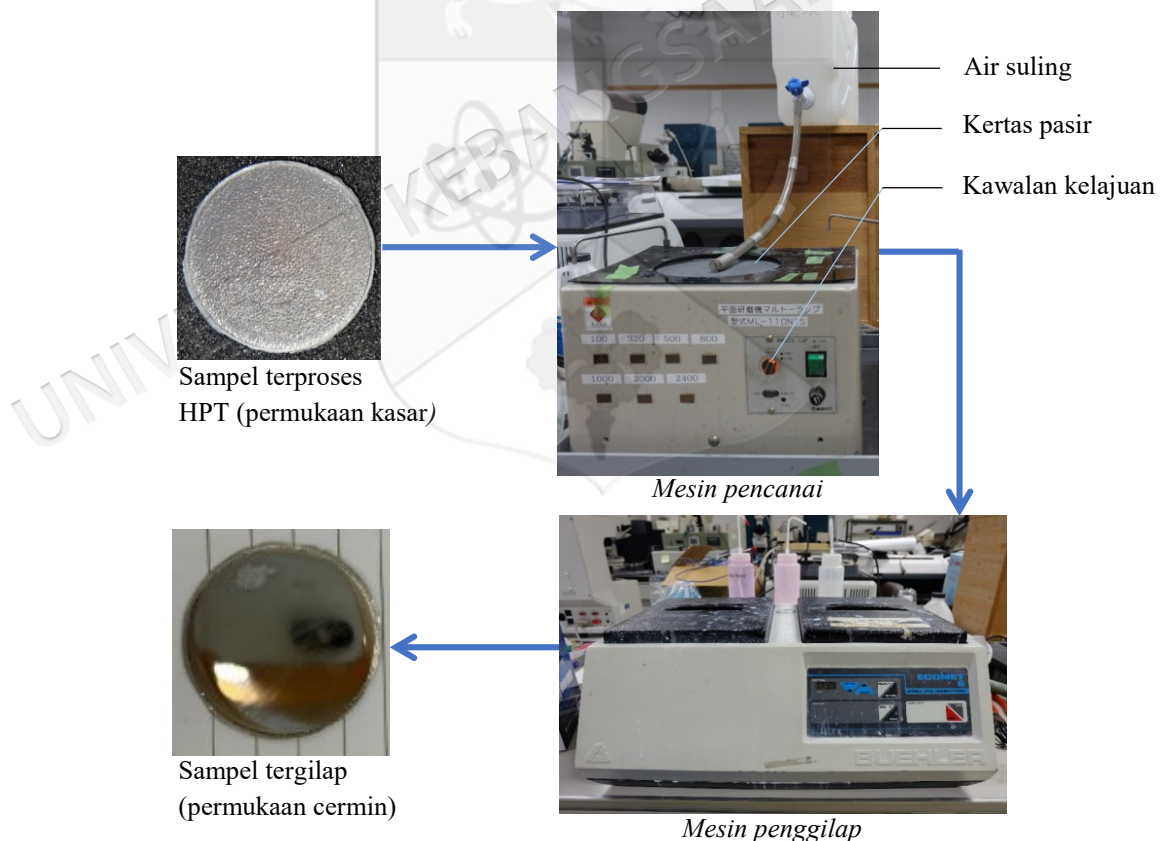
Sampel HPT AA2024: (a) dengan dimensi sebenar atas kertas grid dan perbezaan antara permukaan sentuhan sampel yang terhasil daripada (b) keadaan dengan gelinciran pada tekanan 2 GPa, dan (c) keadaan tanpa gelinciran pada tekanan 4 GPa.

Daya kilas seterusnya dikenakan ke atas sampel melalui pembolehubah bilangan putaran N , bermula daripada $N = 1$ sehingga $N = 6$. Bagi meminimumkan kesan haba semasa ubah bentuk plastik melampau ini, kadar putaran rendah ditetapkan pada 0.2 rpm. Penentuan kadar putaran ini juga adalah berdasarkan kajian literatur yang dibincangkan dalam seksyen 2.2.3. Ketebalan sampel selepas proses HPT direkodkan bagi tujuan pengiraan terikan setara. Pemprosesan HPT terhadap aloi aluminium AA2024 lazimnya menambah baik sifat bahan. Justeru, seksyen seterusnya memperincikan proses penyediaan sampel pasca-HPT untuk ujian makrostruktur dan mikrostruktur.

3.2.3 Penyediaan Sampel Pasca-HPT

Sifat mekanikal dan mikrostruktur sampel yang telah diproses HPT diuji. Ujian kekerasan, tegangan dan XRD dilakukan bagi meneliti evolusi kekerasan, kekuatan, kemuluran, saiz ira dan terikan kekisi bahan. Untuk itu, sampel tergilap disediakan bagi memudahkan proses pencirian sampel, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.5. Sampel HPT yang berpermukaan kasar dicanai menggunakan kertas pasir bergrit 100, 500, 800 dan 1000 dengan bantuan aliran air suling bagi menyingkirkan lapisan permukaan kasar. Sampel kemudiannya digilap menggunakan kain penggilap dengan cecair alumina dan air suling, menghasilkan permukaan tergilap seperti cermin.

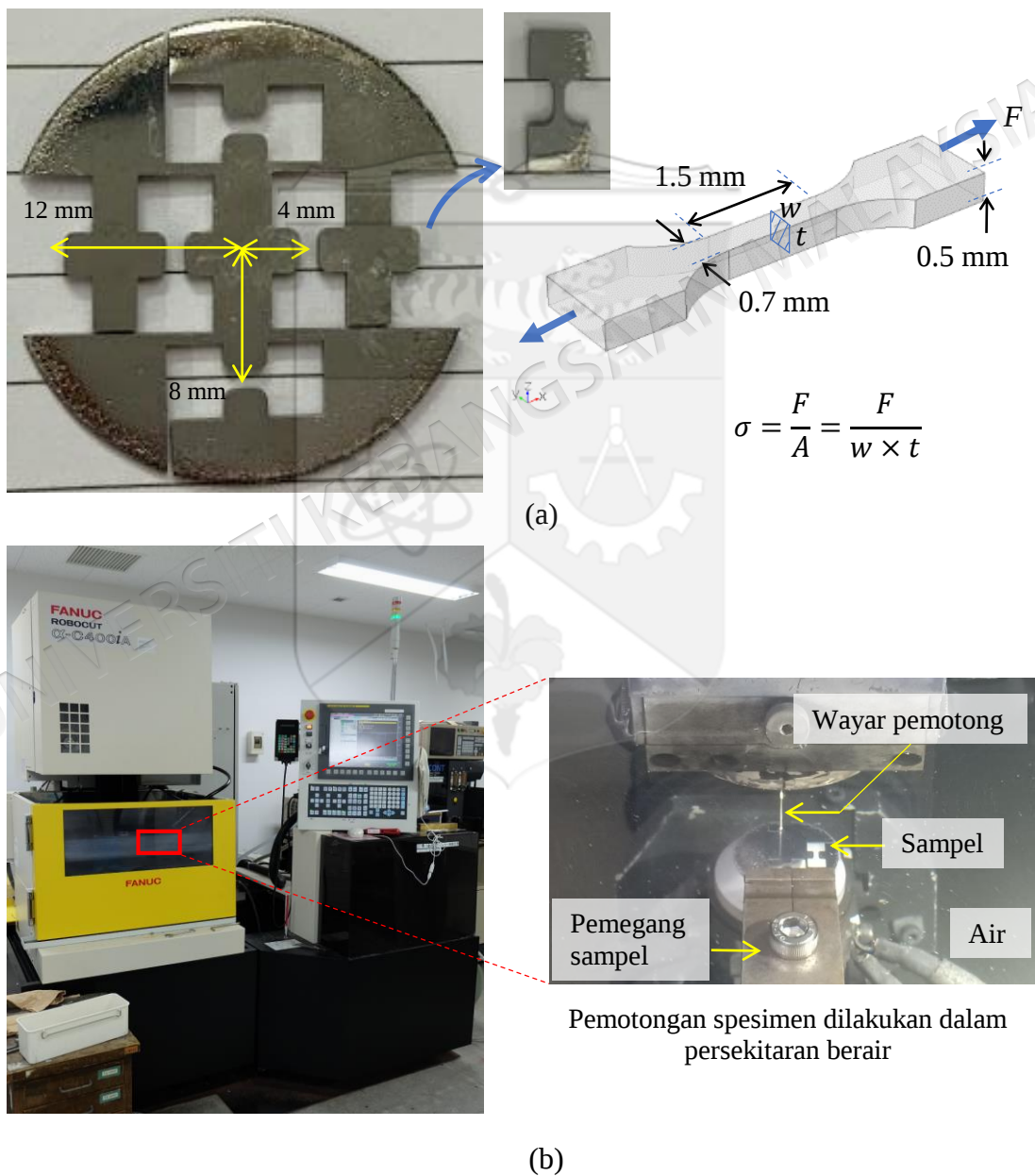
Rajah 3.6 menunjukkan kedudukan dan dimensi spesimen ujian tegangan dengan panjang tolok 1.5 mm, lebar tolok 0.7 mm dan ketebalan 0.5 mm yang dipotong daripada



Rajah 3.5 Proses penyediaan permukaan sampel tergilap menggunakan kaedah pencanaian dan penggilapan.

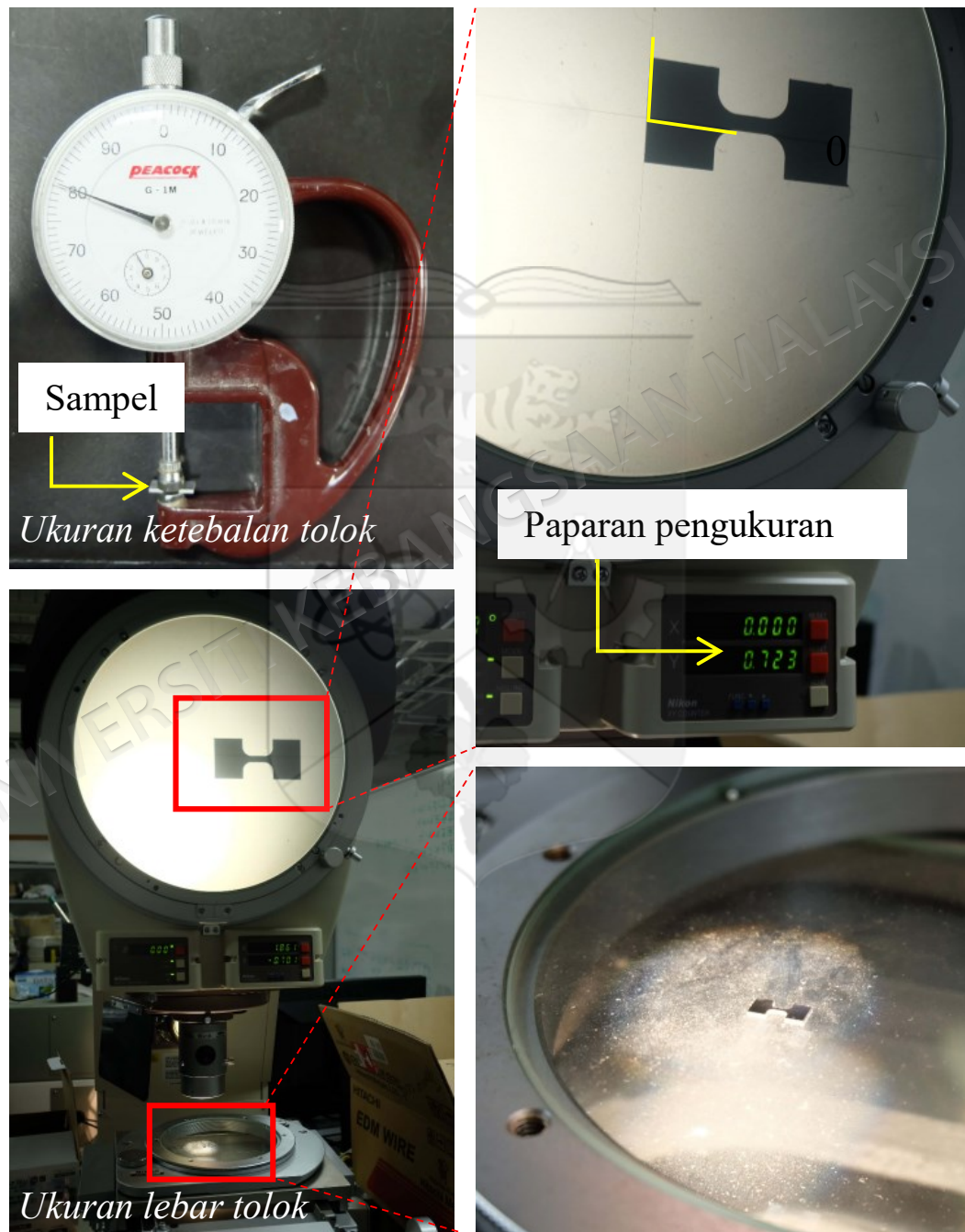
sampel HPT tergilap. Dimensi ini adalah sebanding dengan amalan lazim penyelidik HPT terdahulu (Asghari-Rad et al. 2020; Edalati et al. 2017; Takizawa et al. 2015). Tiga kedudukan diambil kira iaitu 4 mm, 8 mm dan 12 mm daripada pusat cakera bagi menilai kekuatan sepanjang jejarian sampel.

Pemotongan dilakukan menggunakan mesin EDM dalam medium air pada suhu 5 – 10°C. Medium pemotongan dan suhu persekitaran yang rendah ini meminimumkan



Rajah 3.6 Pemotongan spesimen ujian tegangan: (a) kedudukan dan dimensi spesimen, (b) mesin EDM dan komponen pemotongan.

zon kesan haba semasa pemotongan yang boleh mengganggu mikrostruktur bahan khususnya saiz ira. Rajah 3.7 pula menunjukkan pengukuran dimensi sebenar spesimen ujian tegangan iaitu lebar (w) dan tebal tolok (t) menggunakan projektor profil dan tolok ketebalan.

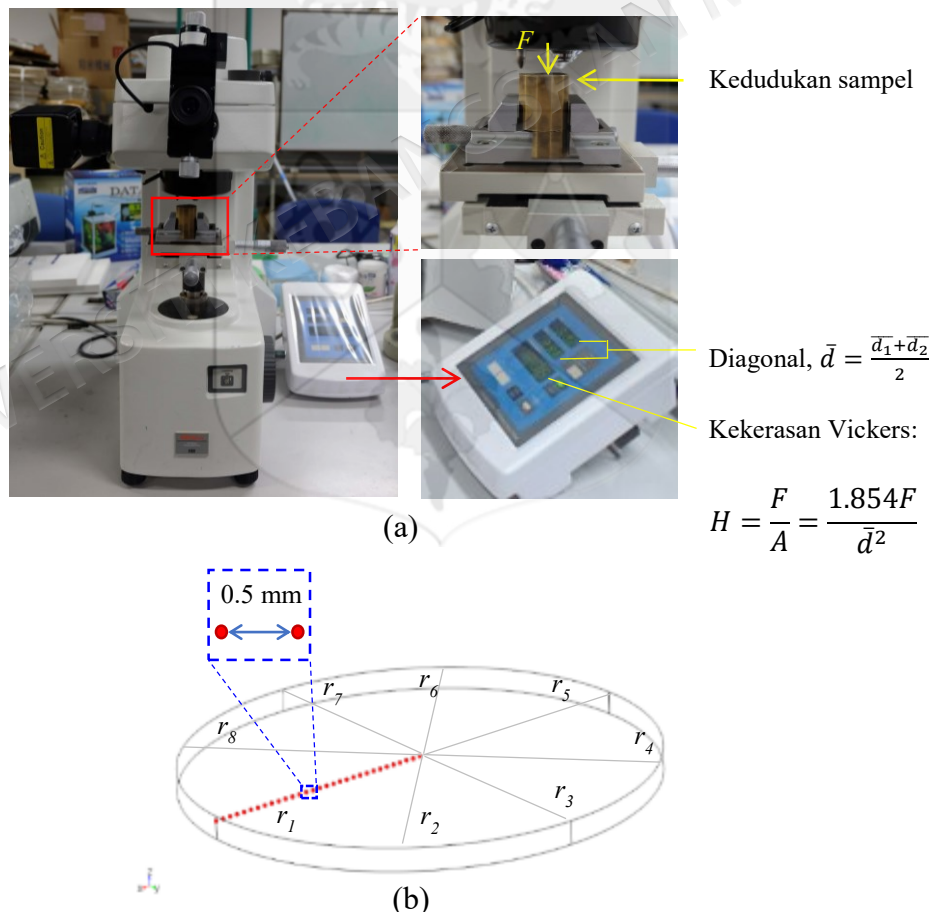


Rajah 3.7 Pengukuran dimensi sebenar tolok spesimen ujian tegangan.

Ketebalan tolok diukur secara terus dengan meletakkan sampel pada apit tolok ketebalan. Dalam pengukuran lebar tolok pula, spesimen diletakkan di atas platform projektor profil yang berlampu dan paksi asalan dilaras kepada sifar. Ukuran yang teliti dipastikan kerana ralat pengukuran memberi implikasi yang besar untuk spesimen yang bersaiz kecil. Parameter ini digunakan untuk pengiraan luas keratan rentas tolok spesimen dalam formula pengiraan tegasan σ yang ditunjukkan dalam Rajah 3.6(a).

3.2.4 Ujian Kekerasan

Rajah 3.8 menunjukkan penguji mikrokekeraan Mitutoyo HM-102 yang digunakan dalam kajian ini. Parameter kekerasan mengukur rintangan bahan terhadap ubah bentuk



Rajah 3.8 Ujian kekerasan Vickers: (a) peralatan ujian, (b) kedudukan pengukuran.

lekukan atau calar. Ujian kekerasan dilakukan dengan pembebanan 100 g selama 5 s. Nilai pembebanan tersebut adalah memadai untuk menghasilkan pinggir lekukan yang jelas. Permukaan sampel hasil pencanaian yang sekata juga membantu memegang sampel pada kedudukan yang berserenjang dengan pelekuk bagi menghasilkan lekukan yang tepat. Ini memudahkan pengukuran diagonal $\bar{d}$ untuk pengiraan kekerasan Vickers, sekaligus mengurangkan ralat pengukuran.

Kekerasan diukur sepanjang arah jejarian, bermula daripada 0.1 mm daripada pusat cakera, diikuti dengan 0.5 mm sehingga 14 mm dengan jarak antara titik pengukuran sebanyak 0.5 mm. Oleh kerana terikan kilas dipengaruhi oleh jarak daripada pusat putaran, pengukuran kekerasan diulang pada lapan arah jejari ($r_1 - r_8$) bagi menilai kehomogenan taburan kekerasan. Pengukuran tegasan ini diteruskan untuk kesemua sampel terproses HPT daripada satu hingga enam bilangan putaran.

3.2.5 Ujian Tegangan

Ujian tegangan dilakukan menggunakan mesin ujian tegangan yang direka bentuk untuk sampel HPT yang lebih kecil berbanding sampel ujian tegangan yang piawai. Rajah 3.9, menunjukkan reka bentuk mesin ujian tegangan dalam konfigurasi mendatar. Mekanisma tarikan dilakukan dengan memanfaatkan geometri spesimen dumbel tanpa melibatkan mekanisma pengapitan. Sebaliknya spesimen hanya dipegang bagi mengekalkan kedudukannya selepas gagal. Spesimen ditarik di dalam suhu bilik pada kadar terikan $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Kadar terikan dikekalkan kerana kepekaan terhadap kadar terikan yang tinggi hanya dilaporkan dalam suhu kerja panas (Mirzaie, Mirzadeh & Cabrera 2016). Ini kerana, gelinciran kehelan diaktifkan secara termal pada suhu tinggi.

Daya yang diperlukan untuk menarik spesimen pada anjakan tertentu diperoleh daripada ujian ini. Tegasan nominal ($\sigma = F/(w \times t)$) dan terikan nominal ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) kemudiannya dikira berdasarkan dimensi tolok spesimen ujian tegangan yang diukur dalam seksyen 3.2.3. L_0 adalah panjang asal tolok iaitu 1.5 mm, manakala w adalah lebar tolok dan t adalah tebal tolok yang diukur. Berdasarkan lengkung tegasan-terikan,



(a)

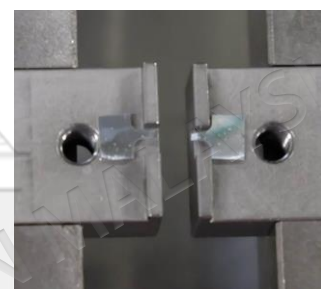


Pandangan atas



Pandangan sisi

(b)



(c)

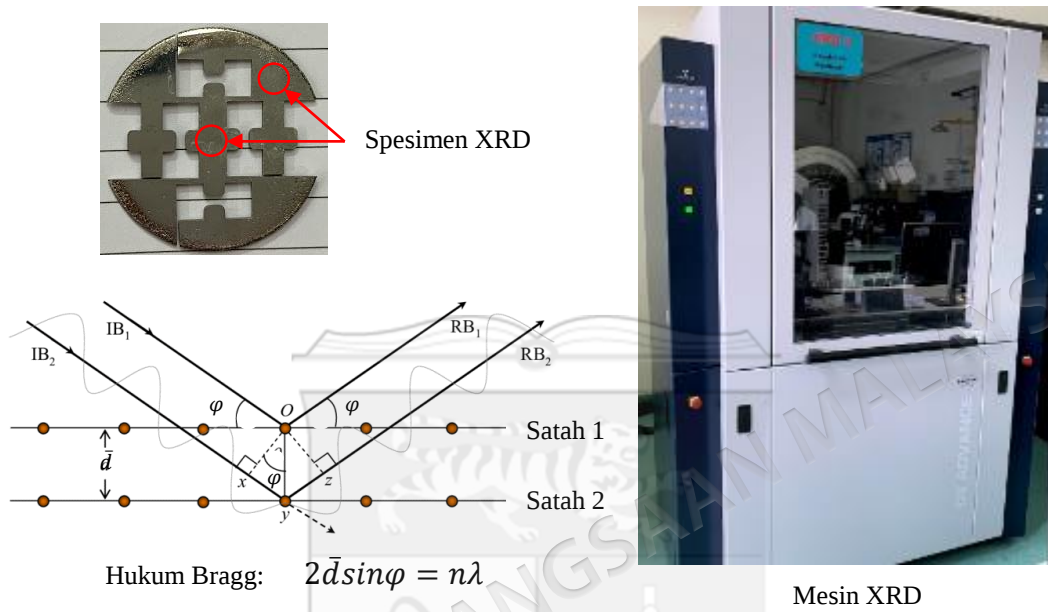
Rajah 3.9 Kedudukan sampel: (a) peralatan ujian tegangan konfigurasi mendatar, (b) sebelum ujian dan (c) selepas ujian.

nilai kekuatan alah, kekuatan tegangan dan terikan patah ditentukan. Evolusi sifat tegangan antara kedudukan jejari dan bilangan putaran berbeza dibandingkan.

3.2.6 Ujian Pembelaan Sinar-X (XRD)

Bagi menilai fasa kimia yang hadir dalam struktur hablur bahan, ujian pembelaan sinar-X (XRD) dijalankan menggunakan mesin XRD Bruker model D8 Advanced, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.10. Julat sudut Bragg 2φ ditetapkan antara 5° sehingga 110° , mengambil kira pembelaan elemen aluminium dan mendakan elemen pengaloi AA2024 pada satah yang berbeza. Spesimen XRD disediakan daripada sampel HPT yang dikenakan terikan pada $N = 2, 4$ dan 6 bagi menentukan kesan terikan terhadap perubahan mikrostruktur. Kedudukan spesimen XRD juga ditunjukkan dalam Rajah 3.10. Terikan yang dialami oleh spesimen yang diuji

dianggarkan berdasarkan kedudukan titik tengah pada spesimen tersebut. Sampel XRD dan plat XRD di mana sampel diletakkan dibersihkan menggunakan acetone dan etanol bagi memastikannya bebas daripada sebarang bendasing yang boleh mengganggu profil XRD.



Rajah 3.10 Analisis XRD untuk penelitian perubahan mikrostruktur bahan terproses HPT.

Semasa ujian XRD, alur sinar-X Cu-K α dihantar kepada sampel dan dibelaukan oleh atom yang berada pada laluan sinar-X tersebut. Bahan hablur termasuk logam mempunyai susunan struktur atom tertentu. Oleh sebab itu, elemen tertentu akan membelaukan sinar-X pada suatu sudut yang spesifik. Selain logam, persamaan Scherrer telah digunakan dengan meluas dalam menentukan saiz zarah dalam komposit (Deepracha, Vibulyaseak & Ogawa 2019; Mansor et al. 2018). Secara teori, pembelauan menggunakan hukum Bragg menghasilkan pantulan yang tajam. Walau bagaimanapun, ketidaksempurnaan sampel seperti saiz hablur, terikan kekisi, kegagalan tindanan dan sebagainya akan menghasilkan pelebaran puncak profil XRD.

Sifat mikrostruktur ditentukan melalui beberapa kaedah bagi mengesahkan pengiraan. Berdasarkan hukum Bragg atau rumus Scherrer, seperti Persamaan 3.1, saiz hablur purata $\bar{D}$ dikira dengan menyusun semula Persamaan 3.1 menjadi

Persamaan 3.2.

$$\beta = \frac{K\lambda}{\bar{D}\cos\varphi} \quad (3.1)$$

$$\bar{D} = \frac{K\lambda}{\beta\cos\varphi} \quad (3.2)$$

yang mana $K = 0.94$ adalah faktor bentuk, $\lambda = 0.15406$ nm adalah panjang gelombang sinar-X Cu-K α dan φ adalah sudut Bragg dalam unit radian. Nilai β adalah pelebaran puncak yang dikira berdasarkan lebar penuh pada separuh maksimum puncak XRD atau *full width half maximum* (FWHM). Persamaan Scherrer ini diterbitkan dengan mengabaikan kesan terikan kekisi. Dengan memplotkan β melawan $1/\cos\varphi$, saiz hablur ditentukan daripada kecerunan hubungan linear tersebut yang memintas paksi-y pada titik awalan. Persamaan Scherrer ini boleh digunakan untuk hablur bersaiz antara 600 nm hingga 1 μ m dan pada sudut Bragg $2\varphi > 60^\circ$ (Muniz et al. 2016).

Williamson & Hall (1953) pula mengembangkan persamaan Scherrer dengan mengambil kira kesan terikan kekisi $\bar{e}$. Pelebaran puncak disumbangkan oleh faktor saiz hablur (sebutan pertama) dan terikan kekisi (sebutan kedua), seperti Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4. Persamaan 3.4 seterusnya disusun semula menjadi Persamaan 3.5.

$$\beta = \beta_{\text{saiz hablur}} + \beta_{\text{terikan kekisi}} \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{K\lambda}{\bar{D}\cos\varphi} + 4\bar{e}\tan\varphi \quad (3.4)$$

$$\beta\cos\varphi = \frac{K\lambda}{\bar{D}} + 4\bar{e}\sin\varphi \quad (3.5)$$

Dengan memplotkan graf $\beta\cos\varphi$ melawan $4\sin\varphi$, saiz hablur dan terikan kekisi ditentukan masing-masingnya daripada kecerunan dan pintasan-y. Terikan kekisi adalah disebabkan oleh anjakan sistematik atom-atom daripada kedudukan asalnya dan menyebabkan herotan padan struktur kekisi hablur. Ia boleh terjadi kesan kecacatan titik, ketidaksempurnaan hablur, kehelan, kecerunan penumpuan terikan, struktur hablur yang kosong dan sebagainya (Fell et al. 2013).

Selain kaedah Williamson-Hall, pelebaran puncak boleh juga dianalisis menggunakan persamaan Halder-Wagner. Kaedah ini juga mengambil kira saiz hablur

dan terikan kekisi, seperti Persamaan 3.6.

$$(\beta/\tan \varphi)^2 = \left(\frac{K\lambda}{\bar{D}} \right) \frac{\beta}{\tan \varphi \sin \varphi} + 16\bar{e}^2 \quad (3.6)$$

Dengan memplotkan $(\beta/\tan \varphi)^2$ melawan $\beta/\tan \varphi \sin \varphi$, saiz hablur $\bar{D}$ dan terikan kekisi $\bar{e}$ masing-masingnya ditentukan daripada kecerunan dan pintasan-y.

3.3 PEMBANGUNAN MODEL HPT

Bagi meramal kelakuan bahan pada keadaan pemprosesan dan kedudukan tertentu, evolusi kekerasan, kekuatan dan proses HPT secara keseluruhan dimodelkan. Dua pendekatan permodelan digunakan iaitu analitikal dan simulasi menggunakan kaedah unsur terhingga. Ini diperincikan seperti di bawah.

3.3.1 Model Analitikal

Semasa pembebanan kilas, terikan tidak sekata berlaku ke atas sampel. Ujian tegangan dan kekerasan dilaksanakan bagi mengukur sifat mekanikal yang dicapai pada sampel AA2024 yang diproses. Namun, sampel HPT yang kecil menghadkan pengukuran kekuatan melalui ujian tegangan. Sebaliknya, pengukuran kekerasan boleh dilakukan dengan lebih menyeluruh pada pelbagai kedudukan jejari kerana tidak memerlukan penyediaan sampel. Kelebihan ini digunakan untuk pembangunan model analitikal aliran tegangan HPT dalam fungsi kekerasan. Bagi tujuan tersebut, taburan kekuatan dan kekerasan bagi AA2024 dengan peningkatan terikan diplotkan.

Perubahan sifat mekanikal daripada ujian kekerasan dan kekuatan yang dibentangkan dalam seksyen 3.2.4 dan 3.2.5 dibandingkan. Corak evolusi dua sifat mekanikal ini pada sela terikan tertentu boleh diungkapkan dalam bentuk kadar peningkatan sifat. Untuk itu, kecerunan kekerasan $E_{t,H}$ dan kekuatan tegangan $E_{t,\sigma}$ ditunjukkan masing-masingnya dalam Persamaan 3.7 dan Persamaan 3.8.

$$E_{t,H} = \frac{H_i - H_0}{\varepsilon_i - \varepsilon_0} \quad (3.7)$$

$$E_{t,\sigma} = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{\varepsilon_i - \varepsilon_0} \quad (3.8)$$

yang mana H_0 adalah kekerasan awal dan σ_0 adalah kekuatan tegangan awal sebelum HPT. Manakala H_i adalah kekerasan semasa dan σ_i adalah kekuatan tegangan semasa. Daripada Persamaan 3.7, $\varepsilon_i - \varepsilon_0$ dijadikan perkara rumus menjadi Persamaan 3.9.

$$\varepsilon_i - \varepsilon_0 = \frac{H_i - H_0}{E_{t,H}} \quad (3.9)$$

Daripada Persamaan 3.8 pula, tegasan semasa HPT σ_i ditulis semula sebagai perkara rumus, menjadi Persamaan 3.10.

$$\sigma_i = E_{t,\sigma} (\varepsilon_i - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (3.10)$$

Dengan menggantikan Persamaan 3.9 ke dalam Persamaan 3.10, tegasan semasa HPT diungkapkan sebagai Persamaan 3.11. Kaedah yang mengambil kira kekerasan awal sebenar H_0 dan kekuatan tegangan awal sebenar σ_0 bahan AA2024 ini dinamakan model I.

$$\sigma_i = \eta (H_i - H_0) + \sigma_0 \quad (3.11)$$

yang mana $\eta = E_{t,\sigma}/E_{t,H}$ iaitu nisbah penguatan-pengerasan. Nilai η ini mewakili gandaan evolusi kekuatan terhadap evolusi kekerasan dengan penambahan terikan. Seterusnya, model I ditambahbaik menjadi model II seperti Persamaan 3.12, melalui pengubahsuaian η dan nilai awal bagi meningkatkan ketepatan ramalan.

$$\sigma_i = \bar{\eta} (H_i - H'_0) + \sigma'_0 \quad (3.12)$$

Berbanding model I yang mengambil kira nilai kekerasan awal sebenar H_0 dan kekuatan tegangan awal sebenar σ_0 , model II ini mengambil kira nilai awal terubahsuai, H'_0 dan σ'_0 . Nilai terubahsuai ini diperoleh daripada padanan lengkung kekerasan dan kekuatan tegangan terhadap terikan setara yang menghasilkan corak kecerunan evolusi sifat yang sama. Hasilnya nilai awal dalam Persamaan 3.11 menjadi $H_0 = H'_0$ dan $\sigma_0 = \sigma'_0$ iaitu merujuk kepada nilai minimum pada paksi-y.

Model yang dibangunkan ini seterusnya diuji secara statistik bagi menilai kebolehppercayaan dan ketepatannya. Nilai residu dikira berdasarkan perbezaan nilai sebenar berbanding ramalan. Seterusnya kerawakan taburan residu di sepanjang nilai sifar terhadap kenaikan pembolehubah bersandar dipastikan. Nilai R^2 pula dikira berdasarkan jumlah ralat yang disingkirkan melalui analisis regresi, seperti Persamaan 3.13.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{Regresi}}{SS_{Jumlah}} \quad (3.13)$$

yang mana jumlah kuasa dua, $SS_{Regresi} = \sum(\check{\sigma}_i - \sigma_i)^2$, $SS_{Jumlah} = (\check{\sigma}_i - \bar{\sigma})^2$, $\check{\sigma}_i$ ialah tegasan uji kaji sebenar, σ_i ialah tegasan ramalan manakala $\bar{\sigma}$ ialah tegasan uji kaji purata. Nilai R^2 yang menghampiri 1 menjelaskan sebilangan besar varians diambil kira oleh model tersebut dan korelasi tegasan ramalan terhadap tegasan uji kaji adalah hampir sempurna. Selain R^2 , ketepatan ramalan juga diukur menggunakan parameter jumlah kuasa dua ralat (SSE) dan punca kuasa purata kuasa dua ralat (RMSE). Pengukuran ketepatan ramalan berdasarkan SSE dan RMSE diungkapkan dalam persamaan 3.14 dan 3.15.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \check{\sigma}_i)^2 \quad (3.14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \check{\sigma}_i)^2} \quad (3.15)$$

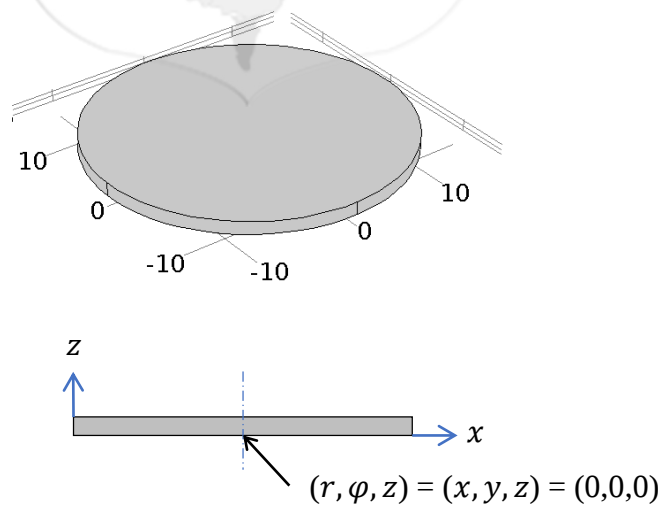
untuk suatu set bilangan data daripada $i = 1$ sehingga n . Model ramalan dengan SSE dan RMSE yang menghampiri 0 menjelaskan komponen ralat rawak yang lebih kecil.

3.3.2 Model Simulasi HPT

Simulasi unsur terhingga dilaksanakan menggunakan perisian COMSOL Multiphysic, modul mekanik pepejal dengan sifat keplastikan. HPT melibatkan permasalahan tidak linear. Ia merangkumi ketidaklinearan bahan yang menjagkaui fasa plastik dan ketidaklinearan geometri hasil ubah bentuk plastik melampau. Empat elemen simulasi unsur terhingga iaitu geometri, bahan, pembebanan dan keadaan sempadan diperincikan seperti berikut.

a. Geometri

Dimensi ruang tiga dimensi (3D) digunakan bagi memodelkan beban kilas pada satah x - y dan beban mampatan dalam arah z yang dikenakan secara serentak. Rajah 3.11 menunjukkan domain berbentuk silinder dengan jejari $R = 15$ mm dan ketebalan $H' = 1$ mm. Pusat bulatan bagi permukaan rata bawah silinder ditetapkan pada kedudukan $(r, \phi, z) = (x, y, z) = (0, 0, 0)$. Ubah bentuk andas semasa proses HPT tidak ditumpukan dalam kajian kerana terlalu kecil berbanding ubah bentuk sampel. Oleh itu, andas dianggap jasad tegar.

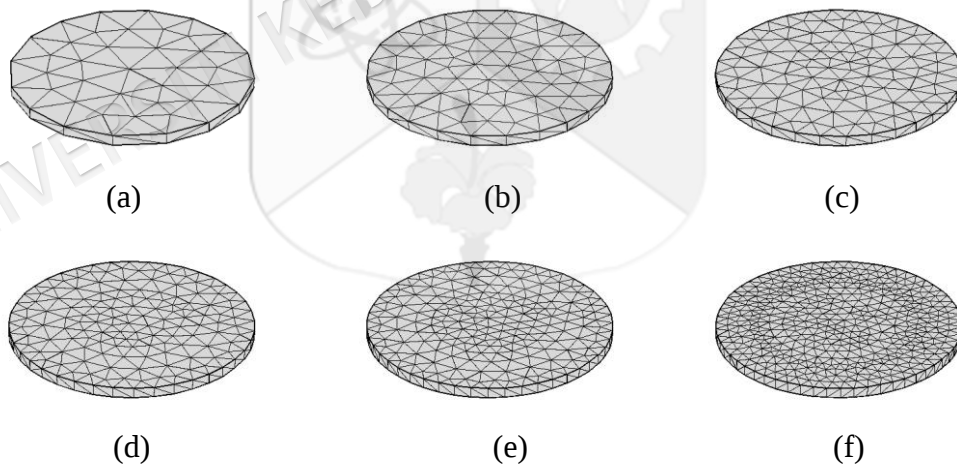


Rajah 3.11 Geometri dan kedudukan koordinat asalan bagi model sampel HPT.

Elemen tetrahedron digunakan untuk pendiskritan domain kerana unsur ini berkeupayaan untuk menganggar sebarang bentuk sempadan. Domain Ω didiskritkan menjadi sebilangan unsur terhingga n_e seperti Persamaan 3.16.

$$\Omega = \sum_{e=1}^{n_e} \Omega_e \quad (3.16)$$

Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.12, bilangan unsur n_e diubah daripada teramat kasar ($n_e = 54$) sehingga lebih halus ($n_e = 2548$) pada awal simulasi untuk menentukan bilangan unsur optimum. Penjanaan n_e yang sesuai adalah penting untuk mendapatkan keputusan pengiraan yang tepat dan masa pengiraan yang singkat. Model simulasi ini dibangunkan berasaskan permodelan makro. Oleh yang demikian, faktor saiz ira tidak dipertimbangkan. Justeru, pemilihan jejaring yang optimum dilakukan berasaskan analisis kestabilan keputusan tegasan daripada pengiraan berangka terhadap penambahan bilangan jejaring, dengan mempertimbangkan masa pemprosesan yang singkat, seperti yang diperincikan dalam seksyen 4.4.1.

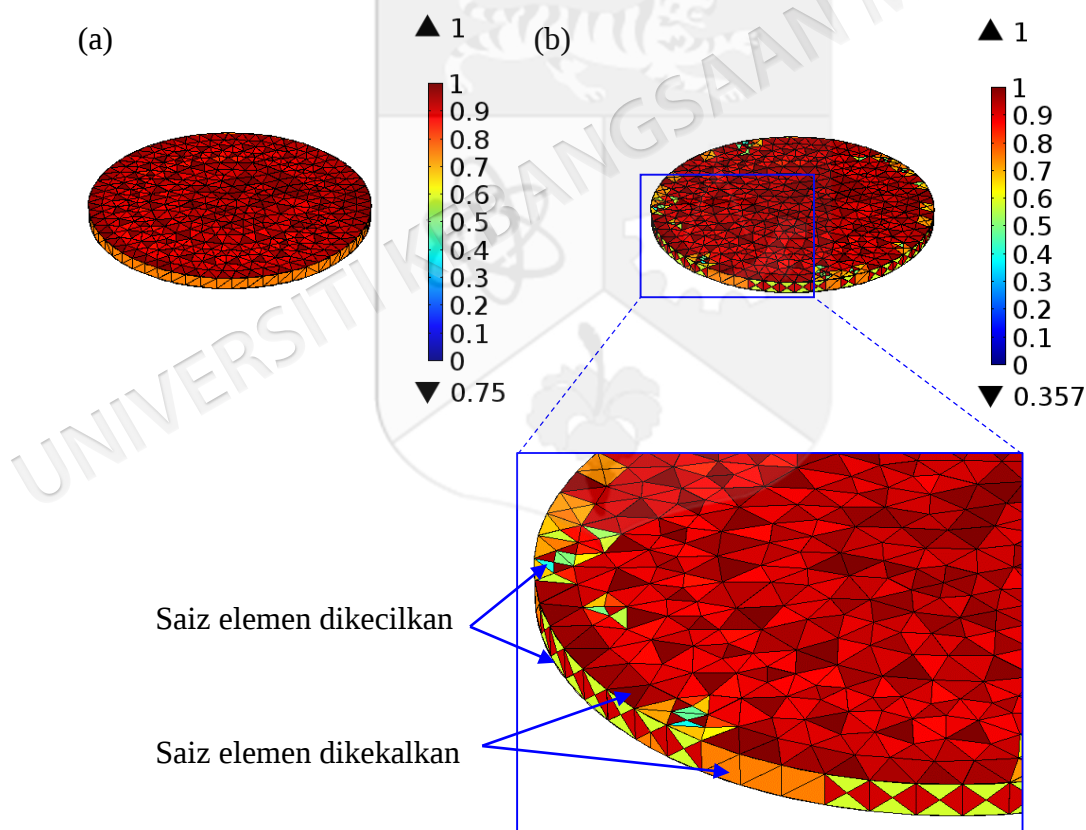


Rajah 3.12 Pengubahsuaian bilangan unsur terhingga n_e dalam model HPT: (a) 226, (b) 378, (c) 617, (d) 895, (e) 1289 dan (f) 2548.

Penjejaringan semula juga dilakukan semasa proses simulasi menggunakan prosedur pengecilan jejaring suai (*adaptive mesh refinement*). Dengan menggunakan kaedah pememulaan jejaring (*mesh initialisation*), algoritma ini melaraskan jejaring secara global pada keseluruhan model untuk menyelesaikan tegasan setempat dengan

lebih baik. Tegasan ini juga adalah bergantung kepada penyelesaian pada keseluruhan model. Oleh yang demikian, ia mengecilkan jejaring pada kawasan tumpuan tegasan yang memerlukan elemen yang lebih kecil dan membesarkan jejaring pada kawasan yang tidak mengalami penumpuan tegasan.

Rajah 3.13 menunjukkan penjejaringan semula dalam simulasi HPT pada sampel yang dimodelkan dengan 2548 jejaring. Kontur menunjukkan kualiti elemen, yang mana nilai 1 adalah kualiti elemen terbaik dengan panjang sisi elemen yang sama. Nilai 0 pula adalah sebaliknya mewakili kualiti elemen yang terherot sepenuhnya. Apabila ubah bentuk menyebabkan herotan pada elemen yang tinggi, penjejaringan semula dilakukan dengan mengecilkan jejaring yang terherot melalui pembahagian sisi yang mengalami pemanjangan.



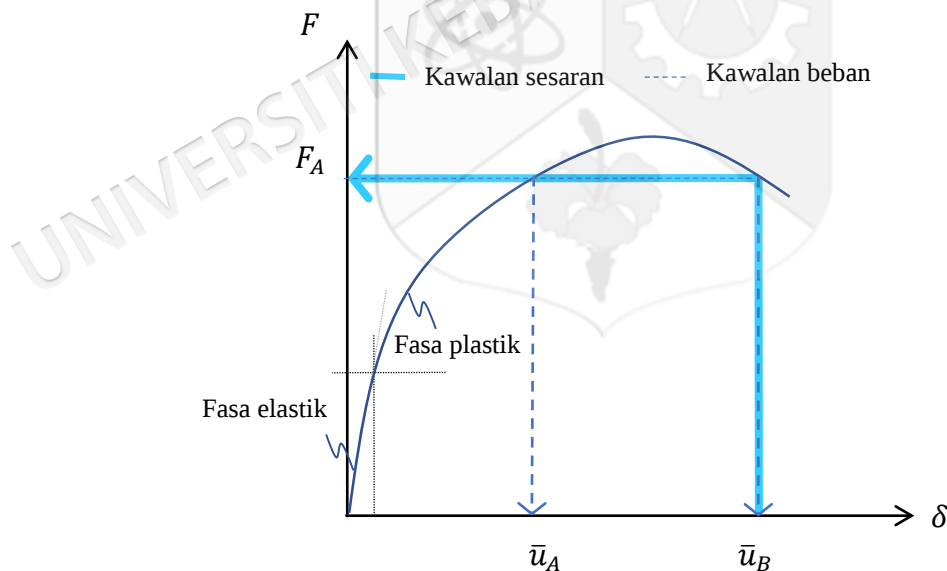
Rajah 3.13 (a) Jejaring asal dengan 2548 elemen, (b) penjejaringan semula.

Secara keseluruhannya, penjejaringan semula ini dapat dilihat pada kawasan pinggir sampel, di mana berlakunya ketidaklinearan geometri yang tinggi. Walaupun

pengecilan elemen ini mengurangkan kualiti elemen keseluruhan daripada minimum 0.75 kepada 0.357, prosedur ini masih menghasilkan penyelesaian yang baik. Sebaliknya, kualiti elemen yang menghampiri 0 kesan herotan yang tinggi boleh menyebabkan pengiraan tidak menumpu dan tidak dapat diselesaikan.

b. Pembebanan

Rajah 3.14 menunjukkan perbezaan penyelesaian masalah berasaskan kawalan beban dan kawalan sesaran untuk permasalahan yang melangkaui fasa elastik. Bagi penyelesaian menggunakan kawalan beban, apabila diberi sejumlah pembebanan, F_A , terdapat lebih daripada satu kebarangkalian penyelesaian sesaran iaitu sama ada $\bar{u}_A$ atau $\bar{u}_B$. Sebaliknya jika diberi sejumlah sesaran, $\bar{u}_B$, penyelesaiannya adalah unik pada satu nilai pembebanan, iaitu F_A . Justeru, kawalan sesaran dilihat lebih baik berbanding kawalan beban dalam menyelesaikan permasalahan tidak linear melibatkan fasa ubah bentuk plastik.



Rajah 3.14 Penyelesaian masalah plastik berasaskan kawalan beban dan kawalan sesaran.

Beban mampatan dan kilas ditetapkan berasaskan kawalan sesaran, u_z dan u_θ , pada sempadan atas cakera Γ_a , seperti Persamaan 3.17 dan 3.18.

$$u_z(r, \theta, h) = \bar{u} \quad (3.17)$$

$$u_\theta(r, \theta, h) = r(x, y) \cdot \bar{\theta} \quad (3.18)$$

yang mana $\bar{\theta}$ adalah darjah putaran dalam unit radians dan r ialah jarak daripada pusat.

Dengan merujuk pusat silinder sebagai paksi putaran yang melalui titik asalan, (x_0, y_0) , r didefinisikan dalam sebutan x dan y pada satah $x-y$, seperti Persamaan 3.19.

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (3.19)$$

Persamaan ini mewakili penjajaran sempurna antara andas, yang mana paksi putaran andas dan titik pusat sampel (x_0, y_0) adalah sejajar. Pada θ tertentu, sesaran yang lebih besar dikenakan pada nod yang terletak lebih jauh daripada pusat putaran. Pembebanan mampatan u_z dan pembebanan kilas u_θ diaplikasikan secara berperingkat dalam sela masa yang kecil. Penambahan beban secara berperingkat ini mengelakkan masalah penumpuan pengiraan. Parameter penambahan beban yang cukup kecil boleh mengurangkan ralat dalam penyelesaian. Ini kerana sekiranya parameter yang dipilih terlalu besar, anggaran awal penyelesaian berdasarkan penyelesaian yang dikira dalam lelaran sebelumnya adalah besar berbanding penyelesaian dalam lelaran semasa.

Di samping pembebanan secara berperingkat, terdapat kebarangkalian untuk berlakunya herotan akibat ubahbentuk plastik yang dikenakan. Bagi mengatasi cabaran tersebut, beberapa langkah penjejaringan semula dilakukan semasa setiap simulasi. Walau bagaimanapun, langkah penjejaringan semula ini menyebabkan sedikit ralat pada taburan terikan dan sampel geometri. Pembebanan HPT dengan ubah bentuk plastik yang sangat besar ini menyebabkan herotan elemen yang besar, terutamanya untuk sudut kilasan $\theta \geq \pi/6$ yang bersamaan 30° (Larijani, Kammerhofer & Ekh 2015). Oleh yang demikian, kajian ini dihadkan kepada $\pi/6$ yang bersamaan dengan 30° putaran. Walaupun darjah putaran sebenar dalam uji kaji adalah jauh lebih tinggi,

permodelan melalui simulasi ini masih berkebolehan dalam menganalisis kesan terikan terhadap proses HPT. Masih terdapat pelbagai ketidakpastian dalam fenomena HPT dan permodelan HPT itu sendiri yang tidak dapat diteliti melalui pendekatan uji kaji boleh dianalisis pada julat putaran ini. Antaranya termasuk corak aliran tegasan merentasi dimensi sampel dengan kepelbagaian konfigurasi andas pada setiap peringkat pembebanan.

Nisbah gelinciran adalah hampir sifar dalam pemprosesan aluminium pada tekanan $P > 2$ GPa dan kadar putaran $\omega < 1$ rpm (Edalati, Horita & Langdon 2009). Berdasarkan uji kaji, gelinciran juga tidak dibuktikan melalui pemeriksaan fizikal pada permukaan sampel HPT pada $P = 4$ GPa dan $\omega = 0.2$ rpm, seperti yang diterangkan dalam Rajah 3.4. Dengan pembebanan yang diberikan dan mengandaikan permukaan sentuhan antara andas dan sampel adalah memadai untuk menghalang gelinciran antara permukaan, geseran antara andas dan sampel ditetapkan memenuhi keadaan lekatan. Oleh kerana masalah ini tidak melibatkan gelinciran, geseran tidak dipertimbangkan dalam model ini.

Bagi dinding andas dan permukaan luar ruangan sampel pula, permukaan tersebut kebiasaannya digilap bagi mengurangkan geseran. Walau bagaimanapun, dalam keadaan sebenar, tekanan tinggi dan kesan haus pada andas mungkin mengurangkan gilapan dan meningkatkan geseran. Namun, Figueiredo et al. (2011) membuktikan bahawa kesan pekali geseran μ pada dinding dan luar ruangan sampel terhadap taburan terikan efektif pada sampel dalam ruangan sampel adalah tidak signifikan. Oleh yang demikian, kesan pekali geseran diabaikan pada keseluruhan model simulasi ini.

c. Keadaan sempadan

Dalam mensimulasikan beban kilas, sempadan bawah sampel Γ_b ($z = 0$) ditetapkan dalam semua arah, seperti Persamaan 3.20. Sempadan atas sampel Γ_a ($z = H'$) pula ditetapkan dalam arah jejarian sahaja, seperti Persamaan 3.21. Keadaan sempadan ini membenarkan ubah bentuk dalam arah paksian dan putaran kerana pembebanan

mampatan dan kilas dilakukan dalam arah tersebut.

$$u_r(r, \theta, 0) = u_\theta(r, \theta, 0) = u_z(r, \theta, 0) = 0 \quad (3.20)$$

$$u_r(r, \theta, h) = 0 \quad (3.21)$$

yang mana r, θ dan z ialah mewakili koordinat silinder.

Simulasi aliran tegasan kesan kepelbagaian konfigurasi andas melibatkan andas atas, bawah dan sampel. Oleh kerana terdapat mekanisma sentuhan, model diringkaskan kepada dua dimensi (2D). Ini kerana faktor ketidaklinearan yang boleh menyukarkan penyelesaian model bertambah. Model ini digunakan untuk mensimulasikan peringkat pembebanan mampatan.

Andas atas dikenakan anjakan dalam arah z mengikut Persamaan 3.17 dan 3.18 sehingga bersentuhan dengan permukaan atas sampel dan turut menghasilkan anjakan pada sampel. Hasil anjakan ini, kesemua nod pada permukaan atas sampel bersentuhan dan menerima anjakan dalam arah anjakan andas atas sehingga mencapai tekanan yang ditetapkan. Dalam mentakrifkan pasangan permukaan sentuh, bahan yang lebih kuat ditetapkan sebagai sumber. Dalam kes HPT, andas ditetapkan sebagai sumber dan sampel sebagai destinasi sentuhan.

Penggunaan kelakuan keplastikan dalam masalah melibatkan sentuhan menjadikan penumpuan pengiraan berangka menjadi sukar dan amat perlahan menggunakan kaedah tekanan sentuhan *Augmented Lagrangian*. Oleh itu, kaedah tekanan sentuhan penalti yang lebih ringkas digunakan. Kaedah penalti diimplimentasi dengan memperkenalkan suatu unsur pegas secara maya, dengan kekakuan 1×10^4 daripada nilai maksimum dalam matriks kekakuan, pada sempadan yang dikekang. Langkah ini dilakukan bagi mengelakkan domain sumber menembusi sempadan destinasi. Andas bawah pula dimodelkan sebagai domain tegar. Ini bermakna tiada anjakan dalam mana-mana paksi dibenarkan.

Bagi merealisasikan langkah tersebut, keadaan sempadan bagi andas atas Ω_a dan bawah Ω_b masing-masingnya ditetapkan sebagai Persamaan 3.22 dan 3.23.

$$u_r(r, \theta, z) = 0 \quad (3.22)$$

$$u_r(r, \theta, z) = u_\theta(r, \theta, z) = u_z(r, \theta, z) = 0 \quad (3.23)$$

d. Bahan

Sifat mekanikal sampel dan andas HPT diringkaskan dalam Jadual 3.2. Sampel diperbuat daripada aloi aluminium AA2024. Sifat isotropik diambil kira untuk sampel kerana analisis metalografi lazimnya mendapati pemprosesan HPT menghasilkan struktur ira yang sama dimensi (Akbarpour et al. 2015; Zhilyaev et al. 2003).

Jadual 3.2 Sifat mekanikal bagi sampel dan andas yang ditetapkan dalam model simulasi (Comsol Multiphysics Material Library).

Sifat	Sampel	Andas
Jenis bahan	Aloi aluminium AA2024	Keluli perkakas kekuatan tinggi
Ketumpatan (kg/m^3)	2780	7850
Nisbah Poisson	0.33	0.3
Kekuatan alah awal (MPa)	326	440
Modulus Young (GPa)	73.1	200

Andas pula dimodelkan sebagai keluli perkakas kekuatan tinggi, mengikut spesifikasi andas sebenar (Alhajeri et al. 2016). Ubah bentuk andas sepanjang proses tidak diambil kira, yang mana kelakuan andas dianggap tegar. Selain itu, kadar terikan tidak dipertimbangkan dalam permodelan ini kerana mengambil kira kesannya yang sedikit terhadap aliran tegasan (Figueiredo et al. 2011). Pengaruh suhu dalam kelakuan bahan turut diabaikan kerana proses HPT dilakukan pada suhu bilik. Oleh itu, ia dianggap sebagai sebuah proses kerja sejuk. Walaupun mungkin terdapat kesan suhu disebabkan ubah bentuk plastik melampau, kenaikan suhu untuk aluminium adalah tidak ketara pada 0.2 rpm kadar putaran (Edalati et al. 2011; Figueiredo et al. 2012b).

Kesan kenaikan suhu untuk aluminium telah dibincangkan dalam seksyen 2.2.3 dan merujuk kepada Rajah 2.8. Justeru, penjanaaan haba disebabkan geseran dan ubah bentuk diabaikan.

e. Persamaan Menjuzuk

Dalam bidang keplastikan, peningkatan tegasan dengan penambahan terikan ditakrifkan melalui suatu persamaan menjuzuk. Persamaan menjuzuk boleh menerangkan kelakuan sesebuah bahan secara kualitatif dan kuantitatif.

Sampel HPT dimodelkan dengan mengandaikan suatu domain Ω dengan jisim tertentu dan permukaan sempadan Γ . Bilangan dimensi diwakili oleh n iaitu ($1 < n < 3$). Ia dikenakan suatu beban $\mathbf{b}$ iaitu mampatan dan kilas pada permukaan dan beban jasad $\mathbf{t}$. Tegasan dan terikan pada mana-mana titik dalam domain tersebut masing-masingnya diwakili oleh sebutan seperti Persamaan 3.24 dan 3.25.

$$\sigma = [\sigma_{ijk}] \text{ untuk } i, j, k = 1, \dots, n \quad (3.24)$$

$$\text{atau } \sigma = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}]^T$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_{ijk}] \text{ untuk } i, j, k = 1, \dots, n \quad (3.25)$$

$$\text{atau } \varepsilon = [\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{31}]^T$$

Sesaran ialah tensor tertib pertama iaitu

$$q = \{u_i\} \text{ untuk } i = 1, \dots, n \quad (3.26)$$

Sesebuah model yang melibatkan terikan tinggi diformulasikan menggunakan penguraian pendaraban kecerunan ubah bentuk. Dengan menganggap l adalah ubah bentuk melampaui had elastik, l_p adalah ubah bentuk kekal setelah beban dialihkan dan l_0

adalah konfigurasi asal, kecerunan ubah bentuk $\bar{F}$ didefinisikan sebagai Persamaan 3.27.

$$\bar{F} = \bar{F}_e \cdot \bar{F}_p \quad (3.27)$$

yang mana $\bar{F}_e = l/l_p$ dan $\bar{F}_p = l_p/l_0$ masing-masingnya adalah komponen kecerunan ubah bentuk elastik dan plastik. Jumlah terikan bagi model elastoplastik boleh diungkapkan sebagai hasil tambah terikan elastik dan plastik, seperti Persamaan 3.28.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3.28)$$

Berdasarkan penguraian komponen ini, kelakuan elastik dan plastik kemudiannya ditakrifkan. Bagi komponen elastik, matrik keelastikan $\mathbf{D}_e$ bagi permasalahan tiga dimensi diungkapkan sebagai Persamaan 3.29.

$$\mathbf{D}_e = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

yang mana E ialah modulus Young dan ν adalah nisbah Poisson. Hubungan tegasan-terikan bagi komponen elastik diungkapkan sebagai Persamaan 3.30.

$$\sigma = \mathbf{D}_e \varepsilon^e \quad (3.30)$$

atau dalam bentuk penambahan terikan elastik seperti Persamaan 3.31.

$$d\varepsilon^e = \mathbf{D}_e^{-1} d\sigma \quad (3.31)$$

Bagi mentakrifkan kelakuan plastik pula, kriteria alah, hukum aliran dan fungsi pengerasan diformulasikan. Kriteria alah ϕ diwakili oleh suatu fungsi permukaan alah, yang bergantung kepada permukaan alah awal σ_{y0} dan fungsi pengerasan σ_h . Fungsi ini ditakrifkan seperti Persamaan 3.32.

$$\phi = f(\sigma_{y0}, \sigma_h) \quad (3.32)$$

Ia menentukan had elastik aliran tegasan bagi sebarang kombinasi tegasan, seperti Persamaan 3.33.

$$\phi \begin{cases} < 0, & \text{elastik} \\ = 0, & \text{plastik} \end{cases} \quad (3.33)$$

Untuk bahan yang berstruktur kubik seperti AA2024, bahan diandaikan mematuhi kriteria alah von Mises (Jonas, Ghosh & Toth 2014). Kelakuan ini diwakili oleh Persamaan 3.34.

$$\phi = \sigma_e - \sigma_y \quad (3.34)$$

yang mana σ_e adalah tegasan setara von Mises atau juga dipanggil tegasan efektif, dan σ_y adalah kekuatan alah. Tegasan von Mises didefinisikan seperti Persamaan 3.35.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (3.35)$$

atau

$$\sigma_e = \left[\frac{3}{2} (\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\sigma_{12}^2 + 2\sigma_{23}^2 + 2\sigma_{31}^2) \right]^{1/2}$$

Fungsi pengerasan σ_h pula mengambil kira hubungan tegasan-terikan dalam fasa plastik ε_p selepas melepasi keadaan alah awal σ_{y0} . Pengerasan isotropik ini diformulasikan sebagai Persamaan 3.36.

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + \sigma_h(\varepsilon_p) \quad (3.36)$$

Seterusnya, hukum aliran mentakrifkan hubungan antara tegasan dan terikan bagi kelakuan bahan melepasi had alah. Potensi aliran plastik Q didefinisikan sebagai Persamaan 3.37.

$$Q = f(\sigma, \varepsilon^p, \sigma_h) \quad (3.37)$$

Pembezaan separa potensi plastik dilakukan terhadap tegasan dan penambahan terikan plastik dituliskan dalam sebutan potensi plastik sebagai Persamaan 3.38.

$$d\varepsilon^p = d\gamma \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (3.38)$$

yang mana $d\gamma$ adalah pemalar perkadaran. Evolusi aliran plastik untuk bahan logam biasanya diandaikan mematuhi hukum aliran sekutu, seperti Persamaan 3.39. Penggunaan hukum aliran sekutu untuk bahan HPT turut disokong oleh Kulagin et al. (2017).

$$Q \equiv \phi \quad (3.39)$$

yang mana ϕ adalah fungsi alah dan Q adalah potensi aliran plastik. Dalam hukum aliran sekutu, potensi plastik sentiasa merupakan normal terhadap permukaan alah.

Keadaan pembebanan dan pengalihan beban diformulasikan mengikut model keplastikan lazim seperti Persamaan 3.40.

$$\dot{\lambda} \geq 0, \quad \phi \leq 0, \quad \dot{\lambda}\phi = 0 \quad (3.40)$$

yang mana $\dot{\lambda}$ adalah pengganda plastik. Daripada Persamaan 3.28, peningkatan terikan juga boleh ditulis dalam komponen elastik dan plastik seperti persamaan 3.41.

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (3.41)$$

Seperti yang ditakrifkan dalam Persamaan 3.31 dan 3.38, Persamaan 3.41 dikembangkan menjadi Persamaan 3.42.

$$d\varepsilon = \mathbf{D}_e^{-1} d\sigma + d\gamma \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (3.42)$$

Semasa alah, tegasan berada pada permukaan alah. Pembezaan bagi kriteria alah menghasilkan ungkapan dalam Persamaan 3.43.

$$d\phi = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial \phi}{\partial \bar{h}} d\bar{h} = 0 \quad (3.43)$$

Persamaan 3.43 disusun semula menjadi Persamaan 3.44.

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right\}^T d\sigma - \bar{H} d\gamma = 0 \quad (3.44)$$

yang mana $\bar{H}$ adalah modulus pengerasan yang ditulis sebagai Persamaan 3.45.

$$\bar{H} = - \frac{\partial \phi}{\partial \bar{h}} \frac{d\bar{h}}{d\gamma} \quad (3.45)$$

Persamaan 3.42 dan 3.44 kemudiannya diungkapkan dalam bentuk matriks seperti Persamaan 3.46.

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_e^{-1} & \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \\ \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right\}^T & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma \\ d\gamma \end{Bmatrix} \quad (3.46)$$

Dengan menghapuskan pemalar $d\gamma$ melalui penyelesaian persamaan serentak, hubungan tegasan-terikan bagi model elastoplastik ini diungkapkan sebagai Persamaan 3.47.

$$d\sigma = \left[\mathbf{D}_e - \frac{\mathbf{D}_e \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right\}^T \mathbf{D}_e}{\bar{H} + \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right\}^T \mathbf{D}_e \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}} \right] d\varepsilon \quad (3.47)$$

Persamaan 3.47 ini kemudiannya diringkaskan menjadi Persamaan 3.48.

$$d\sigma = \mathbf{D}_{ep} d\varepsilon \quad (3.48)$$

yang mana $\mathbf{D}_{ep}$ adalah matriks hubungan menjuzuk elastoplastik bahan. Sebutan matriks tersebut yang bergantung kepada pelbagai fungsi berbeza menjelaskan ketidaklinearan yang tinggi.

f. Implementasi Pengiraan

Jasad kontinum didiskritkan sebanyak n_e unsur terhingga. Anjakan u_i dan terikan ε_i dalam sesebuah unsur boleh dikira daripada Persamaan 3.49 dan Persamaan 3.50.

$$u_i = \sum_{n=1}^6 N_i(\xi) q_i \quad (3.49)$$

$$\varepsilon_i = \sum_{n=1}^6 B_i(\xi) q_i \quad (3.50)$$

yang mana q_i adalah anjakan maya pada nod, N_i adalah fungsi bentuk atau fungsi interpolasi dan B_i adalah matriks terikan-sesaran.

Sebelum ubah bentuk HPT, daya dalaman sampel diseimbangkan oleh tindakbalas luaran, seperti Persamaan 3.51.

$$\underbrace{\int_{\Omega} \sigma \delta \varepsilon d\Omega}_{\text{(dalaman)}} = \underbrace{\int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \delta \mathbf{q} d\Omega}_{\text{(luaran)}} + \int_{\Gamma} \mathbf{t} \delta \mathbf{q} d\Gamma \quad (3.51)$$

Seterusnya, pembebanan HPT menghasilkan vektor residu pada unsur r^e , seperti Persamaan 3.52.

$$\int_{\Omega} \sigma \delta \varepsilon d\Omega - \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \delta \mathbf{q} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{t} \delta \mathbf{q} d\Gamma = r^e \quad (3.52)$$

Dengan menggantikan $\sigma = \mathbf{D}_{ep} \varepsilon$ daripada Persamaan 3.48 dan $\varepsilon = \mathbf{B} \mathbf{q}$ daripada Persamaan 3.50, Persamaan 3.52 diungkapkan menjadi Persamaan 3.53.

$$\int_{\Omega_e} \mathbf{B}_e^T \mathbf{D}_{ep} \mathbf{B}_e \mathbf{q} d\Omega - \left[\int_{\Omega_e} \rho N_e^T \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} N_e^T \mathbf{t} d\Gamma \right] = r^e \quad (3.53)$$

Melalui pelinearan Persamaan 3.53, matriks kekakuan unsur $[\mathbf{k}_e]$ ditentukan daripada Persamaan 3.54.

$$[\mathbf{k}_e] \{\Delta \mathbf{q}_e\} = \{\mathbf{r}^e\} \quad (3.54)$$

yang mana $\{\Delta \mathbf{q}_e\}$ ialah anjakan berperingkat yang ditetapkan dan $\{\mathbf{r}^e\}$ ialah vektor daya yang dikenakan. Dengan itu, $[\mathbf{k}_e]$ didefinisikan sebagai Persamaan 3.55.

$$[\mathbf{k}_e] = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}_e^T \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \mathbf{B}_e d\Omega \quad (3.55)$$

dengan $\partial \sigma / \partial \varepsilon = \mathbf{D}_e$ apabila $\phi < 0$ dan $\partial \sigma / \partial \varepsilon = \mathbf{D}_{ep}$ apabila $\phi = 0$.

Seterusnya, matriks kekakuan global $[\mathbf{K}]$ dan vektor daya global $\{\mathbf{R}\}$ ditulis sebagai Persamaan 3.56 dan 3.57.

$$[\mathbf{K}] = \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{k}_e \quad (3.56)$$

$$[\mathbf{R}] = \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{r}_e \quad (3.57)$$

Persamaan 3.54 bagi setiap unsur dikumulatitkan menjadi persamaan global 3.58.

$$[\mathbf{K}] \Delta \mathbf{u} = \{\mathbf{R}\} \quad (3.58)$$

Penyelesaian masalah HPT yang melibatkan ketidaklinearan yang tinggi dilakukan melalui pengenalan parameter kenaikan anjakan berperingkat, q_n^k . Jumlah kumulatif anjakan $\Delta q_n^i = \sum_{k=0}^i \delta q_n^k$, menghasilkan jumlah terikan kumulatif seperti Persamaan 3.59.

$$\Delta \varepsilon_n^i = \mathbf{B} \Delta q_n^i \quad (3.59)$$

Maka, tegasan pada setiap q_n^k dikira daripada Persamaan 3.60.

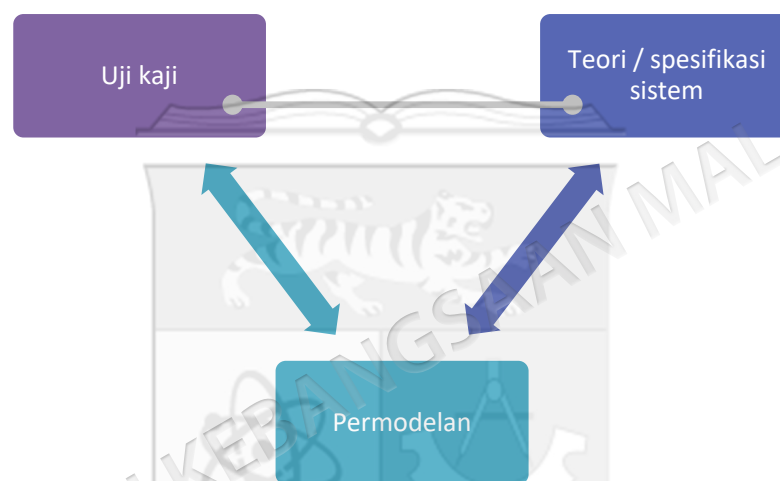
$$\Delta \sigma_n^i = \int_0^{\Delta \varepsilon_n^i} \mathbf{D}_{ep} d\varepsilon \quad (3.60)$$

Implementasi pengiraan berangka HPT ini diringkaskan dalam Lampiran B. Formulasi yang diperincikan ini digunakan dalam pengiraan simulasi berangka HPT. Dalam bahagian seterusnya, penentusahan model ini diterangkan.

3.4 PENENTUSAHAN MODEL SIMULASI HPT

Penerbitan model untuk meramal suatu pemboleh ubah kesan pengubahsuaian pemboleh ubah yang lain merupakan inisiatif penting dalam kajian HPT. Bagi menentukan kualiti model simulasi HPT yang dibangunkan, model yang dibangunkan perlu ditentusahkan dan pengukuran ini perlu dilaporkan secara telus. Penentusahan bagi pengukuran ramalan menyediakan perincian maklumat kepada komuniti penyelidik HPT berkenaan kebolehpercayaan model tersebut bagi memastikan ketepatannya dalam mewakili sistem dan proses HPT sebenar.

Rajah 3.15 menunjukkan pengesahan dan penentusahan, iaitu dua langkah utama dalam menentusahkan sesebuah model. Pengesahan adalah merujuk kepada penilaian keberkesanan implimentasi model terhadap kefahaman teori, konsep mahupun spesifikasi sistem. Dalam erti kata yang lain, pengesahan membandingkan keputusan simulasi terhadap data daripada model analitikal. Penentusahan pula adalah merujuk kepada penilaian ketepatan model dalam mewakili sistem/proses sebenar. Ia membandingkan keputusan simulasi ataupun analitikal terhadap data uji kaji sebenar yang diukur secara fizikal.



Rajah 3.15 Konsep penentusahan dan pengesahan sesebuah permodelan.

Bagi meningkatkan penumpuan lelaran pengiraan unsur terhingga, HPT disimulasikan dalam julat darjah putaran yang kecil ($\theta \leq 30^\circ$) berbanding uji kaji ($\theta_{min} = 360^\circ$). Walaupun begitu, simulasi putaran ini masih menghasilkan ubah bentuk plastik melampau yang mana $\varepsilon < 260$, berbanding terikan dalam ubah bentuk konvensional ($\varepsilon < 1$). Dalam permasalahan keplastikan, jumlah terikan disumbangkan oleh terikan elastik dan plastik. Oleh itu, kelakuan pengerasan diandaikan mengikut fungsi pengerasan dwilinear bagi meringkaskan pengiraan. Ia diungkapkan dalam sebutan modulus Young E bagi fasa elastik dan modulus tangen E_t bagi fasa plastik, seperti yang diberikan pada Persamaan 2.4. Kelakuan elastoplastik ini dimodelkan mengikut dua fasa ubah bentuk, elastik dan plastik tersebut, masing-masingnya seperti Persamaan 3.61 dan 3.62.

$$\sigma = E\varepsilon_e, \sigma \leq \sigma_y \quad (3.61)$$

$$\sigma = E_t\varepsilon_p, \sigma \geq \sigma_y \quad (3.62)$$

yang mana σ ialah tegasan pada terikan tertentu, ε_e ialah terikan yang dikenakan dalam julat fasa elastik dan ε_p ialah terikan yang dikenakan dalam julat fasa plastik. Persamaan ini menjelaskan kesinambungan pada keadaan alah, σ_y , iaitu titik peralihan antara fasa elastik dan plastik.

Keputusan simulasi dibandingkan dengan konsep analitikal HPT bagi mengesahkan keberkesanan implementasi model HPT. Kesan pengubahsuaian parameter masukan kekuatan alah awal σ_{y0} dan E_t turut dinilai berdasarkan evolusi aliran tegasan yang disimulasikan. Beberapa ciri keplastikan menggunakan pelbagai σ_{y0} dan E_t diambil kira. Untuk itu, kekuatan alah awal σ_{y0} ditetapkan bermula daripada 326 MPa. Nilai minimum σ_{y0} adalah berdasarkan nilai alah yang biasa dilaporkan untuk AA2024. Sementara itu, E_t pula dianggarkan daripada lengkung tegasan-terikan bagi bahan HPT AA2024 sebenar yang diproses pada $N = 1$.

Bagi penentuan model simulasi berangka pula, keputusan simulasi dibandingkan dengan data uji kaji sebenar. Untuk itu taburan kekerasan uji kaji pada terikan kecil diunjurkan daripada data kekuatan tegangan menggunakan Persamaan 4.6. Seterusnya, tegasan setempat dianggarkan melalui kecerunan kekuatan-kekerasan daripada model kelakuan penguatan yang dibangunkan dalam bahagian 3.3.1.

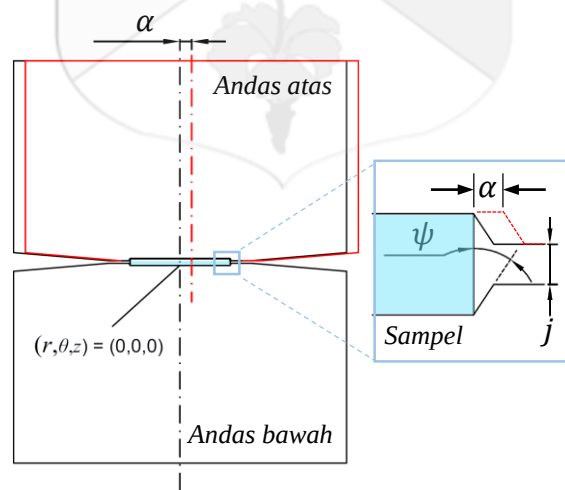
3.5 KAWALAN UBAH BENTUK HPT

Kawalan terhadap ubah bentuk HPT dilakukan melalui analisis aliran tegasan dengan pengubahsuaian parameter dimensi sampel dan konfigurasi andas. Parameter ini dinilai berdasarkan ketersediaan kajian masa kini yang amat terhad dan mengambil kira kelebihan pendekatan simulasi dalam menyediakan kepelbagaian pembolehubah secara sistematik dengan kos yang rendah. Dengan menggunakan model simulasi yang telah ditentukan, pembolehubah dimensi sampel yang dikaji ialah jejari dan ketebalan.

Kepelbagaian jejari ditetapkan antara 15 mm sehingga 60 mm. Tebal sampel pula divariasikan antara 1.25 mm sehingga 10 mm. Kesan nisbah bidang iaitu tebal terhadap diameter, terhadap aliran tegasan turut dianalisis.

Pembolehubah konfigurasi andas pula termasuk jurang aliran bebas, sudut kecondongan dinding andas dan penjajaran andas atas dan bawah, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.16. Bagi tujuan tersebut, andas dianjak sebanyak 0.065 mm dan menghasilkan tekanan yang menyamai 4 GPa. Analisis aliran bahan mengesahkan kesan konfigurasi andas terhadap tekanan dan tegasan yang dirasai oleh sampel. Bagi mengurangkan darjah kebebasan model, kesan jurang aliran bebas dan sudut kecondongan dinding dianalisis menggunakan model dua dimensi. Ini kerana hanya peringkat pembebanan mampatan diambil kira dalam mensimulasikan taburan tekanan balikan pada sampel.

Perbezaan tekanan ini seterusnya menyebabkan perbezaan pada tegasan sampel yang mempengaruhi kekuatan akhir. Dalam uji kaji HPT sebenar, tekanan tinggi dalam HPT membantu dalam menghalang gelinciran (Edalati, Horita et al. 2009), mengumpul kecacatan, mempercepatkan penghalusan ira (Bazarnik et al. 2016) dan menggalakkan



Rajah 3.16 Ilustrasi pembolehubah konfigurasi andas yang dinilai melalui pendekatan analisis undur sehingga iaitu jurang aliran bebas j , anjakan penjajaran andas atas dan bawah α serta sudut kecondongan dinding andas ψ .

perkembangan kehomogenan semasa pemprosesan (Zhilyaev et al. 2001). Tambahan kepada peranan yang disebutkan, pengaruh fasa mampatan terhadap penguatan sampel dieksplorasi.

Bagi meneliti kesan jurang aliran bebas, jarak antara andas dipelbagaikan dengan mengubah kedalaman ruangan sampel antara 0 mm, mewakili konfigurasi terkekang penuh, sehingga 1 mm mewakili konfigurasi tidak terkekang. Bagi menguji kesan kecondongan dinding andas pula, sudut kecondongan dinding diubah daripada 0° sehingga 60° . Perbezaan tekanan yang dirasakan dan tegasan yang dijana pada sampel dibandingkan.

Sementara itu, kesan penjajaran andas dilihat dalam peringkat pembebanan kilas. Pembebanan kilas melibatkan anjakan untuk beban mampatan pada paksi-z dan anjakan putaran pada satah x dan y . Oleh itu, simulasi dilakukan menggunakan model tiga dimensi kerana tiada paksi yang boleh diabaikan. Anjakan selari antara andas atas dan bawah merupakan pengukuran penjajaran andas dalam HPT (Huang, Kawasaki & Langdon 2016). Dalam Persamaan 3.19, paksi putaran yang melalui titik asalan (x_0, y_0) dipertimbangkan untuk keadaan penjajaran sempurna. Sebaliknya dalam keadaan ketidakjajaran, paksi putaran teranjak sebanyak α , iaitu α didefinisikan sebagai Persamaan 3.63.

$$\alpha = \sqrt{x_\alpha^2 + y_\alpha^2} \quad (3.63)$$

yang mana (x_α, y_α) adalah koordinat yang dilalui oleh paksi putaran yang teranjak pada satah $x - y$. Dengan mengambil kira paksi putaran yang teranjak ke koordinat (x_α, y_α) ini, Persamaan 3.19 menjadi Persamaan 3.64.

$$r = \sqrt{(x - x_\alpha)^2 + (y - y_\alpha)^2} \quad (3.64)$$

Taburan aliran tegasan yang terjana hasil kepelbagaian parameter ini seterusnya dibincangkan. Analisis ini amat berguna bagi melengkapkan pemahaman fenomena aliran bahan semasa pembentukan HPT secara keseluruhan.

3.6 RUMUSAN MOTODOLOGI KAJIAN

Secara keseluruhannya, kajian ini meliputi ketiga-tiga pendekatan iaitu uji kaji, analitikal dan simulasi. Kajian dimulai dengan satu siri uji kaji HPT bagi meningkatkan sifat mekanikal dan mikrostruktur AA2024 berdiameter 30 mm, seperti yang diperincikan dalam bahagian 3.2. Kemudian dalam bahagian 3.3, model analitikal evolusi penguatan bahan berdasarkan evolusi sifat mekanikal telah diterbitkan. Bagi mereplikasikan fenomena aliran tegasan semasa pembebanan, proses HPT yang kompleks diungkapkan menjadi model kontinum yang mengambil kira kelakuan elastoplastik bahan. Kesemua elemen model simulasi ditakrifkan dengan teliti merangkumi geometri, bahan, pembebanan dan keadaan sempadan berasaskan uji kaji HPT sebenar. Seterusnya dalam bahagian 3.4, diterangkan kaedah penentusahan model simulasi berangka yang dicadangkan menggunakan model analitikal yang dibangunkan. Akhirnya dalam bahagian 3.5, aliran tegasan diramal melalui analisis berparameter melibatkan dimensi sampel dan konfigurasi andas. Pemboleh ubah ini dipertimbangkan atas faktor pengaruh langsungnya terhadap terikan efektif yang mempengaruhi proses penguatan.

Perbandingan kaedah kajian ini dengan kajian terdahulu diringkaskan dalam Jadual 3.3. Umumnya, perbezaan utama adalah terdiri daripada aspek pembesaran sampel, model kelakuan penguatan dan pendekatan yang digunakan untuk analisis berparameter. Kelebihan dan manfaat yang diperoleh daripada kaedah kajian yang dirangka turut dijelaskan dalam jadual tersebut. Kajian ini dilaksanakan berdasarkan kaedah yang dibentangkan, dan keputusan beserta perbincangan dapatan dibentangkan dalam bab seterusnya.

Jadual 3.3 Perbandingan kaedah kajian ini dengan kajian terdahulu.

Bil.	Kajian ini	Kajian terdahulu	Kelebihan
1	Pembesaran sampel HPT AA2024 berdiameter 30 mm.	Pembentukan sampel HPT AA2024 berdiameter 10 mm hingga 15 mm.	Menyokong usaha pembesaran skala sampel bahan ringan kekuatan tinggi.
2	Pembangunan model kelakuan penguatan dalam fungsi kekerasan	Model makro mekanik dengan pengesahan pada julat terikan tertentu dan model mikro mekanik yang melibatkan ketelitian dan prosedur yang kompleks, sekaligus memakan masa dan isu konsistensi penilaian antara individu.	Model ini hanya memerlukan data kekerasan dan data kekerasan ini adalah mudah dicapai kerana ujian kekerasan adalah sejenis ujian tanpa musnah yang tidak memerlukan penyediaan spesimen dan prosedurnya lebih ringkas berbanding pendekatan mikto mekanik. Model ini ditentukan dalam kajian ini menggunakan data uji kaji HPT AA2024.
3	Analisis berparameter melalui model simulasi berangka yang ditentukan	Kebanyakan kajian HPT menjalankan analisis berparameter menggunakan pendekatan uji kaji. Manakala bilangan kajian simulasi HPT adalah terhad dan sebilangan besar daripadanya tidak melaporkan formulasi model simulasi dengan jelas.	Kawalan ubah bentuk lebih mudah berbanding uji cuba melalui uji kaji yang melibatkan kos yang tinggi. Formulasi model simulasi juga diperincikan bagi memudahkan replikasi kajian.

BAB IV

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1 PENGENALAN

Bab ini membentangkan hasil analisis kajian mengikut objektif utama yang digariskan dalam Bab I. Dapatan kajian dimulai dengan hasil penambahbaikan ciri sampel terproses HPT yang memenuhi objektif 1. Kedua, model analitikal kelakuan penguatan semasa proses HPT dibentangkan, memenuhi objektif 2 kajian. Model simulasi berangka juga dibangunkan bagi melengkapkan dapatan uji kaji. Model simulasi ini kemudiannya ditentusahkan menggunakan model analitikal yang dibangunkan, iaitu merujuk kepada pencapaian objektif 3. Di akhir bab ini, kawalan ubah bentuk melalui ramalan aliran tegasan terhadap kepelbagaian dimensi sampel dan konfigurasi andas dikupas, selaras dengan objektif 4 kajian. Perbincangan lanjut berkenaan dapatan kajian tersebut dihuraikan dalam bahagian seterusnya.

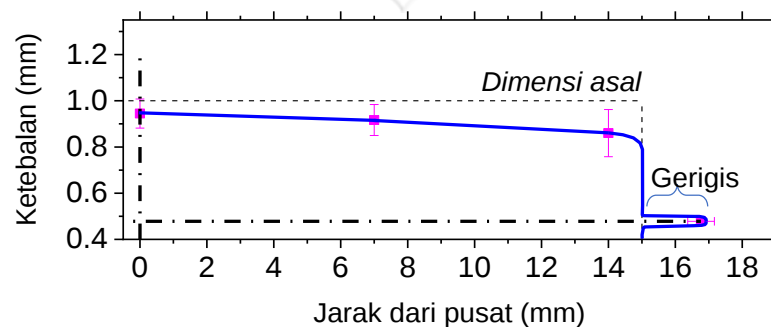
4.2 PENCIRIAN AA2024 TERPROSES HPT

Dalam kajian ini, bahan ringan aloi aluminium AA2024 ditingkatkan sifatnya melalui proses pembentukan HPT. Sifat mekanikal dan mikrostruktur AA2024 yang telah diproses HPT ini diukur bagi menentukan pencapaian sifat bahan hasil ubah bentuk tersebut. Analisis ini melibatkan pengukuran fizikal, kekerasan, kekuatan dan mikrostruktur melalui analisis XRD. Perincian bagi setiap pengukuran tersebut dihuraikan seperti berikut.

4.2.1 Fizikal

Rajah 4.1 menunjukkan dimensi sampel AA2024 selepas HPT. Ketebalan sampel diukur pada tiga kedudukan iaitu ~ 0 mm, ~ 7 mm dan ~ 14 mm dari pusat cakera. Setiap kedudukan diambil empat bacaan pada kedudukan arah jejarian berbeza dan purata serta sisihan piawai bagi semua bilangan putaran diambil kira. Lebar gerigis pula diukur berdasarkan diameter sampel, juga dengan mengambil kira nilai purata bagi empat arah jejarian pada semua bilangan putaran.

Hasilnya, didapati ketebalan sampel berkurang daripada pusat ke arah pinggir cakera, antara 0.04 mm hingga 0.22 mm. Julat pengurangan ketebalan yang disebabkan oleh daya paksian ini turut dilaporkan dalam kajian terdahulu (Cepeda-Jiménez et al. 2017, Mohamed et al. 2017), yang juga menggunakan konfigurasi andas kuasi terkekang. Dalam konfigurasi tidak terkekang, pengurangan ketebalan berlaku secara berterusan dengan peningkatan terikan (Zhilyaev & Langdon 2008). Sebaliknya, walaupun berlaku penipisan sampel dengan penggunaan konfigurasi andas kuasi terkekang, ketebalan sampel akhir masih dapat dikawal. Di sini, parameter jurang aliran bebas yang menentukan amaun aliran keluar bahan yang dibenarkan memainkan peranan. Di samping mengawal ketebalan sampel, pengaruh jurang aliran bebas terhadap tekanan balikan turut dibincangkan dalam seksyen 4.5.2a.



Rajah 4.1 Perubahan ketebalan sepanjang arah jejarian dan diameter gerigis yang terbentuk selepas proses HPT berbanding keadaan tanpa pembebanan.

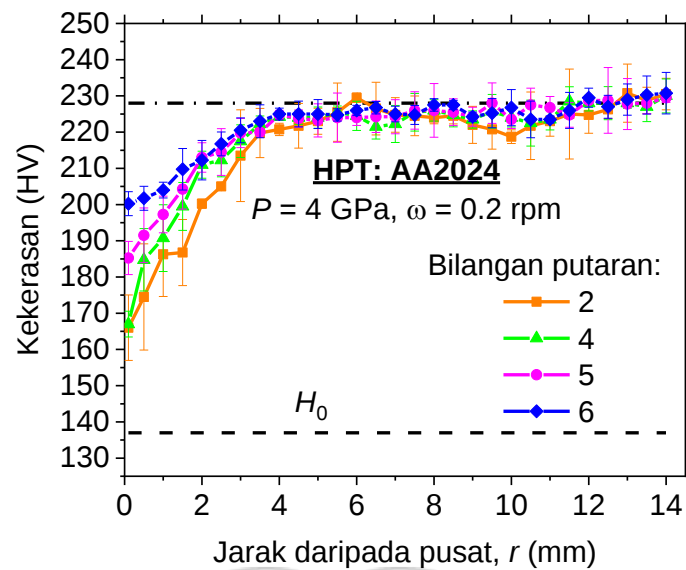
Konfigurasi kuasi terkekang adalah konfigurasi terbaik yang diperkenalkan sehingga kini kerana lebih menghampiri konfigurasi HPT terkekang penuh. Ubah bentuk ideal dalam konfigurasi terkekang penuh yang disumbangkan oleh daya kilas di bawah tekanan hidrostatik tanpa mengubah geometri asal sampel adalah diharapkan dalam pembentukan HPT. Namun keadaan ideal ini sukar dicapai kerana ketepatan perkakasan menjadi cabaran dan pengendalian pembentukan lebih sukar (Pippan et al. 2008). Kesan geseran yang terbentuk hasil ketaklinearan geometri akibat terikan ricih ini memerlukan sehingga dua kali ganda daya kilas (Figueiredo et al. 2011).

Dalam masa yang sama, pengurangan ketebalan dengan peningkatan terikan ricih melalui penambahan bilangan putaran ini disertai dengan pelebaran gerigis pada pinggir cakera. Ubah bentuk ini mendemonstrasikan sifat AA2024 yang hampir tidak boleh dimampatkan dengan ciri nisbah Poisson positif. Pembentukan gerigis adalah semakin lebar dengan pengaplikasian terikan ricih dan tekanan yang lebih tinggi (Song et al. 2011). Pembentukan gerigis ini membantu menghalang sentuhan terus antara andas yang boleh merosakkan andas. Dalam masa yang sama, gerigis yang terbentuk juga menghasilkan geseran tambahan. Namun begitu, pengaruh geseran pada kawasan pembentukan gerigis memberi kesan yang kecil terhadap taburan terikan efektif semasa pembentukan HPT (Figueiredo et al. 2011).

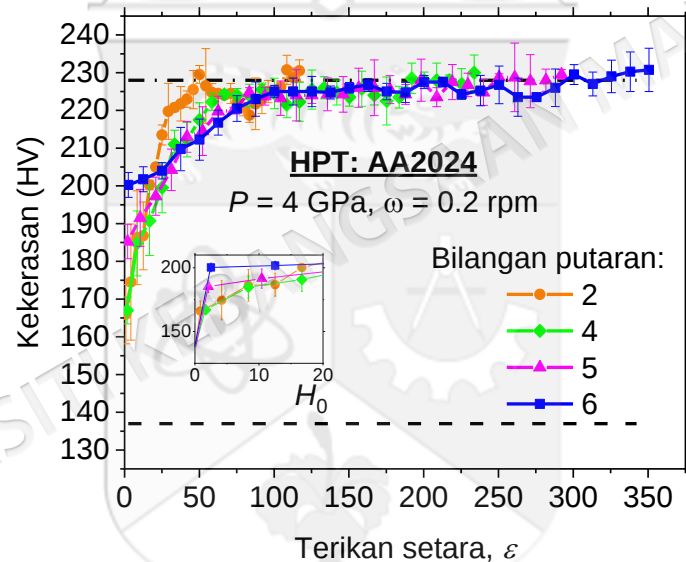
4.2.2 Kekerasan

Taburan kekerasan sepanjang jejari sampel bagi sampel AA2024 yang diproses sehingga 6 putaran ditunjukkan dalam Rajah 4.2(a). Taburan kekerasan untuk bilangan putaran 1, 3 dan 4 tidak ditunjukkan kerana kebanyakan data bertindih dengan data yang dipaparkan. Nilai kekerasan awal bagi sampel AA2024 sebelum diproses HPT yang telah dirawat haba ditunjukkan sebagai H_0 (137 Hv) dengan garisan putus-putus.

Dapat diperhatikan bahawa kekerasan di pusat cakera adalah lebih rendah berbanding pinggir cakera pada semua parameter pemprosesan. Contohnya pada $N = 2$, kekerasan pada $r = 2$ mm (jejari dalaman) adalah 200.25 Hv, berbanding $r = 14$ mm (jejari luaran) iaitu 230.5 Hv. Keadaan ini jelas menunjukkan bahawa



(a)



(b)

Rajah 4.2 Plot kekerasan melawan (a) jarak dari pusat cakera, (b) terikan setara HPT bagi sampel HPT AA2024 yang dikenakan bilangan putaran berbeza.

semakin menjauhi pusat cakera, kekerasan sampel semakin meningkat. Keputusan ini adalah dijangka kerana proses HPT mengenakan terikan kilas yang lebih tinggi di bahagian pinggir cakera, lalu menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi.

Apabila bilangan putaran HPT ditingkatkan daripada 1 sehingga 6 putaran, kekerasan sepanjang jejari sampel turut meningkat. Kekerasan pada pinggir cakera

sentiasa lebih tinggi berbanding pusat. Sisihan piawai kekerasan sepanjang jejari sampel juga semakin berkurang dengan peningkatan bilangan putaran menjelaskan peningkatan kehomogenan kekerasan. Evolusi peningkatan kekerasan ini berkait dengan perbezaan terikan yang dialami pada keseluruhan dimensi sampel. Dapatan ini disokong oleh teori uji kaji kilas asas seperti yang didefinisikan dalam Persamaan 2.2. Persamaan ini jelas mentakrifkan bahawa terikan setara berkadar terus dengan jejari dan bilangan putaran.

Namun begitu, teori ini tidak dibuktikan pada titik tengah sampel ($r = 0$ mm), yang mana secara teori sampel tidak mengalami sebarang terikan ricih pada paksi putaran. Sebaliknya, keputusan uji kaji menunjukkan berlaku peningkatan kekerasan pada titik tengah sampel walaupun nilainya lebih rendah berbanding jejari luaran. Patil et al. (2014) melaporkan bahawa peningkatan kekerasan pada pusat cakera hanya boleh diabaikan sehingga 0.75 putaran. Oleh kerana kajian ini mengenakan putaran yang lebih tinggi, dengan putaran minimum adalah 1, peningkatan kekerasan di pusat cakera ini adalah selari dengan laporan tersebut. Ketidakkajajaran paksi putaran antara andas atas dan bawah telah dicadangkan berkemungkinan menyumbang kepada pengenalan terikan ricih di pusat cakera (Edalati, Fujioka & Horita 2009; Shi et al. 2018). Faktor ini dibuktikan dalam bahagian 4.5 melalui simulasi aliran bahan.

Seterusnya, kekerasan juga diperhatikan cenderung untuk mencapai ketepuan pada 230 Hv. Contohnya, ketepuan kekerasan dicapai pada kedudukan 6 mm dan 4 mm daripada pusat cakera, masing-masingnya dengan bertambahnya bilangan putaran daripada 2 kepada 6. Corak ketepuan ini menunjukkan bahawa kehomogenan kekerasan sepanjang jejarian sampel dapat dicapai dengan meningkatkan bilangan putaran. Bagi menilai pencapaian ketepuan dalam pemprosesan HPT, evolusi kekerasan terhadap terikan ricih diperhatikan, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.2(b). Pemerhatian keseluruhan menunjukkan bahawa sampel HPT mempunyai kekerasan yang lebih tinggi berbanding H_0 . Pengerasan berlaku sebaik sahaja terikan dikenakan terhadap sampel yang diproses. Secara umumnya, sampel AA2024 tersebut mengalami tiga peringkat pengerasan yang ketara. Ia dimulai dengan peningkatan ciri yang mendadak pada julat terikan $\varepsilon < 10$. Kadar pengerasan tinggi yang sama turut dilaporkan dalam aloi aluminium yang lain seperti AA6061 (Mohamed et al. 2015)

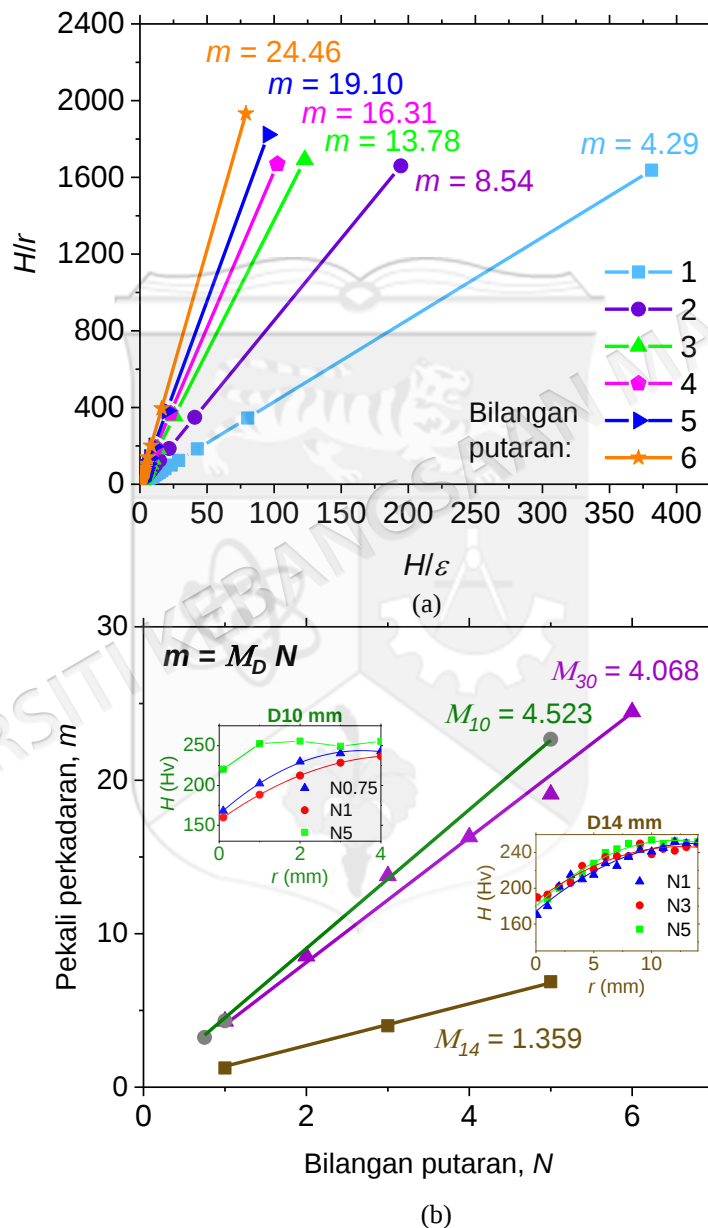
dan AA2618 (Mohamed et al. 2016). Kemudian, pengerasan meningkat pada kadar sederhana dan akhirnya mencapai fasa pengerasan sekata atau tepu pada $\varepsilon \sim 100$.

Proses HPT dengan 6 putaran mengenakan ubah bentuk plastik melampau kepada sampel yang diproses dengan jumlah terikan setara $\varepsilon \sim 380$. Hasilnya, kekerasan ditingkatkan kepada ~ 230 Hv. Namun begitu, pencapaian kekerasan ini adalah lebih rendah berbanding kekerasan yang dilaporkan oleh kajian terdahulu (250 Hv) yang memproses sampel dengan diameter yang lebih kecil. Faktor jurang aliran bebas yang lebih besar mungkin menyebabkan kekurangan ini. Faktor jurang aliran bebas ini juga akan dibincangkan dalam bahagian 4.5 melalui simulasi aliran bahan. Secara keseluruhan, sampel AA2024 mengalami peningkatan kekerasan antara 19.5% sehingga 68.4%. Walaupun pengerasan kerja sebegini adalah lazim diperhatikan pada aloi aluminium terproses HPT (Bazarnik et al. 2018; Khiavi & Emadoddin 2018), penguatan sampel yang bersaiz lebih besar dalam kajian ini iaitu berdiameter 30 mm adalah suatu pencapaian baru untuk AA2024.

Semua data kekerasan membentuk suatu lengkung dengan baik. Ini menunjukkan terikan adalah faktor utama dalam menentukan tahap kekerasan. Terdapat dua faktor yang menyebabkan fenomena ketepuan bahan pengerasan terikan HPT iaitu (i) ketepuan penghalusan mikrostruktur pada keseluruhan sampel (Almazrouee et al. 2015), atau (ii) timbal balik antara mekanisma pengerasan oleh pengecilan ira dan pelembutan oleh pemusnahan kehelan (Naghdy et al. 2016). Kelakuan kekerasan dengan peningkatan terikan sehingga suatu nilai ketepuan tanpa sebarang pemulihan yang ketara ini adalah konsisten dengan dapatan kajian yang dilaporkan dalam pelbagai bahan berasaskan aluminium (Omranpour et al. 2019, Khiavi & Emadoddin 2018, Bazarnik et al. 2016, Sabbaghianrad, Torbati-sarraf & Langdon 2018) dan juga aluminium tulen pada tahap ketulenan $\leq 99.5\%$ (Ito et al. 2017). Faktor yang menyumbang kepada peningkatan kekerasan aloi aluminium ini telah dibincangkan dalam seksyen 2.2.3.

Kadar pengerasan bagi AA2024 berdiameter 30 mm yang diproses HPT ini diukur dengan memplotkan graf H/r melawan H/ε seperti Rajah 4.3(a). Pada N yang lebih tinggi, peningkatan H pada setiap r adalah lebih tinggi berbanding peningkatan H dengan setiap ε yang dikenakan. Ini bermakna, semakin tinggi bilangan putaran N ,

pekali perkadaran pengerasan m antara H/r dan H/ε adalah semakin tinggi. Seterusnya, kenaikan m diplotkan melawan N . Hasilnya, hubungan m terhadap penambahan N adalah linear pada suatu kecerunan pengerasan M_D tertentu, yang dipanggil potensi pengerasan. Parameter yang diperkenalkan menentukan keupayaan pengerasan bagi sesebuah bahan semasa HPT dengan peningkatan bilangan putaran HPT.



Rajah 4.3 (a) Penentuan pekali perkadaran peningkatan H pada setiap r berbanding ε , (b) perbandingan kecerunan pengerasan bagi sampel AA2024 dengan diameter 10 mm (Alhamidi & Horita 2015), 14 mm (Vafaei et al. 2012) dan 30 mm (kajian ini).

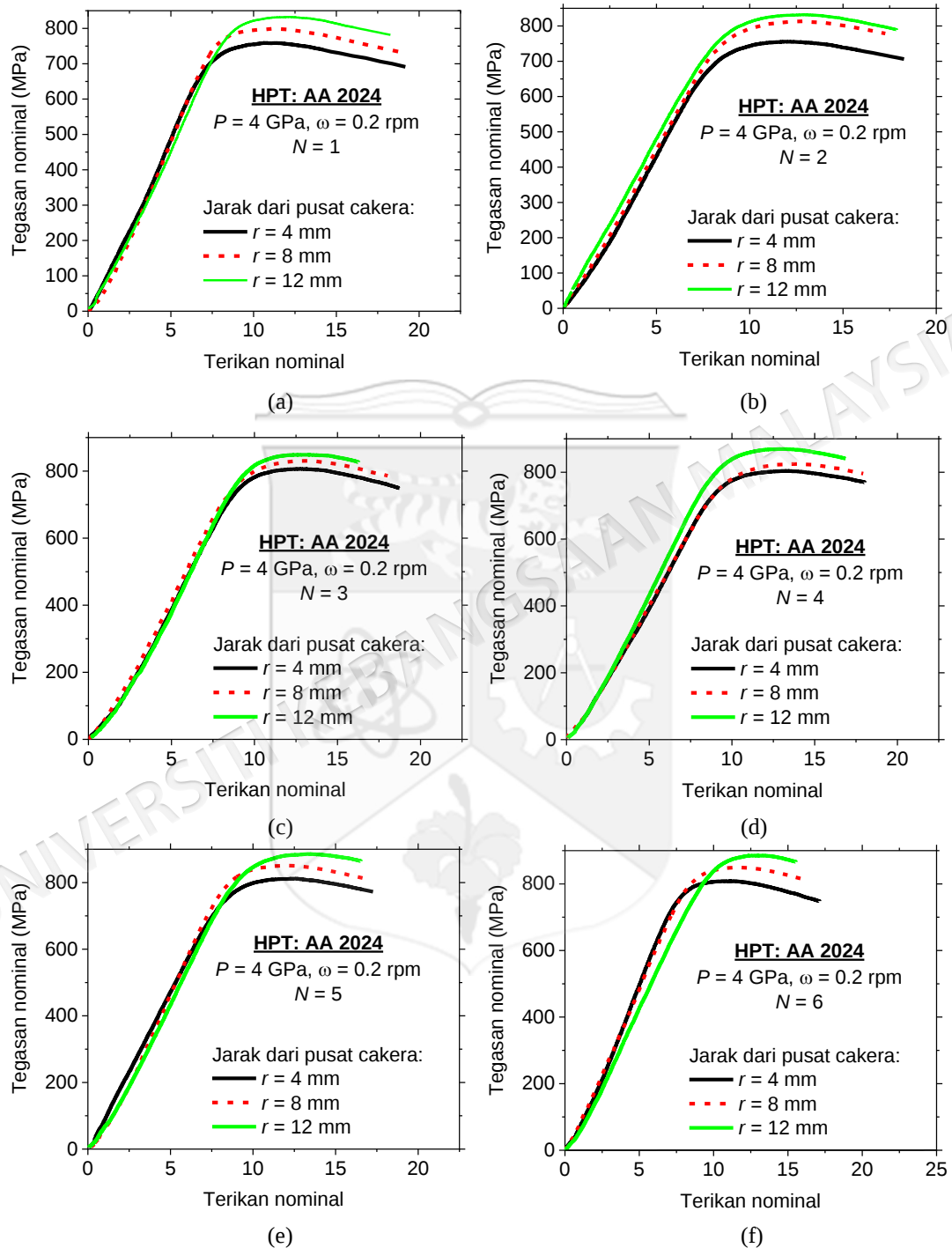
Perbandingan M_D bagi beberapa sampel AA2024 dengan diameter D berbeza ditunjukkan dalam Rajah 4.3(b). Parameter ini mewakili pencapaian ketepuan pengerasan sepanjang arah jejari. Nilai yang dilaporkan untuk setiap saiz sampel dibandingkan dengan corak taburan kekerasan pada bilangan putaran berbeza. Bahan yang mempunyai parameter M_D yang lebih tinggi menunjukkan perbezaan kadar pengerasan yang signifikan antara N yang berbeza. Dalam graf ini, hanya taburan kekerasan untuk $D = 10$ mm dan $D = 14$ mm ditunjukkan. Manakala taburan kekerasan untuk $D = 30$ mm telah ditunjukkan dalam Rajah 4.2(a).

Kecerunan pengerasan menghampiri nilai 1 menunjukkan bahawa pengubahsuaian N tidak lagi memberi kesan yang signifikan terhadap taburan kekerasan sepanjang jejari sampel. Dalam erti kata yang lain, ketepuan pengerasan dicapai, seperti yang ditunjukkan oleh sampel yang berdiameter $D = 14$ mm dengan $M_{14} = 1.359$. Dalam kes ini, pengubahsuaian parameter pemprosesan selain N dicadangkan bagi meningkatkan kekuatan. Sebaliknya, bagi M_D yang masih jauh daripada nilai 1, penambahan N membantu meningkatkan kehomogenan kekerasan sepanjang r sehingga mencapai ketepuan. Keadaan ini ditunjukkan oleh sampel yang berdiameter $D = 10$ mm dengan $M_{10} = 4.523$. Selain itu, M_D didapati tidak bergantung kepada diameter sampel. Perbezaan ini sebaliknya berkemungkinan disebabkan oleh variasi pada konfigurasi peralatan HPT kerana data berlainan diameter yang dibandingkan adalah daripada kumpulan penyelidik yang berbeza.

4.2.3 Kekuatan

Rajah 4.4 menunjukkan lengkung tegasan nominal melawan terikan nominal bagi sampel AA2024 terproses HPT yang melalui ujian tegangan dengan kadar terikan $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ pada suhu bilik. Ujian tegangan ini melibatkan kesemua sampel yang diproses pada bilangan putaran $N = 1$ sehingga $N = 6$. Hasilnya, kelakuan tegangan dengan peningkatan terikan diperoleh. Plot tegasan-terikan yang licin sebegini adalah lazim diperhatikan dalam bahan berstruktur kubik berpusat muka (FCC). Dapat diperhatikan bahawa kelakuan bahan dengan pembebanan tegangan bagi spesimen pada jejari dan bilangan putaran HPT tertentu dapat dibezakan. Secara umumnya,

modulus Young adalah konsisten sepanjang pembebanan manakala kekuatan alah, kekuatan tegangan dan terikan patah mengalami perubahan yang ketara.



Rajah 4.4 Kelakuan tegangan bagi sampel AA2024 terproses HPT dengan beberapa putaran: (a) $N = 1$, (b) $N = 2$, (c) $N = 3$, (d) $N = 4$, (e) $N = 5$ dan (f) $N = 6$ pada 4 mm, 8 mm dan 12 mm dari pusat cakera.

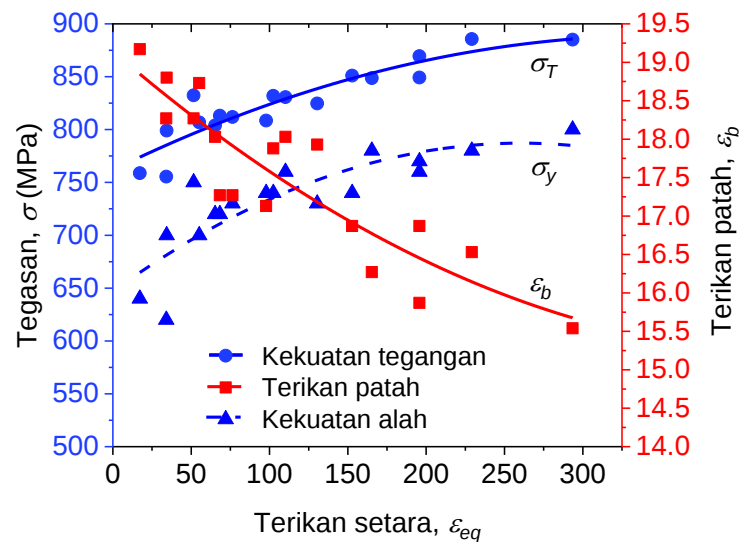
Berdasarkan lengkung tegasan-terikan, sifat mekanikal AA2024 ini ditentukan. Perubahan ciri makro mekanik yang dialami oleh AA2024 pada $r = 4$ mm, 8 mm dan 12 mm dengan peningkatan bilangan putaran HPT ini disenaraikan dalam Jadual 4.1. Dapat diperhatikan bahawa sampel pada kedudukan jejari yang lebih besar menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi. Perbezaan ini adalah selari dengan corak evolusi kekerasan yang diukur pada setiap 0.5 mm jejari sampel pada 8 arah jejari, yang lebih menyeluruh berbanding ujian tegangan ini. Keputusan ini membuktikan bahawa sifat kekuatan bagi AA2024 yang berdiameter 30 mm ini juga berjaya ditingkatkan melalui proses HPT.

Jadual 4.1 Ciri mekanikal sampel AA2024 terproses HPT yang diperolehi daripada ujian tegangan.

Jarak dari pusat (mm)	Kekuatan alah (MPa)			Kekuatan tegangan (MPa)			Terikan patah (%)		
	4	8	12	4	8	12	4	8	12
$N = 1$	640	700	750	758.7	799.0	832.3	16.67	16.4	16.07
$N = 2$	620	720	740	755.5	813.2	831.9	15.87	17.27	17.88
$N = 3$	700	760	780	806.8	830.7	848.7	18.73	18.03	16.27
$N = 4$	720	730	770	803.8	824.7	869.5	19.77	19.20	16.87
$N = 5$	730	740	780	811.9	851.1	885.7	16.60	17.80	18.27
$N = 6$	740	760	800	808.5	849.2	885.1	17.13	15.87	16.00

Selain itu, kekuatan bahan juga meningkat dengan penambahan bilangan putaran. Sebagai contoh, kekuatan tegangan sampel pada $N = 1$, $r = 4$ mm adalah 758.7 MPa. Walaupun hanya dengan 1 putaran, kekuatan tegangan ditingkatkan sebanyak 61.8% berbanding kekuatan tegangan awal ($\sigma_{T0} = 469$ MPa). Dengan pertambahan bilangan putaran kepada 3, berlaku penambahan kekuatan tegangan sebanyak 6.3% kepada $\sigma_T = 806.8$ MPa berbanding $N = 1$. Peningkatan kekuatan ini adalah berterusan dengan penambahan bilangan putaran sehingga kekuatan tegangan maksimum 885.1 MPa dicapai pada $N = 6$, $r = 12$ mm dengan peratus peningkatan sebanyak 88.7% daripada σ_{T0} .

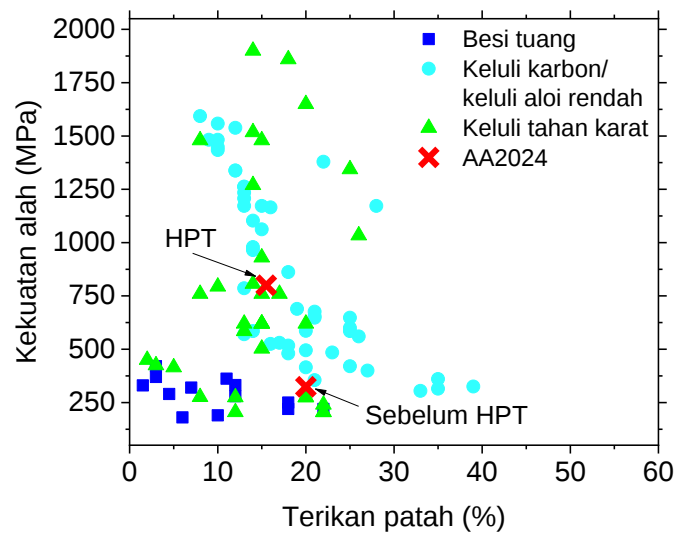
Bagi meneliti sifat tegangan ini dengan lebih jelas, Rajah 4.5 membandingkan evolusi sifat mekanikal AA2024 yang diproses HPT ini. Secara umumnya, corak evolusi kekuatan alah dan kekuatan tegangan adalah hampir sama, yang mana berlaku peningkatan pada kekuatan dengan peningkatan terikan setara. Satu lagi parameter



Rajah 4.5 Evolusi kekuatan alah σ_y , kekuatan tegangan σ_T dan terikan patah ϵ_b bagi sampel AA2024 terproses HPT.

penting yang dilihat mengalami perubahan dengan pemprosesan HPT ini adalah terikan patah, ϵ_b . Merujuk kepada sampel ujian tegangan pada kedudukan $r = 12$ mm, $\epsilon_b = 18.3$ pada $N = 1$. Dengan pertambahan bilangan putaran kepada $N = 5$, $\epsilon_b = 16.5$ dan kemuluran terus berkurang sehingga $\epsilon_b = 15.5$ pada $N = 6$. Walaupun kekuatan bahan meningkat dengan ketara, ciri kemuluran AA2024 berkurang dengan peningkatan terikan setara semasa ubah bentuk plastik melampau ini. Namun, terikan patah yang dicapai ini masih tinggi ($\sim 15.5\%$) untuk bahan logam.

Rajah 4.6 menunjukkan kekuatan tegangan dan pemanjangan AA2024 dalam kajian ini berbanding keluli dan besi tuang daripada komposisi yang berbeza, seperti yang disenaraikan dalam *Material Handbook* (Cardarelli, 2008). Bahan yang dibandingkan ini dikenalpasti berpotensi untuk digantikan dengan aloi aluminium dalam industri automotif, ke arah pengurangan jisim kenderaan (Fentahun & Savas 2018). Perbandingan kekuatan tegangan ini jelas menunjukkan pencapaian AA2024 yang diproses HPT melampaui keupayaan besi tuang dan menyamai kekuatan keluli. Ditambah pula, AA2024 sebagai keluarga aloi aluminium mempunyai kelebihan berbanding keluli kerana ketumpatannya yang hampir tiga kali ganda lebih rendah berbanding keluli.

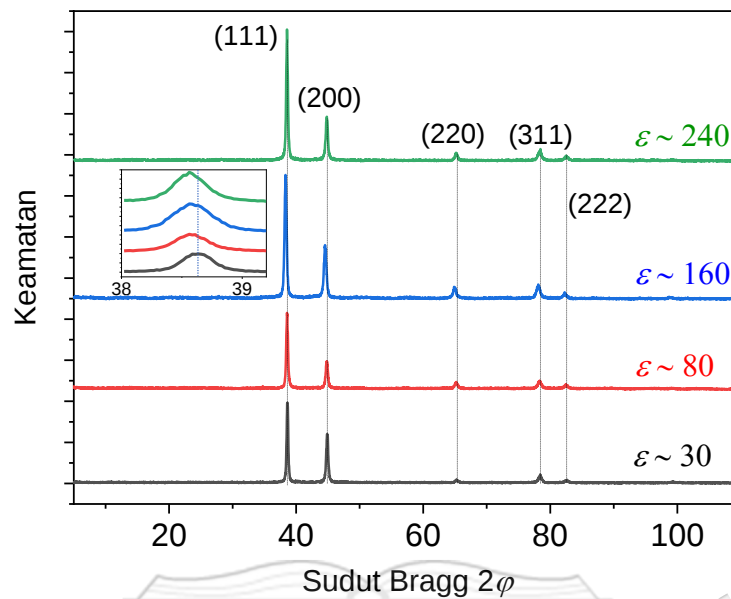


Rajah 4.6 Perbandingan kekuatan tegangan terhadap terikan patah bagi AA2024 yang diproses HPT (kajian ini) berbanding besi tuang, keluli karbon/keluli aloi rendah dan keluli tahan karat (Cardarelli, 2008).

4.2.4 Mikrostruktur

Evolusi penghabluran AA2024 selepas HPT diuji melalui analisis XRD melalui pembelaan sinar-X tuju oleh atom pada satahnya. Rajah 4.7 menunjukkan profil yang dijana melalui analisis XRD pada beberapa terikan HPT iaitu $\varepsilon \sim 30, \sim 80, \sim 160$ dan ~ 240 . Kedudukan spesimen XRD ditunjukkan dalam seksyen 3.2.2. Terikan $\varepsilon \sim 30$ adalah merujuk kepada kedudukan sampel berhampiran pusat cakera pada $N = 2$. Ia digunakan sebagai rujukan bagi mewakili terikan awal dalam pemprosesan HPT. Manakala $\varepsilon \sim 80, \sim 160$ dan ~ 240 dan masing-masingnya adalah merujuk kepada kedudukan sampel berhampiran pinggir cakera pada $N = 2, 4$ dan 6 .

Pengenalpastian fasa menunjukkan bahawa kesemua puncak profil XRD adalah sepadan dengan aluminium dan boleh diindeks pada satah hkl (111), (200), (220), (311) dan (222). Tiada penambahan pada puncak yang dibelaikan pada mana-mana sampel HPT, mengesahkan sampel AA2024 kekal berfasa tunggal selepas HPT. Oleh kerana kehadiran mendakan tidak dikesan, mekanisme pengerasan mendakan tidak dibuktikan dalam pemprosesan sampel HPT AA2024 berdiameter 30 mm ini.



Rajah 4.7 Profil XRD bagi spesimen HPT AA2024 pada: (a) $\varepsilon \sim 30$, (b) $\varepsilon \sim 80$, (c) $\varepsilon \sim 160$ dan (d) $\varepsilon \sim 240$.

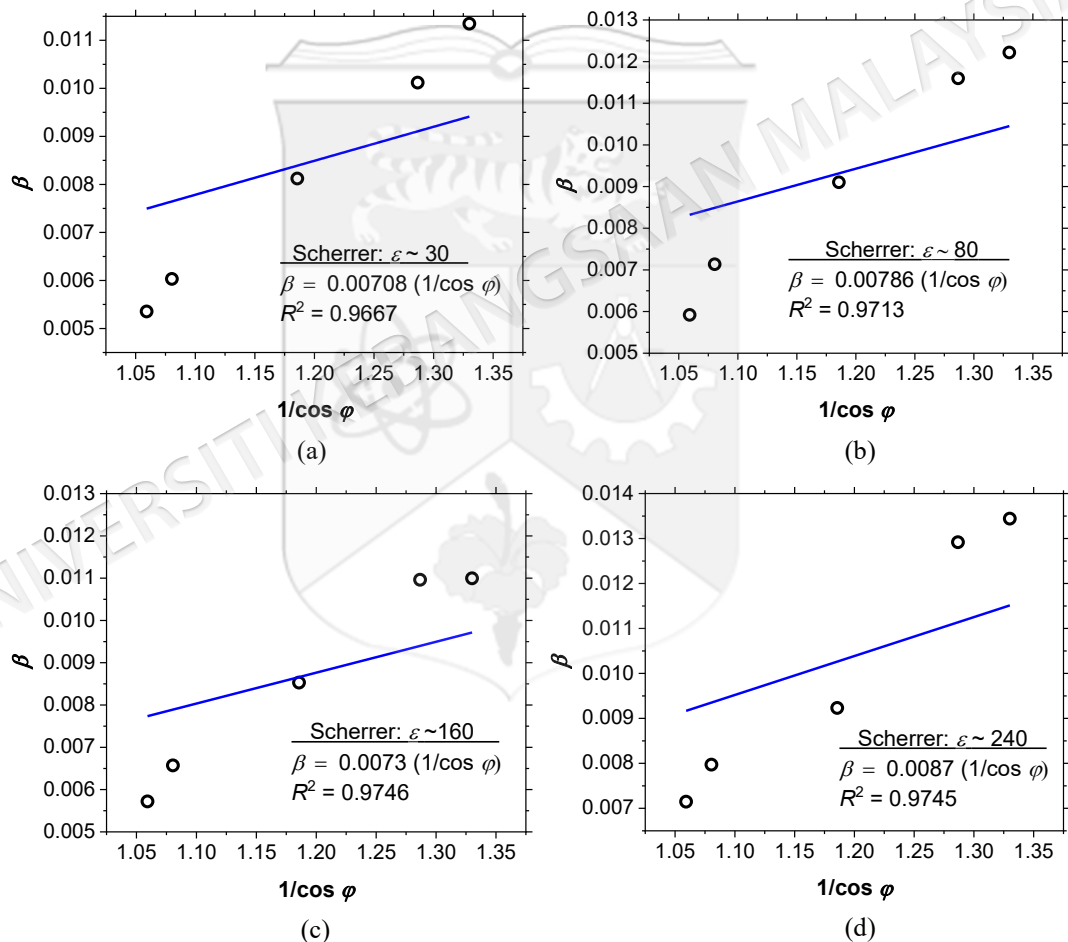
Mekanisma pengerasan mendakan lebih banyak dilaporkan dalam bahan HPT yang melalui proses penuaan lanjutan (Mohamed et al. 2017; Purcek et al. 2018).

Seterusnya, analisis pelebaran puncak profil XRD dilakukan bagi menilai kesan peningkatan terikan HPT terhadap ciri mikrostruktur sampel AA2024 iaitu saiz hablur dan terikan kekisi. Perbandingan dibuat menggunakan tiga kaedah iaitu Scherrer, Williamson-Hall dan Halder-Wagner. Persamaan Scherrer telah digunakan dalam analisis penentuan saiz hablur sebagai persamaan asas (Goyal et al. 2019; Irfan, Mohamed Racik & Anand 2018; Muniz et al. 2016). Dalam kaedah Scherrer, struktur hablur dianggap bebas daripada terikan kekisi. Oleh itu, pelebaran puncak adalah disebabkan oleh perubahan saiz hablur sahaja. Manakala kaedah Williamson-Hall dan Halder-Wagner mengambil kira terikan kekisi.

Rajah 4.8 menunjukkan lebar penuh pada separuh maksimum (FWHM) diplotkan melawan $1/\cos \varphi$ bagi setiap puncak keamatan XRD yang dikenalpasti. Berdasarkan Persamaan 3.2, saiz hablur $\bar{D}$ dianggarkan mengikut kaedah Scherrer seperti Persamaan 4.1.

$$\bar{D} = \frac{K\lambda}{(\text{kecerunan plot Scherrer})} \quad (4.1)$$

yang mana plot Scherrer ialah padanan punca kuasa terkecil yang memenuhi Persamaan 3.2. Hasilnya, nilai $\bar{D}$ masing-masingnya adalah 19.5 nm, 17.6 nm, 18.9 nm dan 15.9 nm bagi sampel pada terikan ~ 30 , 80, 160 dan 240. Walau bagaimanapun, didapati data terserak jauh daripada plot Scherrer yang secara teorinya memintas paksi-y pada titik asalan. Oleh itu, kaedah Scherrer didapati kurang tepat untuk menentukan saiz hablur bagi sampel yang dikaji.



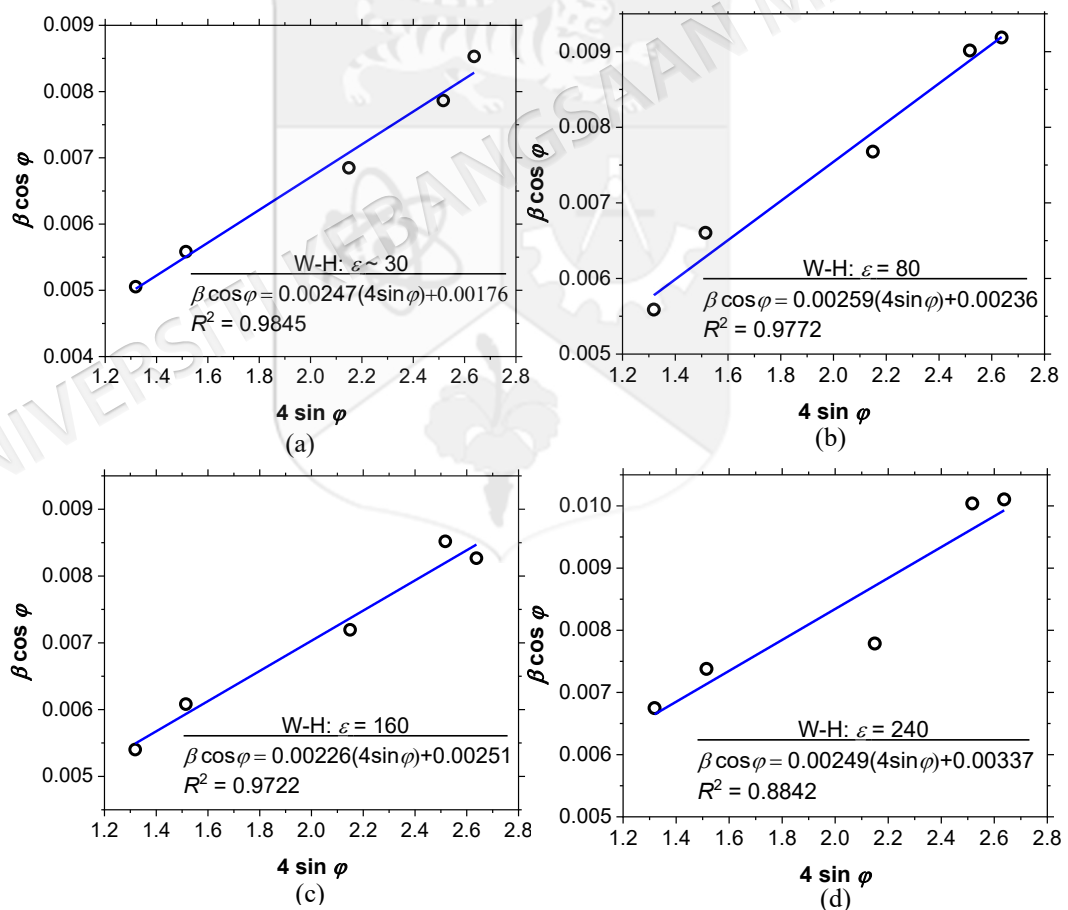
Rajah 4.8 Analisis pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Scherrer, pada (a) $\varepsilon \sim 30$, (b) $\varepsilon \sim 80$, (c) $\varepsilon \sim 160$ dan (d) $\varepsilon \sim 240$.

Dalam kaedah Williamson-Hall pula, pelebaran puncak disumbangkan oleh pengurangan saiz hablur $\bar{D}$ dan terikan kekisi $\bar{\varepsilon}$. Kaedah ini lebih digemari berbanding

kaedah yang lain dalam penentuan kesempurnaan hablur kerana kekonsistennannya dengan pengukuran fizikal melalui analisis TEM. Ketidaksempurnaan struktur hablur boleh memberi kesan terhadap ciri mikrostruktur dan magnetik bahan (Kumar et al. 2018). Berdasarkan Persamaan 3.4, $\beta \cos \varphi$ diplotkan melawan $4 \sin \varphi$, yang dipanggil plot Williamson-Hall. Padanan linear punca kuasa terkecil bagi plot Williamson-Hall ditunjukkan dalam Rajah 4.9. Saiz hablur dan terikan kekisi masing-masing ditentukan daripada kecerunan dan pintasan-y, seperti Persamaan 4.2 dan 4.3.

$$\bar{D} = \frac{K\lambda}{(\text{pintasan} - y \text{ Williamson-Hall})} \quad (4.2)$$

$$\bar{\epsilon} = (\text{kecerunan plot Williamson-Hall}) \quad (4.3)$$



Rajah 4.9 Analisis pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Williamson-Hall, pada (a) $\epsilon \sim 30$, (b) $\epsilon \sim 80$, (c) $\epsilon \sim 160$ dan (d) $\epsilon \sim 240$.

Didapati pelebaran puncak β yang lebih besar dicatatkan pada ε yang lebih tinggi. Apabila terikan HPT bertambah, saiz hablur mengecil daripada 77.0 nm pada awal pembebanan ($\varepsilon \sim 30$) sehingga 40.8 nm pada $\varepsilon \sim 240$. Oleh itu, pemprosesan HPT telah meningkatkan kekuatan AA2024 melalui mekanisma pengerasan sempadan ira yang dibuktikan oleh pengecilan saiz hablur. Saiz ira minimum yang boleh dicapai dalam HPT ditentukan oleh parameter fizikal seperti tenaga pengaktifan dan tenaga gagal tindanan (Mohamed & Dheda 2012). Melalui mekanisma penguatan sempadan ira, kehelan dijana, sub-ira terbentuk dan akhirnya pengerasan terikan berlaku disebabkan peningkatan tenaga terikan tersimpan melalui pengumpulan kehelan (Mohamed et al. 2017). Penghalusan ira merupakan mekanisma paling efektif dalam meningkatkan kekuatan bahan yang turut dilaporkan dalam bahan HPT yang lain (Mishra et al. 2015; Mohamed et al. 2015).

Seterusnya, analisis XRD menggunakan kaedah Williamson-Hall ini juga menunjukkan terikan kekisi pula berada antara 0.23% sehingga 0.26%. Nilai ini menjelaskan bahawa tiada perubahan terikan kekisi yang ketara dengan pembebanan HPT. Terikan mikro yang mempengaruhi pelebaran puncak adalah kesan ketidakseragaman hablur dan herotan. Perubahan terikan kekisi dianggap ketara apabila terdapat perbezaan bilangan digit pada peratusan terikan yang dilaporkan (Al-Tabbakh et al. 2019). Ini membuktikan bahawa terikan kilas semasa HPT tidak bertanggungjawab dalam menjana terikan kekisi dalam bahan yang diproses. Terikan kekisi yang sekata membantu penghalusan ira kerana kepelbagaian terikan kekisi antara ira yang bersebelahan mendorong migrasi sempadan ira pada suhu rendah (Ghosh, Renk & Pippan 2017), sekaligus berpotensi menghadkan penguatan.

Sebaliknya, proses pengaloiian AA2024 sebelum HPT berkemungkinan dalam menghasilkan terikan kekisi ini. Ini kerana terikan kekisi kesan pengaloiian dilaporkan berada antara julat 0.2% hingga 1% (Williams et al. 2020), didapati konsisten dengan nilai yang diperolehi untuk AA2024 ini. Penambahan elemen pengaloiian ke dalam logam tulen menyebabkan herotan setempat pada susunan atom kesan anjakan atom perumah pada struktur kekisi daripada kedudukan asalnya. Terikan kekisi yang terhasil daripada herotan menghalang gelinciran kehelan dan seterusnya meningkatkan kekuatan. Prinsip ini diguna pakai dalam penghasilan aloi entropi tinggi (Owen et al. 2017).

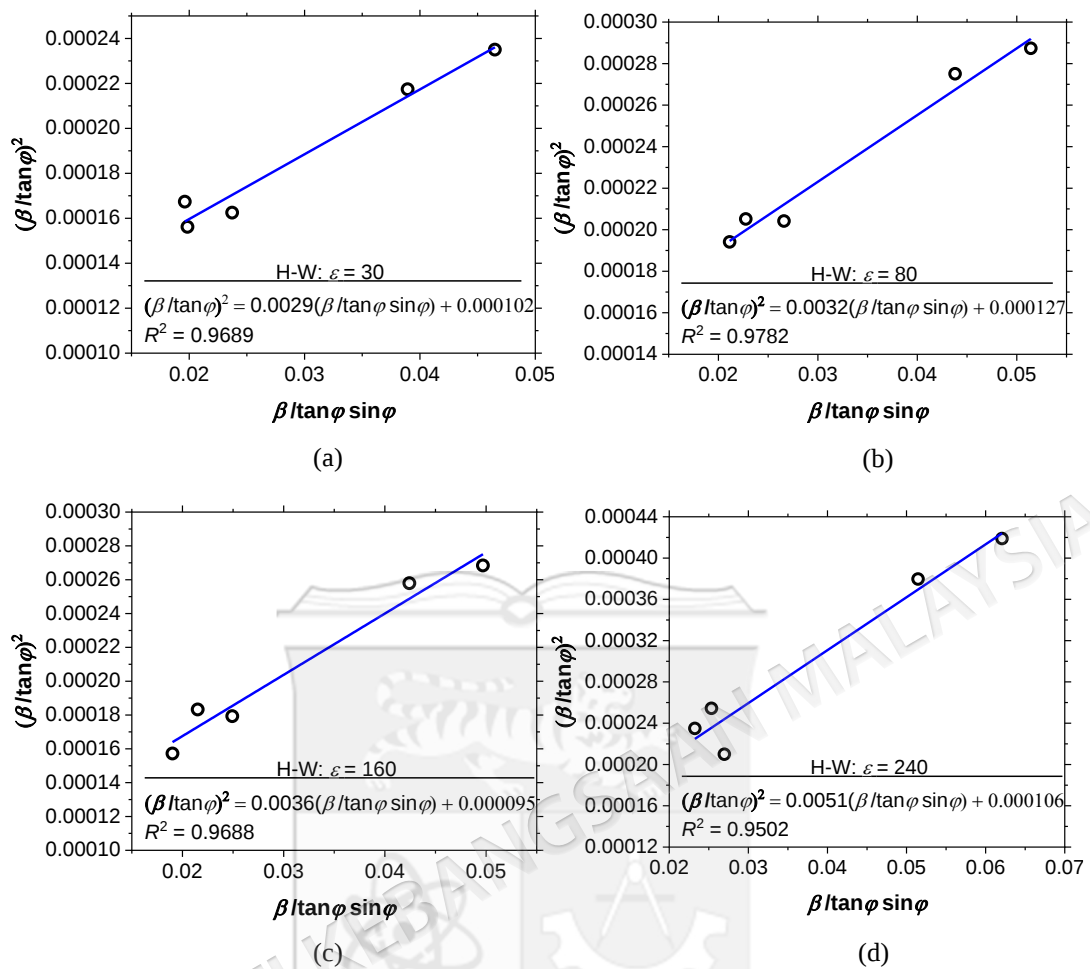
Selain itu, didapati taburan data menghampiri korelasi linear sempurna bagi semua plot Williamson-Hall. Sekiranya taburan terserak jauh daripada garis lurus, bahan dikatakan mempunyai sifat anisotropik (Simm 2018). Secara tidak langsung, corak taburan linear yang diperolehi ini membuktikan sampel HPT AA2024 adalah bersifat isotropik. Peningkatan terikan yang berterusan semasa HPT telah dibuktikan menghasilkan ira yang sama dimensi (*equiaxed*) dan homogen (Li et al. 2020).

Dalam Rajah 4.7, puncak pertama dengan keamatan tertinggi antara julat sudut Bragg 2φ , 38° dan 39° diperbesarkan bagi memaparkan anjakan puncak dengan peningkatan terikan HPT. Anjakan puncak yang sama menggambarkan kehadiran terikan kekisi yang konsisten sepanjang pemprosesan HPT. Walau bagaimanapun, pekali penentuan R^2 bagi plot Williamson-Hall yang dinyatakan dalam Rajah 4.9 adalah 0.9845, menghampiri hubungan linear sempurna pada $\varepsilon \sim 30$ dan berkurangan dengan peningkatan terikan HPT sehingga 0.8842 pada $\varepsilon \sim 240$. Serakan puncak yang semakin besar ini menjelaskan bahawa terdapat sedikit pengurangan pada sifat isotropik bahan dengan peningkatan terikan semasa HPT.

Seperti kaedah Williamson-Hall, kaedah Halder-Wagner juga mengambilkira saiz hablur dan terikan kekisi dalam analisis pelebaran puncak XRD. Rajah 4.10 menunjukkan plot $(\beta/\tan \varphi)^2$ melawan $\beta/\tan \varphi \sin \varphi$ mengikut kaedah Halder-Wagner. Hasilnya taburan data didapati berada menghampiri suatu garis lurus bagi semua plot Halder-Wagner, dengan $R^2 > 0.95$. Berdasarkan padanan kuasa dua terkecil hubungan Halder-Wagner daripada Persamaan 3.5, saiz hablur $\bar{D}$ dan terikan kekisi $\bar{\varepsilon}$ ditentukan seperti Persamaan 4.4 dan 4.5.

$$\bar{D} = \frac{K\lambda}{(\text{kecerunan plot Halder-Wagner})} \quad (4.4)$$

$$\bar{D} = \frac{\sqrt{(\text{pintasan} - y \text{ plot Halder-Wagner})}}{4} \quad (4.5)$$



Rajah 4.10 Analisis pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Halder-Wagner, pada (a) $\epsilon \sim 30$, (b) $\epsilon \sim 80$, (c) $\epsilon \sim 160$ dan (d) $\epsilon \sim 240$.

Saiz hablur dan terikan kekisi yang ditentukan daripada kaedah Scherrer, Williamson-Hall dan Halder-Wagner disenaraikan dalam Jadual 4.2. Ketiga-tiga kaedah membuktikan bahawa saiz hablur mengecil sehingga 27.2 nm dengan peningkatan terikan HPT. Secara umumnya, saiz yang dianggarkan melalui analisis XRD adalah lebih kecil berbanding penelitian imej bidang gelap TEM untuk bahan polihablur. Ini kerana XRD mengukur saiz hablur manakala TEM menilai saiz ira. Justeru, perbezaan ini adalah dijangka kerana XRD memberikan informasi yang lebih berbanding TEM kerana ia adalah sensitif kepada kawasan penyerakan koheren seperti subira dan ira (Straumal et al. 2017). Walaupun saiz hablur bahan HPT yang dianggarkan daripada analisis XRD adalah lebih kecil (>3 kali ganda) berbanding saiz

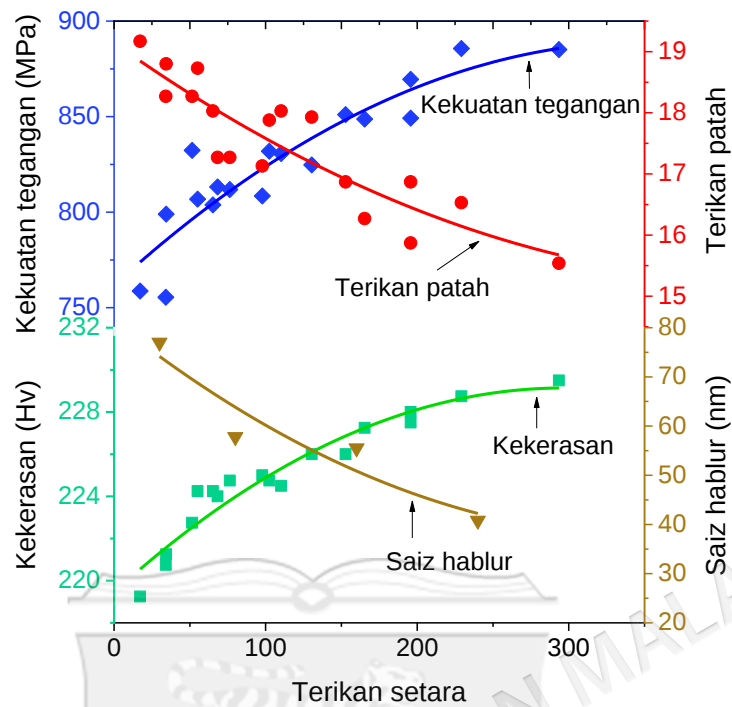
ira yang ditentukan daripada penelitian TEM, tetapi corak evolusinya adalah konsisten (Chen et al. 2016; Straumal et al. 2017; Sun et al. 2018). Oleh yang demikian, dapatan ini menjelaskan mekanisma penghalusan ira dalam pembentukan AA2024 melalui HPT ini. Pengecilan saiz ira merupakan faktor utama peningkatan sifat mekanikal dan tindak balas mekanikal yang lebih baik bagi bahan SPD (Zhang et al. 2018). Selain itu, saiz ira yang kecil juga menghasilkan kekonduksian terma yang lebih rendah (Masuda et al. 2018).

Jadual 4.2 Saiz hablur dan terikan kekisi yang ditentukan daripada kaedah Scherrer, Williamson-Hall dan Halder-Wagner.

Ciri	Kaedah	Terikan HPT			
		~30	~80	~160	~240
Saiz hablur (nm)	Scherrer	19.8	17.6	18.9	15.9
	Williamson-Hall	77.0	57.8	55.5	40.8
	Halder-Wagner	57.8	43.3	38.5	27.2
Terikan kekisi (%)	Williamson-Hall	0.26	0.26	0.23	0.25
	Halder-Wagner	0.25	0.28	0.24	0.26

Model yang paling sesuai kemudiannya ditentukan berdasarkan padanan linear dengan data eksperimen yang terbaik (Mote, Purushotham & Dole 2012). Perbandingan mendapati julat saiz hablur yang ditentukan melalui kaedah Williamson-Hall dan Halder-Wagner adalah lebih konsisten kerana menghasilkan korelasi serakan data linear yang lebih baik berbanding Scherrer. Saiz hablur yang lebih tinggi pada bahagian pinggir cakera dan pada terikan yang lebih tinggi ini adalah konsisten dengan corak evolusi peningkatan kekuatan dan kekerasan. Dapatan ini membuktikan ubah bentuk HPT ini adalah mematuhi hubungan Hall-Petch. Dapatan ini juga menjelaskan faktor terikan kekisi perlu diambil kira dalam penentuan saiz hablur bahan HPT AA2024 melalui analisis XRD. Walaupun begitu, HPT dibuktikan mengekalkan terikan kekisi pada julat 0.23% - 0.28%, sekaligus membuktikan terikan kekisi tidak mempengaruhi pelebaran puncak dan kelakuan AA2024 yang diproses HPT.

Rajah 4.11 menunjukkan rangkuman perubahan sifat AA2024 semasa proses HPT. Apabila terikan setara ditingkatkan, kekuatan tegangan dan kekerasan meningkat. Terikan tinggi daripada beban kilas menghasilkan tenaga yang mencukupi untuk



Rajah 4.11 Perbandingan evolusi ciri mekanikal dan mikrostruktur sampel terposes HPT.

menghaluskan ira dan meningkatkan isipadu sempadan ira. Sempadan ira berfungsi sebagai halangan terhadap pergerakan kehelan disebabkan orientasi antara ira yang berbeza. Oleh kerana pergerakan kehelan hanya dibenarkan sepanjang satah gelincir dalam sesebuah ira, jarak pergerakan kehelan adalah lebih pendek, sekaligus meningkatkan kekerasan dan kekuatan tegangan. Walaupun peningkatan ini disertai dengan pengurangan ciri kemuluran, terikan patah bahan ini masih berada dalam julat yang boleh diterima untuk bahan logam. Tambahan pula, sifat superplastik boleh dicapai oleh kebanyakan bahan logam HPT apabila ubah bentuk dilakukan pada suhu tinggi (Figueiredo & Langdon 2019). Dengan ini disimpulkan bahawa kajian ini berjaya meningkatkan ciri mekanikal dan mikrostruktur AA2024 dengan diameter 30 mm. Ia merupakan pencapaian penting dalam usaha peningkatan skala sampel HPT bagi memperluaskan potensi aplikasinya.

Dalam bahagian ini, peningkatan sifat mekanikal dan mikrostruktur AA2024 telah dibuktikan. Berdasarkan dapatan tersebut, kelakuan penguatan AA2024 dimodelkan dalam bahagian seterusnya.

4.3 PERMODELAN EVOLUSI SIFAT MEKANIKAL SEMASA PROSES HPT

Permodelan kelakuan pengerasan semasa proses HPT dibangunkan mengikut corak taburan kekerasan dengan penambahan bilangan putaran. Untuk itu, pemalar bahan iaitu C, d dan F dan g diperkenalkan sebagai indikator kelakuan pengerasan. Seterusnya, kelakuan penguatan yang terhasil daripada tindakan ubah bentuk pemprosesan HPT ini juga diformulasikan berdasarkan integrasi antara kecerunan evolusi kekuatan dan kekerasan bahan. Model kelakuan pengerasan dan penguatan ini diterangkan dalam seksyen berikut.

4.3.1 Model Empirik Evolusi Kekerasan HPT

Proses HPT melibatkan pengubahsuaian beberapa parameter pemprosesan termasuk terikan ε , tekanan P (Khiavi & Emadoddin 2018), kadar putaran ω (Cepeda-Jiménez et al. 2014), suhu T (Han et al. 2016) dan kadar terikan $\dot{\varepsilon}$ (Shahmir et al. 2018). Antara pembolehubah-pembolehubah ini, ε yang juga boleh diwakili oleh bilangan putaran N , dikenalpasti paling mempengaruhi pengerasan (Sun et al., 2018). Dalam seksyen 4.2.2 juga, kekerasan H didapati meningkat dengan peningkatan bilangan putaran N dan terikan dikenalpasti sebagai faktor utama dalam menentukan tahap kekerasan. Pembebanan HPT meningkatkan kekerasan daripada H_0 kepada H_i sebanyak ΔH melalui suatu fungsi pengerasan yang bergantung kepada N , $H(N)$, seperti Persamaan 4.6.

$$H_i = H_0 + \Delta H \quad (4.6)$$

yang mana $\Delta H = H(N)$. Evolusi H dengan penambahan N ini adalah mengikut suatu fungsi kuasa jenis Ludwik, maka $\Delta H = \bar{A}N^b$. N juga boleh diungkapkan dalam fungsi θ , iaitu $N = \theta/2\pi$.

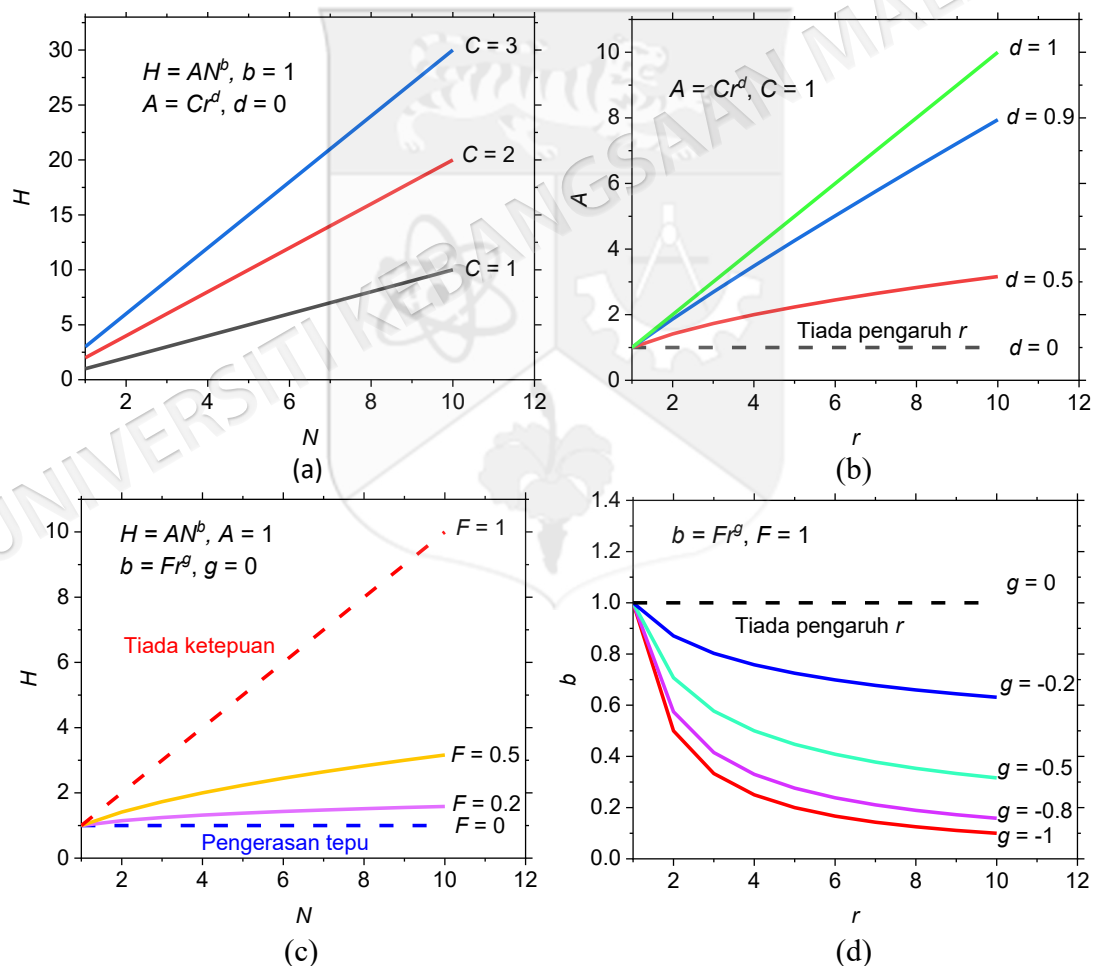
Selain N , peningkatan H juga adalah bergantung kepada jarak daripada pusat cakera r . Ini kerana terikan kilas dikenakan terhadap suatu paksi putaran yang melalui

pusat cakera. Dengan mempertimbangkan variasi kekerasan dalam arah jejarian, fungsi pengerasan seterusnya dikembangkan dalam sebutan r , seperti Persamaan 4.7.

$$H_i = H_0 + \bar{A}(r)N^{b(r)} \quad (4.7)$$

yang mana $\bar{A} = Cr^d$ dan $b = Fr^g$ adalah pemalar bahan, C ialah pekali kekerasan, d ialah kuasa pengerasan, F ialah pekali ketepuan dan g ialah kuasa ketepuan. Berdasarkan Persamaan 4.7 ini, kekerasan pada kedudukan r dan N tertentu dapat dianggarkan.

Rajah 4.12 menunjukkan pemalar bahan yang diperkenalkan dalam kajian ini. Pemalar bahan ini boleh menerangkan pencirian pengerasan bahan secara umum. Makna



Rajah 4.12 Pencirian umum kelakuan pengerasan melalui pemalar bahan: (a) C , (b) d , (c) F dan (d) g .

fizikal bagi setiap pemalar bahan yang diperkenalkan ini adalah seperti berikut. Magnitud pengerasan ditentukan oleh C , dengan syarat $C > 0$ bagi mewakili kelakuan pengerasan. Pemalar d pula mewakili kebergantungan kekerasan terhadap jarak daripada pusat, yang mana $0 > d \geq 1$. Apabila $d \rightarrow 0$, H tidak berubah dengan jarak daripada pusat iaitu tiada kebergantungan jumlah pengerasan terhadap jejarian. Sekiranya $d \rightarrow 1$, variasi H sepanjang jejari sampel adalah sangat ketara iaitu kekerasan dikatakan mempunyai kebergantungan terhadap jejarian yang tinggi.

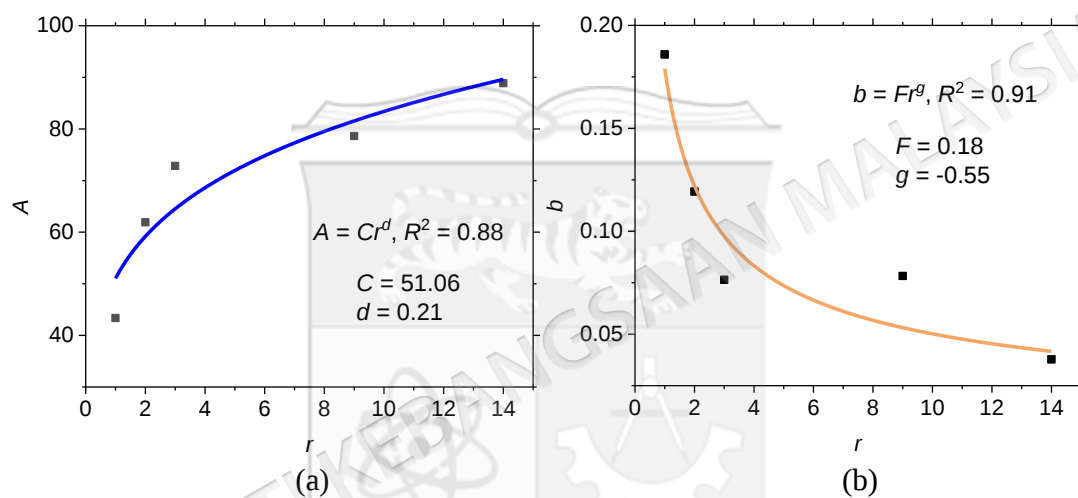
Pemalar F pula mewakili kadar ketepuan, yang mana $0 \leq F \leq 1$. Apabila $F = 0$, bahan mengalami ketepuan pengerasan, manakala apabila $F = 1$ bahan mengalami pengerasan berterusan iaitu tidak berlaku ketepuan kekerasan dengan penambahan N . Pemalar g pula mewakili kebergantungan kadar ketepuan terhadap r , yang mana $-1 \geq g \geq 0$. Apabila $g \rightarrow 0$, kadar ketepuan tidak dipengaruhi oleh r . Manakala $g \rightarrow -1$ pula mewakili kadar ketepuan yang berbeza pada r yang berbeza. Oleh yang demikian, berdasarkan kepada parameter bahan ini iaitu C, d, F dan g , kelakuan umum pengerasan bagi bahan yang berbeza boleh diperoleh.

Sehubungan itu, parameter bahan AA2024 yang diproses HPT ini ditentukan. Berdasarkan Persamaan 4.7, H diplotkan melawan N bagi beberapa kedudukan r . Melalui padanan lengkung terbaik, pekali pengerasan $\bar{A}$ dan kuasa pengerasan b diperoleh, seperti Jadual 4.3. Seperti ditunjukkan dalam Rajah 4.13, $\bar{A}$ diplotkan melawan r bagi mendapatkan parameter C dan d . Seterusnya, b juga diplotkan melawan r bagi mendapatkan parameter F dan g . Hasilnya, nilai C, d, F dan g bagi AA2024 masing-masingnya ialah 51.06, 0.21, 0.18 dan -0.55. Menggunakan parameter bahan yang telah ditentukan ini, kekerasan AA2024 pada N dan r tertentu boleh dianggarkan.

Kepekaan setiap pemalar pengerasan ini seterusnya ditentukan dengan mengira pekali kepekaan, $c_i = \Delta H / \Delta x_i$ yang mana ΔH adalah perubahan kekerasan yang disebabkan oleh perubahan pada input pemalar pengerasan, Δx_i . Jadual 4.4 menunjukkan hasil pengiraan pekali kepekaan bagi setiap pemalar pengerasan dengan pemrosesan HPT $N = 0.25$ pada kedudukan sampel $r = 5$ mm. Dalam jadual tersebut, Δx_i ditentukan dengan kenaikan H daripada 200 Hv ke 205 Hv ($\Delta H \sim 5$ Hv). Analisis

Jadual 4.3 Pekali kekerasan A dan kuasa pengerasan b yang ditentukan melalui padanan lengkung terbaik fungsi $H = H_0 + \bar{A}N^b$.

Jejari, r (mm)	$\bar{A}$	b
1	43.38	0.1859
2	61.91	0.1193
3	72.84	0.0764
9	78.62	0.0783
14	88.86	0.0378



Rajah 4.13 Penentuan pemalar pengerasan bahan AA2024: (a) C dan d , (b) F dan g .

ini menjelaskan pemalar yang mempunyai kepekaan paling tinggi adalah d diikuti F , g dan C . Penentuan kepekaan ini adalah penting sebagai panduan dalam menentukan nilai pemalar pengerasan yang munasabah untuk jenis bahan yang lain.

Jadual 4.4 Pekali kepekaan bagi setiap pemalar pengerasan dengan pemprosesan HPT $N = 0.25$ dan pada kedudukan sampel $r = 5$ mm.

Pemalar pengerasan	Δx_i	ΔH	c_i
C	3.542	4.416	1.25
d	0.042	4.415	105.85
F	0.119	4.415	37.02
g	0.675	4.415	6.54

4.3.2 Model Analitikal Tegasan HPT

Pengukuran tegasan pada sampel terproses HPT dilakukan melalui ujian tegangan. Namun, data tegasan yang diperoleh daripada ujian tegangan adalah terhad disebabkan sampel HPT yang bersaiz kecil dan ujian tegangan yang bersifat memusnah. Berdasarkan kekangan-kekangan yang disebutkan, model evolusi kelakuan penguatan diperlukan bagi penilaian keseluruhan sampel HPT dengan lebih tepat. Oleh itu, data kekerasan digunakan sebagai perwakilan tegasan paling hampir berdasarkan hubungan linear yang kuat antara kekerasan dan kekuatan telah dilaporkan secara konsisten (Asgharzadeh et al. 2020; Salazar-Guapuriche et al. 2006; Tiryakioğlu et al. 2015; Václavová et al. 2017).

Hubungan kekerasan-kekuatan telah diguna pakai dalam kajian HPT sebelum ini (Chen et al. 2016; Sun, Qiao, Zheng, Hu et al. 2018; Zhang et al. 2011). Hubungan ini adalah merujuk kepada korelasi yang paling ringkas. Dicadangkan oleh Tabor (1956), hubungan ini ditunjukkan dalam Persamaan 4.8 dengan kedua-dua sifat mekanikal dalam unit yang sama iaitu MPa.

$$H = f(3\sigma) \quad (4.8)$$

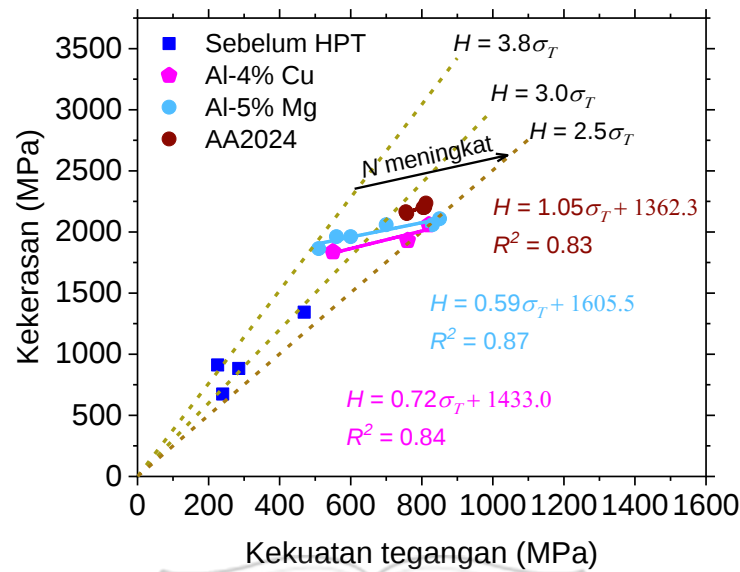
Tegasan logam biasanya dianggarkan secara pukal melalui Persamaan 4.8, dengan anggapan faktor korelasi bersamaan 3 (Busby, Hash & Was 2005). Namun, hubungan ini didapati kurang tepat bagi sampel pada terikan tinggi. Terdahulu Zhang, Li & Zhang (2011) mencadangkan hubungan kekerasan-kekuatan untuk bahan yang diubah bentuk plastik melampau dikelaskan mengikut jenis bahan dan teknik pemprosesan SPD. Bagi aloi Cu-Zn contohnya, teknik pemprosesan ECAP menghasilkan hubungan kekerasan-kekuatan $H \approx 3\sigma$. Sementara itu, didapati $H < 3\sigma$ untuk pemprosesan HPT. Dalam kedua-dua kes, σ boleh mewakili kekuatan alah atau kekuatan tegangan. Walaupun bahan diproses SPD mengalami pengerasan kerja yang terhad, namun kekuatan alah dan tegangan masih boleh dibezakan. Julat antara kekuatan alah dan kekuatan tegangan ini adalah besar. Justeru, pencirian yang lebih tepat diperlukan.

Tiryakioğlu et al. (2015) kemudiannya menyimpulkan bahawa hubungan kekerasan-kekuatan ditakrifkan dengan lebih baik dengan memplotkan H melawan σ , yang tidak melalui titik asalan seperti Persamaan 4.9.

$$H = \varsigma_1 \sigma + \varsigma_2 \quad (4.9)$$

yang mana ς_1 adalah kecerunan dan ς_2 adalah pintasan-y korelasi linear tersebut. Terkini, Asgharzadeh et al. (2020) mengesahkan Persamaan 4.9 bagi meramalkan kekuatan menggunakan suatu nilai kekerasan untuk semua siri aloi aluminium tanpa mengira teknik pemprosesan. Kekerasan dilaporkan lebih baik dalam meramal kekuatan tegangan berbanding kekuatan alah, dengan pekali penentuan R^2 yang lebih tinggi. Keputusan ini juga adalah konsisten dengan kajian terdahulu oleh Gaško & Rosenberg (2011) terhadap keluli dua fasa. Dalam kajian ini pula, kebolegunaan hubungan tersebut disahkan terhadap aloi aluminium yang diproses HPT berdasarkan kajian-kajian yang disenaraikan dalam Jadual 4.4. Ia terdiri daripada aloi aluminium dengan pelbagai ciri mekanikal sebelum dan selepas pemprosesan HPT.

Rajah 4.14 menunjukkan plot H melawan σ_T bagi aloi aluminium yang disenaraikan dalam Jadual 4.5. Keseluruhan data didapati terserak antara faktor korelasi 2.5 dan 3.8. Secara umumnya, anggaran H mengikut Persamaan 4.8 adalah benar untuk semua aloi aluminium yang dikaji tanpa mengira jenis pemprosesan. Ini kerana semua data kekerasan terserak di sepanjang garis $3\sigma_T$. Bagi sampel yang tidak diproses HPT, kebanyakan data lebih menghampiri faktor korelasi 3. Namun begitu, ketepatan ramalan σ_T bagi aloi aluminium yang berbeza boleh ditingkatkan dengan melakukan analisis regresi secara berasingan. Hasilnya, Persamaan 4.9 didapati menghasilkan korelasi yang lebih baik untuk setiap aloi aluminium diproses HPT, dengan pekali penentuan R^2 antara 0.83 sehingga 0.9. Didapati H dan σ_T berkorelasi dengan baik secara linear dengan ς_1 dan ς_2 tertentu mengikut jenis aloi aluminium, seperti yang dinyatakan dalam Rajah 4.14. Dapatan ini membuktikan bahawa Persamaan 4.9 adalah lebih tepat berbanding Persamaan 4.8 dalam menganggarkan kekuatan tegangan bahan, khususnya untuk aloi aluminium yang diproses HPT.



Rajah 4.14 Kekerasan melawan kekuatan tegangan bagi aloi aluminium yang diproses dan sebelum HPT.

Jadual 4.5 Perbandingan ciri mekanikal aloi aluminium yang diproses HPT dan tidak diproses HPT.

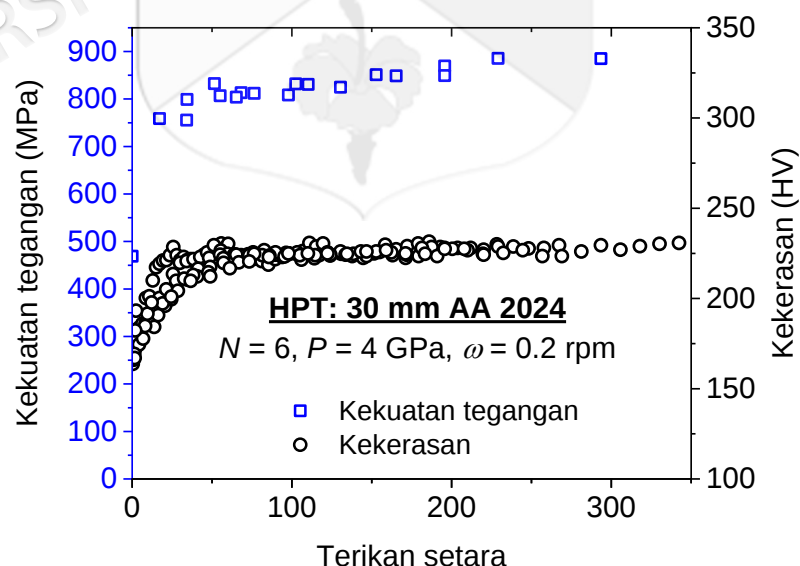
Aloi aluminium	Proses	Kekerasan Vickers (Hv)	Kekuatan tegangan (MPa)
Al 4wt% Cu ^a	Rawatan haba (sebelum HPT)	68.8	240
	Rawatan haba + HPT N = 0.5 - 5	187.5 - 210	550 - 820
AA5483 Al 5wt.%Mg ^b	Rawatan haba (sebelum HPT)	90	285
	Rawatan haba + HPT N = 0.5 - 3	190 - 215	510 - 850
AA2024 ^c	Rawatan haba (sebelum HPT)	137	469
	Rawatan haba + HPT N = 1 - 6	219.3 - 228	755.5 - 811.9

^aMohamed et al. 2015, ^bBazarnik et al. 2016, ^cKajian ini.

Sifat mekanikal sampel HPT telah dibuktikan meningkat dengan peningkatan bilangan putaran N . Apabila N meningkat, pekali korelasi, yang juga mewakili nisbah kekerasan terhadap kekuatan tegangan (H/σ_T), semakin kecil. Ini juga menjelaskan

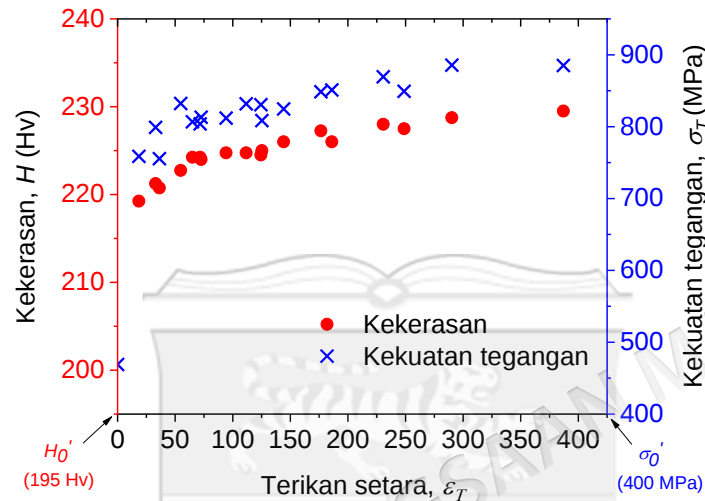
bahawa, peningkatan σ_T adalah lebih cepat berbanding H dengan penambahan N . Dapatan ini adalah selari dengan laporan terdahulu (Busby et al. 2005) yang menyatakan bahawa faktor korelasi berubah untuk bahan yang mempunyai kuasa pengerasan terikan b yang lebih besar daripada 0 ($A\varepsilon^b, b \neq 0$), yang mana menunjukkan kelakuan penguatan. Dalam keadaan kekurangan data empirik yang komprehensif untuk menentukan pemalar bahan ς_1 dan ς_2 dengan tepat, kaedah ramalan kekuatan bahan alternatif diperlukan. Pembangunan kaedah ramalan alternatif ini telah diperincikan dalam seksyen 3.3.1 dan keputusan ramalan dibincangkan dalam perenggan seterusnya.

Merujuk kepada Rajah 4.15, evolusi kekerasan dan kekuatan tegangan AA2024 adalah hampir sama semasa HPT. Berdasarkan rangkuman keputusan uji kaji tersebut, pada $r = 4$ mm bagi sampel dengan ($N = 1$), kekerasan sampel AA2024 adalah 219.25 Hv dan kekuatan tegangannya adalah 758.8 MPa. Dengan anggapan nisbah kekerasan terhadap kekuatan tegangan adalah tetap sepanjang proses HPT, nisbah penguatan-pengerasan, η bagi sampel AA2024 adalah 3.52. η ialah suatu parameter kuantitatif yang membandingkan kadar penguatan dan pengerasan sesebuah bahan.



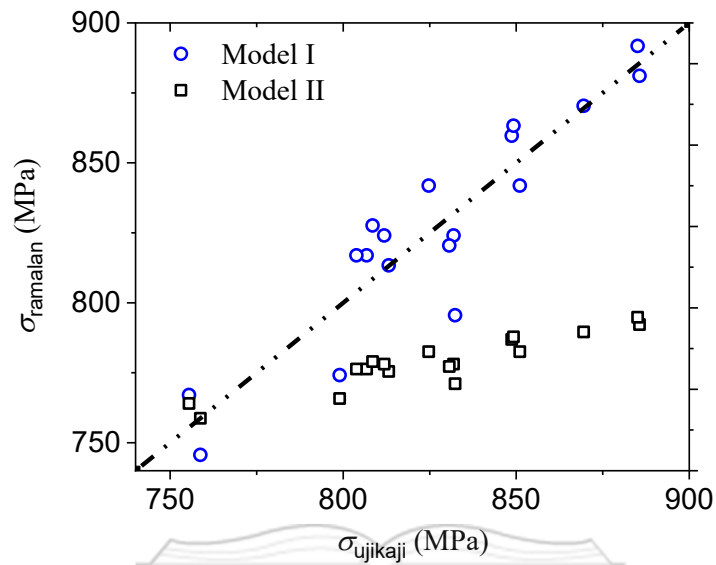
Rajah 4.15 Perbandingan evolusi kekuatan alah dan kekerasan bagi sampel AA2024 terproses HPT.

Bagi meningkatkan ketepatan ramalan, model I ditambahbaik menjadi model II seperti Persamaan 3.12, melalui pengubahsuaian η . Dalam model II ini, nilai awal terubahsua H'_0 dan σ'_0 diambil kira. Bagi sampel AA2024 yang dikaji, H'_0 adalah 195 Hv dan σ'_0 adalah 400 MPa, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.16. Oleh itu, $\bar{\eta}$ bagi sampel AA2024 ini adalah 14.25.

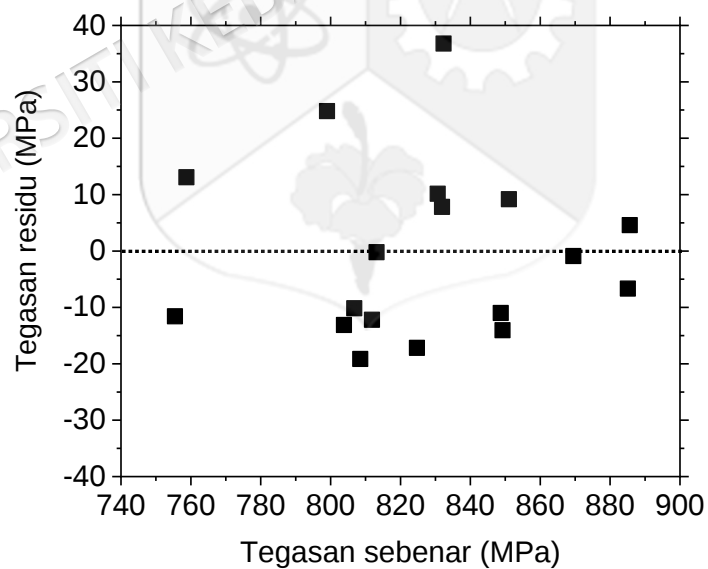


Rajah 4.16 Pembetulan nilai kekerasan dan kekuatan tegangan awal melalui penyesuaian lengkung.

Dalam Rajah 4.17, tegasan σ_i yang diramal dibandingkan dengan tegasan uji kaji. Suatu garisan dwisektor regresi linear diplotkan pada graf yang sama bagi mewakili hubungan linear sempurna antara tegasan ramalan dan tegasan sebenar. Perbandingan ini mendapati, σ_i yang diramal menggunakan model I menjauhi garisan dwisektor tersebut. Sementara itu, σ_i yang diramal menggunakan model II terjajar dengan baik pada garisan regresi linear tersebut, membuktikan ketepatan ramalan yang lebih baik. Seterusnya residu e_r , iaitu perbezaan antara nilai sebenar dan ramalan dikira bagi menilai kelaziman sisihan ramalan. Seperti yang dibuktikan dalam Rajah 4.18, model II menunjukkan taburan e_r tertabur secara simetri sepanjang garisan $e_r = 0$. Corak taburan ini membuktikan model II memberikan padanan yang diterima daripada sudut penilaian statistik.

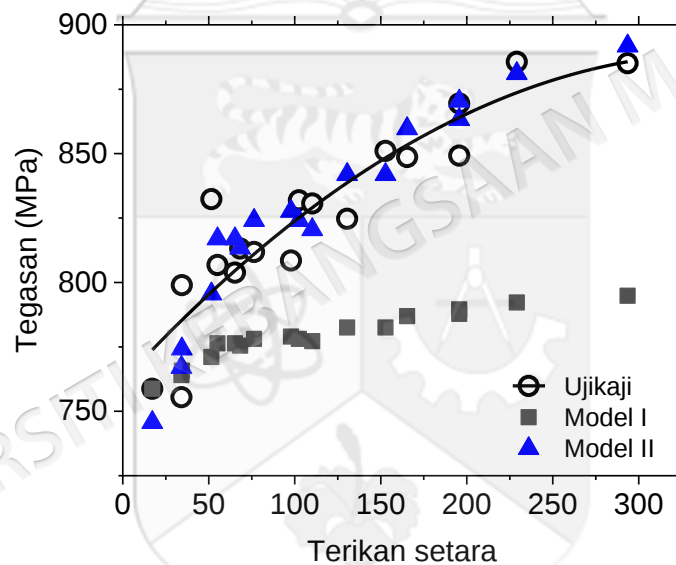


Rajah 4.17 Kebolehpercayaan tegasan yang diramalkan melalui model I dan II berbanding tegasan eksperimen.



Rajah 4.18 Taburan residu berbanding tegasan sebenar uji kaji.

Rajah 4.19 menunjukkan perbandingan evolusi tegasan yang diramal menggunakan model analitikal yang dicadangkan berbanding tegasan uji kaji sebenar. Dapat diperhatikan bahawa tegasan ramalan model II lebih menghampiri padanan lengkung tegasan uji kaji sebenar. Pengukuran ketepatan ramalan menggunakan model I dan model II diringkaskan dalam Jadual 4.6, meliputi pengukuran jumlah kuasa dua ralat (SSE), pekali penentuan (R^2) dan punca kuasa purata kuasa dua ralat (RMSE). Seperti yang diterangkan dalam seksyen 3.3.1, ramalan yang lebih baik ditunjukkan dengan SSE dan RMSE yang menghampiri nilai 0, dan R^2 yang menghampiri nilai 1.



Rajah 4.19 Perbandingan evolusi tegasan ramalan menggunakan model analitikal yang dicadangkan berbanding tegasan uji kaji sebenar.

Jadual 4.6 Perbandingan ketepatan ramalan Model I dan Model II.

Pengukuran	Model I	Model II	Perbezaan ketepatan ramalan
R^2	-5.9	0.8482	97.8%
SSE	11,140	3,986	64.2%
RMSE	25.6	15.31	40.2%

Berdasarkan ukuran ketepatan yang dikira, model II mempunyai SSE dan RMSE yang lebih menghampiri sifar berbanding model I, iaitu masing-masingnya 3,986 dan 15.31 berbanding 11,140 dan 25.6. Bagi model I, $R^2 = -5.9$, yang mana nilai R^2 yang negatif membawa maksud ralat model regresi adalah lebih besar daripada ralat keseluruhan yang berdasarkan tegasan purata. Keadaan ini terjadi kerana garisan regresi dipaksa melalui titik asalan bagi membandingkan taburan terhadap regresi $y = x$, iaitu korelasi sempurna antara tegasan ramalan berbanding tegasan sebenar. Nilai R^2 bagi model II pula adalah lebih baik berbanding model I iaitu 0.85, membuktikan 85% kebolehpercayaan ramalan. Secara keseluruhannya, ketepatan ramalan Model II berjaya ditingkatkan berbanding Model I, masing-masingnya sebanyak 64.2% daripada segi SSE, 97.8% untuk R^2 dan 40.2% untuk RMSE.

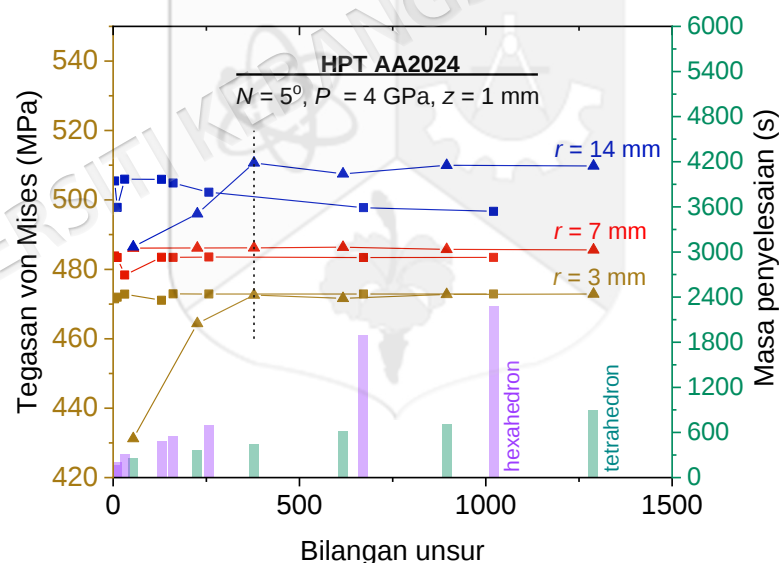
Dalam bahagian ini, model kelakuan pengerasan dan penguatan telah dihuraikan. Model analitikal kelakuan penguatan yang mengintegrasikan parameter kekuatan merupakan kaedah permodelan alternatif yang lebih efisien berbanding kaedah permodelan sedia ada. Model penguatan yang dibangunkan ini digunakan untuk penentusahan model simulasi HPT dalam bahagian seterusnya.

4.4 PENGESAHAN DAN PENENTUSAHAN MODEL SIMULASI HPT

Model simulasi HPT ditentusahkan bagi memastikan ketepatannya dengan teori dan spesifikasi sistem dan proses HPT sebenar. Seperti yang diterangkan dalam bahagian 3.4, pengesahan adalah merujuk kepada proses penilaian keberkesanan implimentasi model terhadap kefahaman teori, konsep mahupun spesifikasi sistem. Oleh itu, pengesahan membandingkan antara data simulasi dan analitikal. Penentusahan pula adalah merujuk kepada penilaian ketepatan model terhadap uji kaji pembentukan HPT sebenar. Analisis ini membandingkan keputusan simulasi terhadap data uji kaji sebenar yang diukur secara fizikal. Pengesahan dan penentusahan model simulasi HPT dibincangkan dalam seksyen berikut.

4.4.1 Ketepatan dan Kecekapan Pengiraan

Dalam kajian ini, keputusan pengiraan tegasan von Mises adalah paling signifikan berbanding tegasan berarah ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), tegasan ricih ($\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$) mahupun tegasan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Oleh yang demikian, semua ukuran tegasan adalah menggunakan tegasan von Mises setara. Rajah 4.20 menunjukkan tegasan von Mises dan masa penyelesaian yang diplotkan melawan bilangan unsur tetrahedron dan hexahedron. Perbandingan ketepatan dan kecekapan pengiraan ini masing-masingnya diplotkan dengan graf bergaris dan carta palang. Keputusan pengiraan dengan unsur tetrahedron diwakili oleh penanda segitiga manakala hexahedron diwakili penanda segiempat. Analisis ini menilai kesan jenis unsur dan bilangannya terhadap tegasan von Mises pada sepanjang jejari sampel. Penelitian dilakukan secara rawak pada koordinat berhampiran pusat ($r = 3$ mm), tengah jejari ($r = 8$ mm) dan pinggir cakera ($r = 14$ mm).



Rajah 4.20 Analisis bilangan elemen jejaring terhadap pengiraan tegasan dan masa pengiraan.

Pada kedudukan berhampiran pusat ($r = 3$ mm), elemen hexahedron didapati menghasilkan keputusan yang lebih konsisten pada semua jejari yang diuji berbanding tetrahedron, walaupun dengan penjejaringan bilangan unsur yang minimum. Namun, unsur hexahedron menghasilkan keputusan yang tidak stabil berbanding tetrahedron

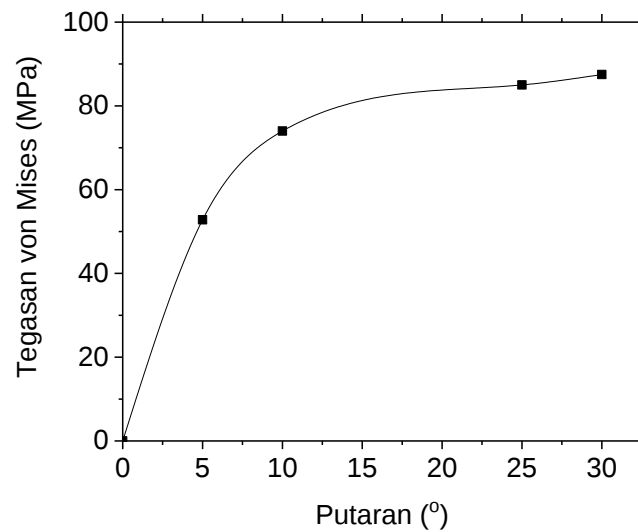
pada pinggir cakera ($r = 14 \text{ mm}$) untuk kesemua bilangan unsur yang diuji. Keputusan ini terhasil kerana ketidaklinearan yang tinggi pada kawasan tersebut disebabkan aliran keluar bahan secara bebas pada sempadan yang tidak dikekang.

Sebaliknya, unsur tetrahedron menghasilkan keputusan yang konsisten apabila bilangan unsur ditingkatkan kepada 378. Keputusan yang konsisten pada semua kedudukan jejari ini membuktikan minimum 378 unsur tetrahedron adalah memadai untuk menghasilkan pengiraan tegasan yang konsisten sepanjang jejari sampel. Penambahan bilangan unsur yang lebih tinggi hanya meningkatkan masa penyelesaian. Di samping itu, masa penyelesaian yang dicatatkan menggunakan >378 unsur hexahedron adalah jauh lebih tinggi berbanding tetrahedron dengan bilangan unsur yang hampir sama. Oleh yang demikian, 378 unsur tetrahedron ditetapkan sebagai jenis dan bilangan optimum dalam memodelkan sampel HPT.

4.4.2 Pengesahan

Rajah 4.21 menunjukkan tegasan von Mises yang dijana melalui analisis unsur terhingga dengan peningkatan darjah putaran HPT. Peningkatan tegasan yang mendadak diperhatikan pada putaran $\theta < 5^\circ$. Kemudiannya kadar peningkatan tegasan menjadi lebih rendah dengan penambahan θ . Corak tegasan ini adalah kesan parameter masukan $E_t = 250 \text{ MPa}$ yang jauh lebih rendah berbanding $E = 73 \text{ GPa}$ dalam model simulasi tersebut. Analisis yang dilakukan untuk tujuan pengesahan model simulasi ini melibatkan 10° putaran. Walaupun kadar terikan plastik ditetapkan lebih rendah daripada elastik, terikan kilas yang berterusan akan menghasilkan terikan plastik yang besar terhadap sampel.

Dalam uji kaji sebenar, kebiasaannya, lima putaran penuh dikenakan dalam pemprosesan aloi aluminium menggunakan teknik HPT (Ashida et al. 2015; Bazarnik et al. 2016). Selain itu, terdapat juga kajian yang mengaplikasikan putaran yang lebih tinggi sehingga 100 (Jae-kyung Han et al. 2019; Oh-ishi et al. 2013) dan 1500 putaran (Edalati 2019; Edalati et al. 2017), menghasilkan ubah bentuk plastik ultra, melalui terikan ricih yang amat besar ($\epsilon \geq 1000$). Oleh itu, E_t yang diimplementasi dalam

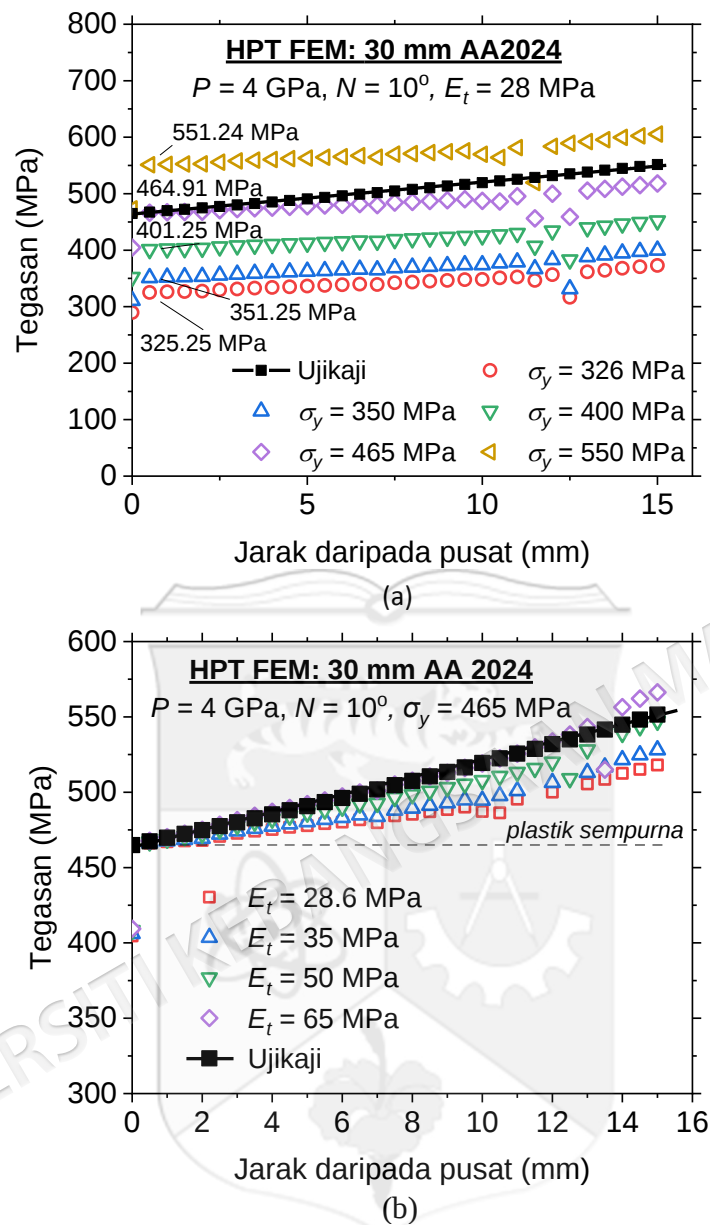


Rajah 4.21 Tegasan von-Mises maksimum yang dikira daripada analisis simulasi HPT dengan pembebanan mampatan bersamaan 4 GPa dan terikan kilas sehingga 30° putaran.

model simulasi ini boleh diterima kerana selaras dengan penguatan bahan HPT yang besar hasil terikan plastik tinggi yang berterusan.

Rajah 4.22 menunjukkan taburan tegasan von Mises sepanjang 15 mm jejari sampel. Simulasi HPT dilakukan sehingga 10° putaran dengan anjakan andas 0.065 mm yang menyamai tekanan bersamaan 4 GPa. Kesan pengubahsuaian parameter σ_{y0} terhadap tegasan von Mises diplotkan dalam Rajah 4.22(a). Analisis ini membuktikan σ_{y0} memberi kesan terhadap tegasan von Mises minimum yang terhasil pada jejari dalaman. Pengekalan σ_{y0} pada pusat cakera ini disokong oleh kefahaman teori bahawa terikan minimum dikenakan pada paksi putaran. Tegasan pada kedudukan jejari selainnya meningkat daripada tegasan minimum ini pada kadar yang sama, dijelaskan oleh E_t yang dimalarkan.

Kesan E_t sebagai pemboleh ubah pula boleh dilihat dalam Rajah 4.22(b). Pengubahsuaian E_t menghasilkan perbezaan pada kadar penguatan. Semakin besar E_t , semakin tinggi kadar penguatan, dan sebaliknya. Selain itu, tegasan von Mises meningkat daripada pusat ke arah pinggir cakera. Dapatan ini adalah konsisten dengan kesan peningkatan jarak daripada pusat putaran r terhadap terikan von Mises, seperti

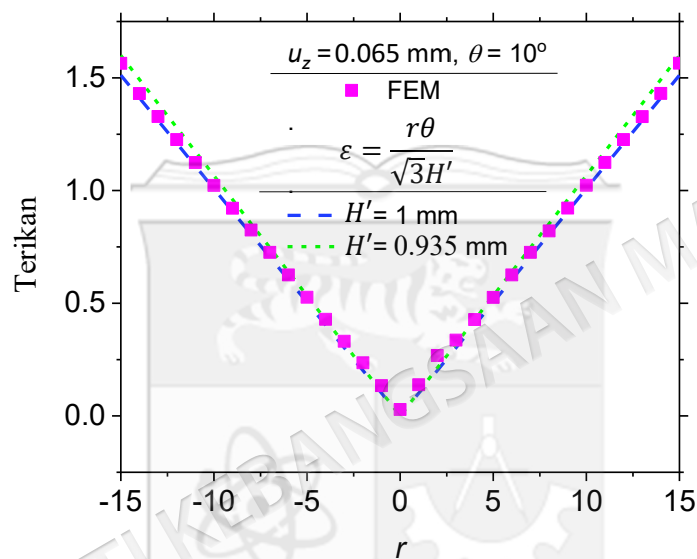


Rajah 4.22 Penentuan sifat plastik AA2024 diproses HPT berdasarkan aliran tegasan von Mises dengan 10° putaran dan tekanan 4 GPa: (a) kekuatan alah awal σ_{y0} , (b) tangen modulus E_t .

yang ditakrifkan dalam Persamaan 2.2. Ciri-ciri pembangunan tegasan semasa proses HPT yang selari dengan kefahaman teori HPT ini mengesahkan model simulasi yang dicadangkan.

Pengesahan seterusnya dibuat dengan membandingkan terikan efektif daripada simulasi dengan terikan setara daripada model analitikal. Rajah 4.23 menunjukkan

terikan ramalan bagi dua ketebalan sampel iaitu 1.0 mm dan 0.945 mm, masing-masingnya merujuk kepada keadaan pembebanan awal dan akhir. Dapat diperhatikan bahawa ramalan FEM berada di antara dua keadaan ramalan teori tersebut. Tegasan yang dikira ini adalah boleh diterima kerana ketebalan sampel berubah dengan pengaplikasian daya mampatan melalui anjakan andas 0.065 mm yang dikenakan ke atas sampel semasa pemprosesan HPT. Proses pengesanan ini memastikan model simulasi diimplimentasi mengikut prinsip asas dan spesifikasi HPT.



Rajah 4.23

Terikan setara sepanjang jejarian sampel dengan anjakan 0.065 mm dan 0° putaran berbanding anggaran teori untuk ketebalan sampel 1.0 mm (pembebanan awal) dan 0.945 mm (pembebanan akhir).

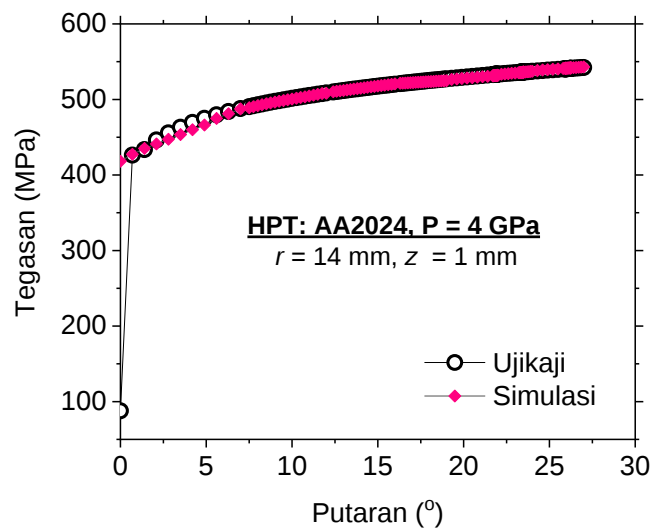
4.4.3 Penentusahan

Ketepatan model simulasi yang mewakili sistem dan proses HPT sebenar pula diuji melalui perbandingan data simulasi terhadap data uji kaji. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.22, kekuatan tegangan yang diukur melalui uji kaji ditandakan legap dan bergaris. Perbandingan tegasan uji kaji ini dengan tegasan von Mises yang dijana melalui simulasi menentukan parameter keplastikan bagi model simulasi HPT AA2024 ini. Penilaian pelbagai σ_{y0} dilakukan dengan mengekalkan E_t sebagai pemalar pada 28 MPa. Analisis ini mencadangkan bahawa $\sigma_{y0} = 465 \text{ MPa}$ adalah konsisten dengan uji kaji.

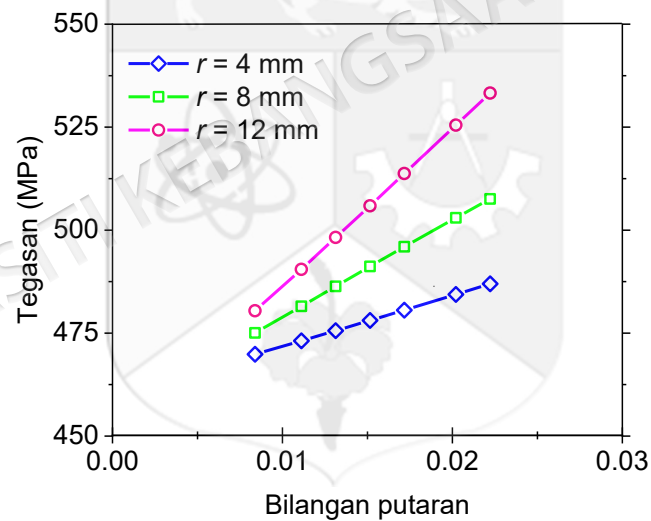
Seterusnya E_t pula diuji dengan menetapkan $\sigma_{y0} = 465$ MPa sebagai pemalar, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.22(b). Hasilnya, didapati $E_t = 65$ MPa adalah konsisten dengan data uji kaji, khususnya pada jejari dalaman sehingga 12 mm daripada pusat cakera. Sementara itu, $E_t = 50$ MPa adalah konsisten dengan evolusi tegasan pada jejari luaran, daripada 14 mm ke pinggir cakera. Secara keseluruhan, semakin rendah E_t yang digunakan berbanding 65 MPa, tegasan ramalan semakin menjauhi tegasan uji kaji. Keputusan analisis ini menggariskan ketidaktepatan penggunaan fungsi pengerasan plastik sempurna ($E_t = 0$ MPa) oleh penyelidik terdahulu (Feng & Levitas 2017; Henrique et al. 2014; Khoddam et al. 2016) untuk bahan HPT yang mengalami pengerasan kerja. Kebolehbandingan data simulasi terhadap uji kaji ini turut membuktikan kebolegunaan fungsi pengerasan dwilinear dalam meringkaskan model HPT untuk simulasi pada julat terikan yang kecil. Seperti yang telah dibincangkan sebelum ini, model simulasi yang ringkas menjadi tumpuan dalam simulasi HPT. Penjimatan masa pengiraan menjadi fokus permodelan, selagi ianya dapat mewakili geometri, bahan, pembebanan dan keadaan sempadan yang dikaji.

Rajah 4.24 menunjukkan perbandingan tegasan von Mises yang dikira daripada analisis pengiraan berangka terhadap data tegasan yang diunjurkan daripada uji kaji. Tegasan von Mises yang terjana daripada simulasi HPT dinilai sehingga 27° putaran pada kedudukan berhampiran pinggir cakera ($r = 14$ mm) dan permukaan yang dikenakan pembebanan kilas ($z = 1$ mm). Analisis ini membuktikan tegasan von Mises daripada simulasi HPT ini terjajar pada tegasan unjuran uji kaji dengan baik. Walaupun simulasi ubah bentuk plastik melampau ini melibatkan prosedur penjeraringan semula, transisi tegasan antara langkah pengiraan adalah lancar.

Rajah 4.25 pula menunjukkan perbandingan tegasan von Mises yang disimulasikan pada $r = 4$ mm, 8 mm dan 12 mm. Tegasan yang lebih tinggi pada jejari yang lebih besar dapat diperhatikan. Umumnya diketahui bahawa tegasan adalah berkadar terus dengan terikan. Penghasilan ketebalan sampel yang lebih nipis di pinggir cakera, seperti yang dibincangkan melalui pengukuran fizikal sampel dalam seksyen 4.2.1, menentusahkan dapatan ini. Corak tegasan simulasi FEM yang konsisten dengan penipisan sampel membuktikan andaian yang diaplikasikan dalam model simulasi HPT ini adalah benar.



Rajah 4.24 Penentuan tegasan von Mises daripada simulasi berbanding tegasan uji kaji dengan peningkatan darjah putaran.



Rajah 4.25 Tegasan von Mises daripada simulasi HPT pada pelbagai kedudukan jejari sampel.

Dalam bahagian ini, model simulasi yang dibangunkan telah ditentukan. Keputusan simulasi yang konsisten dengan teori dan uji kaji telah dibuktikan. Model simulasi yang ditentukan ini digunakan untuk simulasi aliran tegasan melalui suatu set analisis berparameter dalam bahagian seterusnya.

4.5 KAWALAN UBAH BENTUK MELALUI ANALISIS BERPARAMETER

Berdasarkan model simulasi yang telah ditentukan, kawalan ubah bentuk AA2024 dikaji melalui analisis berparameter. Analisis simulasi unsur sehingga membolehkan pengiraan yang lebih cepat dan analisis yang lebih sistematik. Selain itu, pengoptimuman mahupun pengubahsuaian terhadap konfigurasi sampel dan peralatan dapat dipertimbangkan untuk menambah baik proses sedia ada. Kawalan ubah bentuk melalui pengubahsuaian parameter dimensi sampel dan konfigurasi andas dibincangkan dalam seksyen berikut.

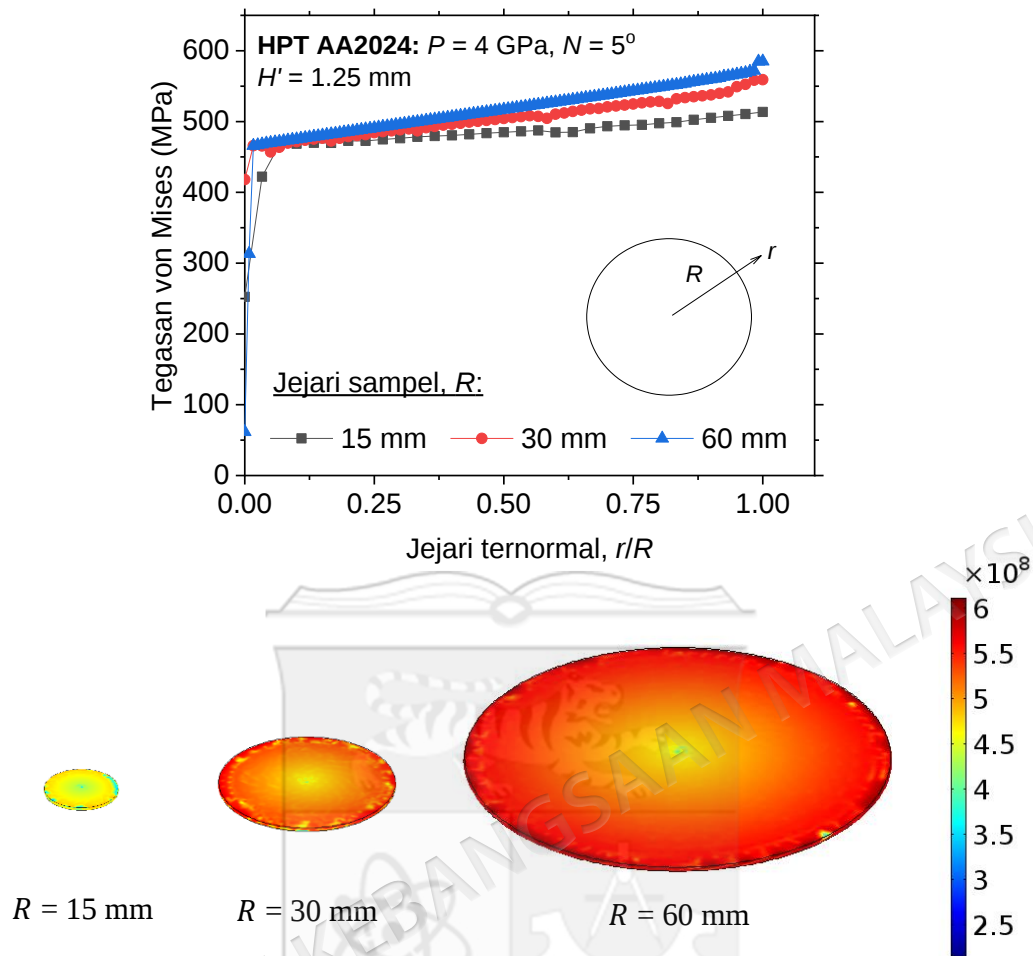
4.5.1 Pengaruh Dimensi Sampel terhadap Aliran Tegasan

Pembentukan bahan ringan yang diperkuat sentiasa mendorong usaha pembesaran sampel. Oleh yang demikian, kawalan ubah bentuk HPT diteliti melalui pengubahsuaian parameter dimensi sampel, termasuk jejari dan ketebalan. Analisis tersebut dibincangkan seperti berikut.

a. Kesan Pelebaran Jejari Sampel

Rajah 4.26 menunjukkan taburan tegasan sepanjang jejari ternormal r/R . Suatu kecerunan tegasan dapat diperhatikan antara jejari dalaman dan luaran. Corak tegasan yang lebih tinggi semakin jauh dari pusat dipamerkan oleh semua saiz sampel. Secara teori juga, terikan ricih adalah berkadar terus dengan jarak daripada pusat putaran, seperti yang diungkapkan dalam Persamaan 2.2.

Walau bagaimanapun, Larijani, Kammerhofer & Ekh (2015) hanya mengesahkan Persamaan 2.2 untuk simulasi aliran tegasan pada julat jejari dalaman sampel. Dalam kajian tersebut, jejari luaran menghampiri perimeter sampel yang berdiameter 25 mm tidak mematuhi Persamaan 2.2. Percanggahan ini adalah disebabkan perbezaan bilangan putaran yang disimulasikan iaitu $N = 2$. Keadaan ini terjadi kerana elemen terherot di kawasan pinggir cakera apabila $\theta \sim \pi/4$ dan menjadi semakin tidak stabil apabila



Rajah 4.26 Taburan tegasan von Mises sepanjang jejari bagi tiga saiz sampel, $R = 15$ mm, 30 mm dan 60 mm.

mencapai separuh putaran penuh. Berbeza dengan kajian tersebut, kajian ini hanya melibatkan darjah putaran rendah ($N < 30^\circ$). Kesan ketaklinearan menghampiri pinggir jejari luaran sampel adalah tidak dominan. Oleh yang demikian, terikan setara boleh dianggarkan menggunakan fungsi linear tersebut.

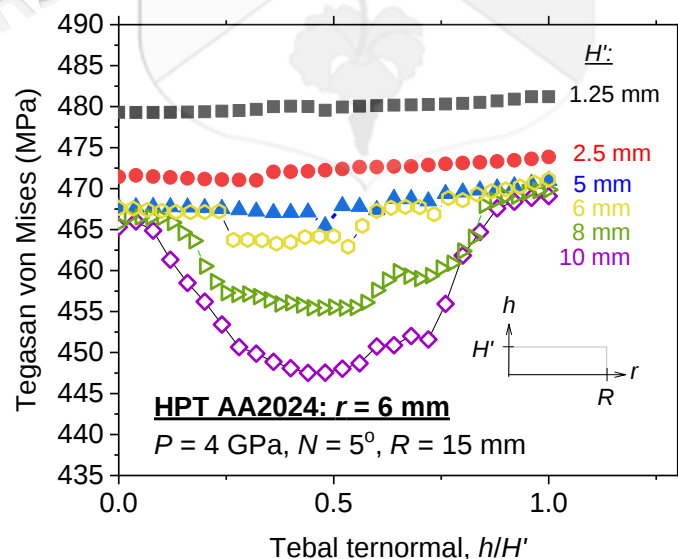
Hohenwarter & Pippan (2019) pula melaporkan kekerasan yang lebih rendah dicapai oleh sampel yang lebih besar. Perbezaan ini disebabkan oleh suhu ubah bentuk adalah tinggi pada sampel yang lebih besar. Oleh kerana kesan haba diabaikan dalam model simulasi ini, dapatan ini secara tidak langsung menjelaskan bahawa penguatan yang lebih tinggi dapat dicapai untuk sampel yang lebih besar sekiranya kesan haba diminimumkan. Antara intervensi yang dibuktikan mengurangkan kesan haba pada

sampel termasuk dengan menggunakan saiz andas yang besar, sebagai sink haba (Edalati et al. 2017) dan menurunkan kadar putaran (Edalati et al. 2011). Dalam masa yang sama, tekanan HPT juga perlu ditingkatkan untuk memproses sampel yang lebih besar bagi memastikan keadaan tanpa gelinciran pada permukaan sentuhan yang lebih besar (Edalati, Horita & Langdon 2009).

b. Kesan Peningkatan Ketebalan Sampel

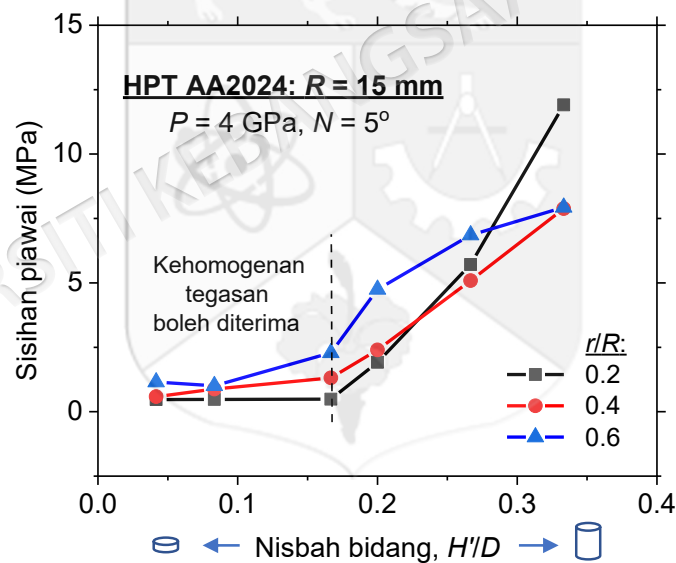
Penelitian tegasan juga dilakukan sepanjang arah ketebalan sampel, h . Rajah 4.27 menunjukkan perbezaan taburan tegasan merentasi dimensi ketebalan bagi sampel berjejari $R = 15$ mm, dengan tebal H' antara 1.25 mm hingga 10 mm. Tegasan didapati berkurang apabila H' ditingkatkan. Dapatan ini jelas selari dengan kefahaman teori ujian kilas bahawa terikan adalah berkadar songsang dengan ketebalan. Selain itu, tegasan juga adalah homogen sepanjang arah ketebalan sehingga $H' = 5$ mm. Namun begitu, kehomogenan semakin berkurang apabila sampel semakin tebal ($H' > 5$ mm).

Kehomogenan tegasan merentasi arah ketebalan diplotkan melawan nisbah tebal sampel H' kepada diameter D , yang juga dipanggil nisbah bidang (H'/D).



Rajah 4.27 Taburan tegasan von Mises merentasi ketebalan bagi sampel dengan tebal H' antara 1.25 mm hingga 10 mm.

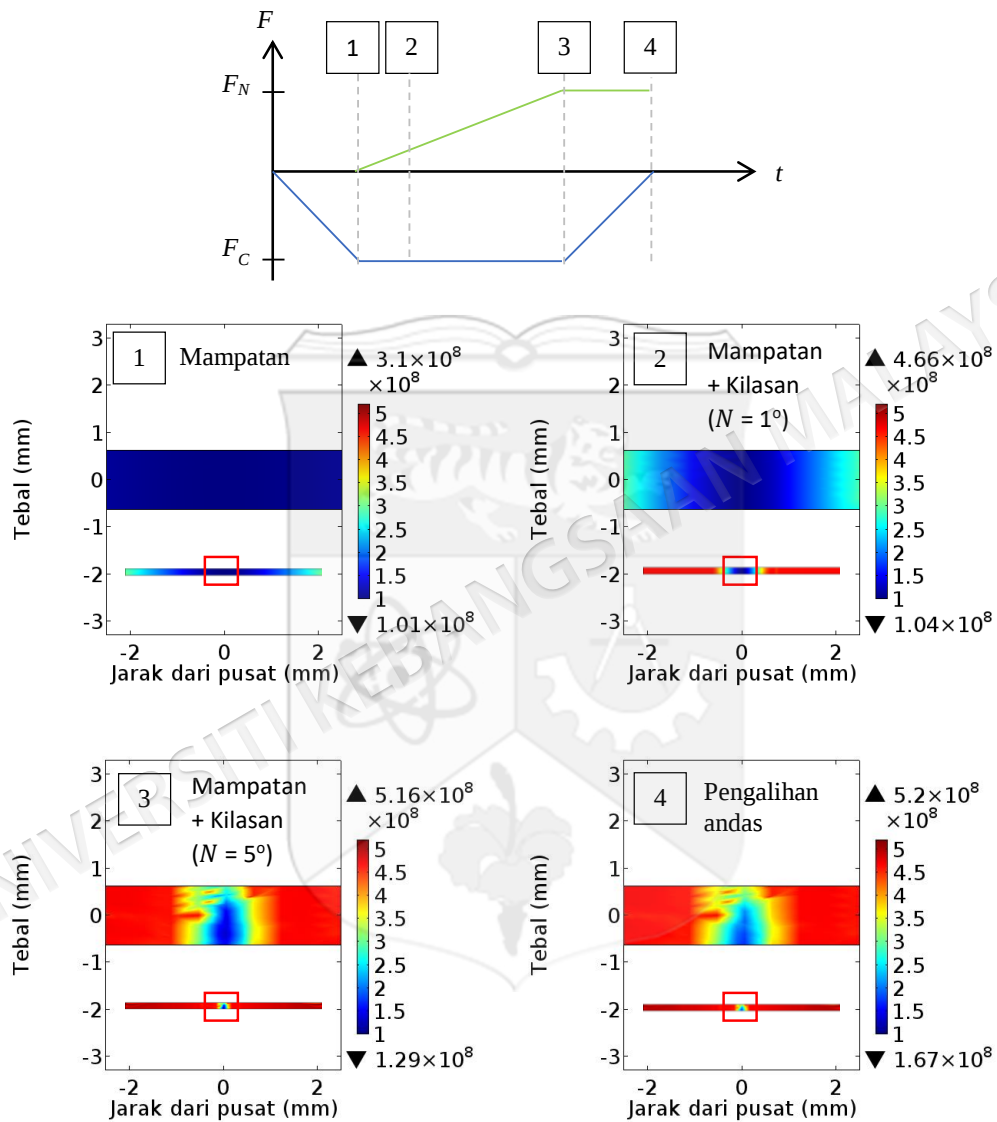
Analisis sisihan piawai tegasan terhadap nisbah bidang pada beberapa kedudukan jejari sampel berbeza ditunjukkan dalam Rajah 4.28. Keputusan menunjukkan sisihan piawai tegasan semakin tinggi apabila nisbah bidang semakin besar, bagi semua kedudukan jejari ternormal (r/R). Dapatan ini menjelaskan kehomogenan tegasan adalah bergantung kepada nisbah bidang. Nisbah bidang perlu dikekalkan kurang daripada 0.2 ($H'/D < 0.2$) bagi memastikan kehomogenan tegasan merentasi ketebalan sehingga (r/R) = 0.6. Sempadan yang tidak dikekang bagi sampel $H'/D > 0.2$ yang semakin besar, menyebabkan kesan aliran keluar bahan pada arah jejari menjadi lebih ketara. Selain nisbah bidang, kehomogenan aliran plastik sepanjang arah ketebalan juga bergantung kepada kelakuan bahan (pengerasan terikan, plastik sempurna mahupun pelembutan terikan) dan geseran antara dinding andas dengan ketebalan sampel (Figueiredo et al. 2012a).



Rajah 4.28 Sisihan piawai tegasan terhadap nisbah bidang pada beberapa kedudukan jejari sampel berbeza.

Terikan ricih yang minimum pada paksi putaran menghasilkan penguatan minimum pada sesebuah sampel. Rajah 4.29 menunjukkan evolusi tegasan menghampiri paksi putaran, $r \leq 2$ mm bagi sampel berketebalan 1.25 mm. Terdapat variasi tegasan merentasi ketebalan sampel menghampiri paksi putaran. Dapatan ini disokong oleh pemerhatian mikrostruktur yang tidak homogen pada keratan rentas

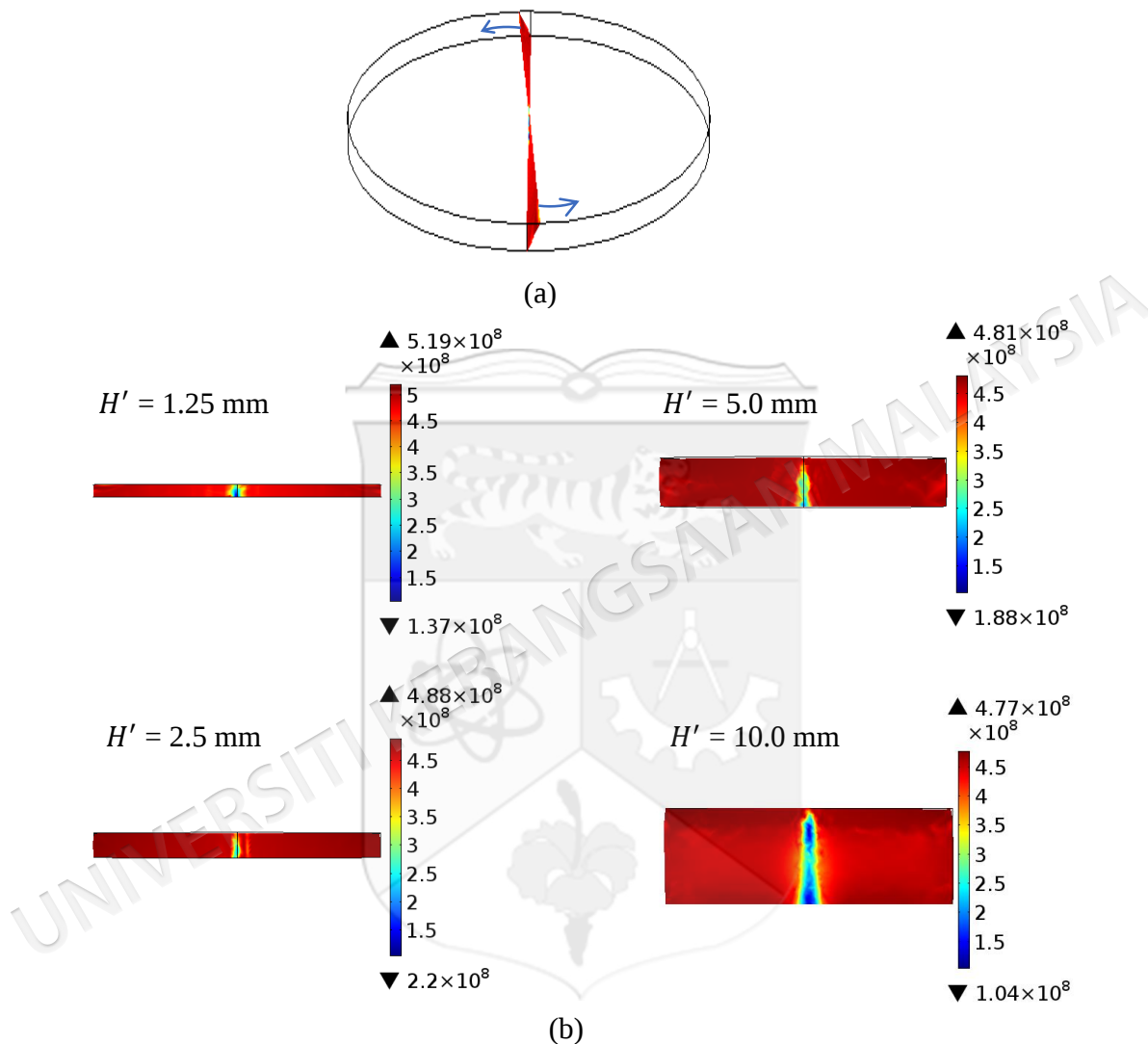
pusat cakera pada satu putaran HPT (Ahmadkhaniha et al. 2018). Analisis ini menjelaskan terikan rendah yang dialami pada paksi putaran bertanggungjawab dalam proses pemulihan dinamik dan penghabluran semula ira yang dilaporkan pada pusat cakera.



Rajah 4.29 Evolusi tegasan von Mises menghampiri paksi putaran pada peringkat pembebanan berbeza, dengan kawasan $r \leq 2$ mm diperbesarkan.

Seperti yang disimulasikan dalam Rajah 4.30(a), walaupun kawasan $r \leq 2$ mm terletak berhampiran paksi putaran, satah yang melalui pusat mengalami puihan, khususnya berhampiran permukaan yang dikenakan beban kilas. Seperti yang

ditunjukkan dalam Rajah 4.30(b), sampel yang lebih tebal juga menunjukkan kecenderungan aliran tegasan yang sama merentasi arah ketebalan. Taburan tegasan ini dilihat berpotensi untuk aplikasi berbentuk cincin atau silinder berongga.



Rajah 4.30 Analisis pada kawasan berhampiran paksi putaran sampel $R = 15$ mm: (a) ubah bentuk, (b) corak tegasan pada sampel berlainan ketebalan dan (c) corak tegasan generik.

Aliran tegasan yang diramal pada variasi jejari dan ketebalan ini menunjukkan taburan aliran tegasan merentasi dimensi sampel. Pada julat putaran yang disimulasikan, tiada keplastikan setempat yang dapat dikenalpasti merentasi dimensi sampel. Sebaliknya tegasan maksimum adalah mematuhi teori ujian kilas. Herotan tinggi pada jejaring luaran diatasi dengan mekanisme penjejaringan semula bagi

meningkatkan penumpuan pengiraan. Kefahaman ini diperlukan dalam usaha untuk meningkatkan saiz sampel HPT. Seksyen seterusnya akan menilai kesan kepelbagaian konfigurasi andas terhadap aliran tegasan yang mempengaruhi kekuatan.

4.5.2 Pengaruh Konfigurasi Andas terhadap Aliran Tegasan

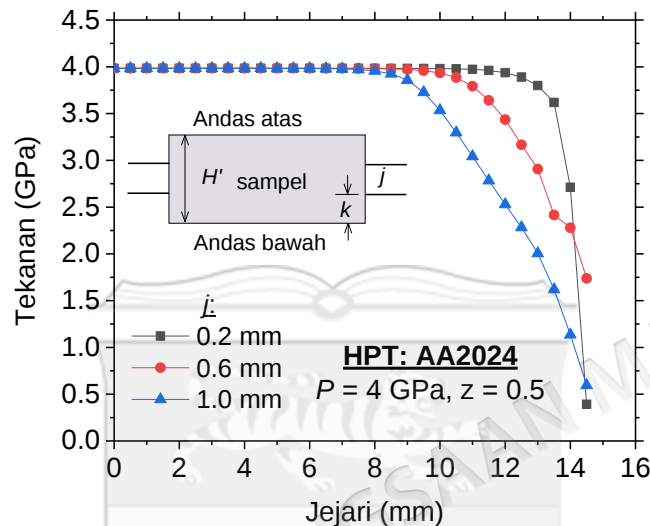
Pembolehubah konfigurasi andas yang dipertimbangkan termasuk jurang aliran bebas, penjaran dan sudut kecondongan dinding. Dalam membincangkan dapatan kajian, istilah aliran tegasan dan aliran bebas digunakan. Aliran tegasan adalah merujuk kepada taburan tegasan pada keseluruhan dimensi sampel dengan pembebanan HPT. Manakala aliran bebas pula adalah merujuk kepada aliran keluar bahan pada permukaan sempadan di kawasan pinggir sampel yang tidak dikekang oleh andas. Analisis tersebut dibincangkan seperti berikut.

a. Kesan Jurang Aliran Bebas

Pembebanan dan keadaan sempadan yang ditetapkan dalam model simulasi menghasilkan aliran bebas bahan dalam arah jejari ke arah pinggir cakera sampel. Corak aliran tegasan sebegini adalah memenuhi kriteria alah von Mises, yang mana terikan isipadu adalah malar sepanjang proses ubah bentuk. Pengaplikasian beban paksian menyebabkan aliran bahan antara dua andas. Dalam masa yang sama aliran keluar bahan dihadkan dan membentuk tekanan balikan ke atas sampel yang mempengaruhi penguatan (Lanjewar et al. 2018).

Rajah 4.31 menunjukkan kesan jurang aliran bebas terhadap tekanan yang dikenakan pada kawasan tengah sampel ($z = 0.5$ mm). Dapat diperhatikan bahawa kehomogenan tekanan berkurang daripada jurang aliran bebas $j = 0.2$ mm sehingga $j = 1.0$ mm. Semakin besar j , kejatuhan tekanan berlaku pada julat jejari yang lebih besar. Hohenwarter et al. (2009) juga melaporkan bahawa tekanan yang tidak homogen bagi konfigurasi tidak terkekang adalah bergantung kepada jejari. Namun, taburan tekanan tidak dilaporkan secara terperinci. Ia dibuktikan dalam kajian ini bahawa

konfigurasi HPT tidak terkekang ($j = 1$ mm) menyebabkan hampir separuh jejari sampel ($r \geq 8$ mm) dikenakan tekanan yang kurang daripada 4 GPa dengan ketara. Bahagian pinggir cakera mencatatkan tekanan minimum pada ~ 0.5 GPa, iaitu 87.5% kurang daripada tekanan yang ditetapkan.



Rajah 4.31 Kesan jurang aliran bebas j terhadap taburan tekanan pada separuh ketebalan sampel ($z = 0.5$ mm), dengan anjakan paksian 0.065 mm yang menyamai tekanan ~ 4 GPa.

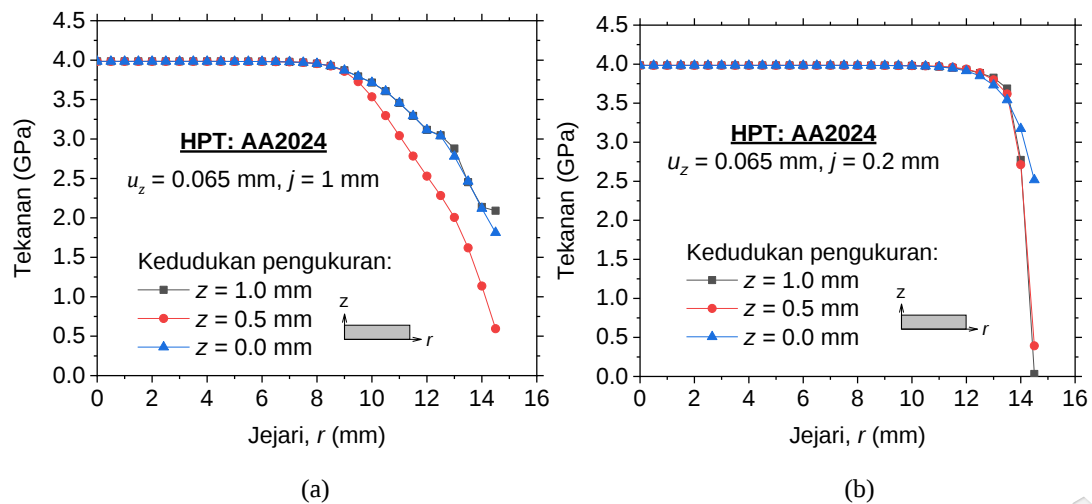
Bagi konfigurasi terkekang penuh ($j = 0$ mm), aliran keluar bahan dikekang sepenuhnya. Secara ideal, konfigurasi ini adalah paling efektif dalam menyediakan tekanan yang seragam kepada keseluruhan dimensi sampel. Walau bagaimanapun, konfigurasi ini cenderung untuk merosakkan andas akibat daripada penumpuan tegasan, terutamanya dalam pemprosesan bahan yang lebih keras seperti keluli (Yogo et al., 2017).

Dalam konfigurasi andas kuasi terkekang pula, keseragaman taburan tekanan yang munasabah sepanjang jejari sampel terhasil. Selain keseragaman tekanan, dimensi sampel akhir juga dapat ditentukan dengan lebih baik. Pada $j = 0.2$ mm, penurunan tekanan berlaku pada julat jejari yang lebih kecil, menghampiri pinggir cakera ($r \geq 14$ mm). Apa yang menarik ialah, jurang aliran bebas ini adalah menghampiri nilai yang dilaporkan dalam kajian kuasi-terkekang HPT terdahulu iaitu

$j = 0.3$ mm, yang melibatkan bahan logam seperti kuprum, aluminium dan magnesium (Edalati et al., 2016a; Figueiredo et al., 2012; Panda et al., 2017). Jurang aliran bebas yang sama dilaporkan dalam memproses komposit bermatriks logam AA6061 (Alhajeri et al., 2016). Namun, kebergantungan kepada jenis bahan dalam penentuan jurang aliran bebas tidak dipastikan.

Walaupun ketebalan sampel H' adalah pelbagai dalam kajian tersebut, daripada 0.8 mm sehingga 2.7 mm, kedalaman andas k direka bentuk daripada 0.25 mm sehingga 1.2 mm. Reka bentuk ini menghasilkan jurang aliran bebas sebanyak 0.3 mm. Walaupun penyelidik-penyelidik tersebut tidak melaporkan kewajaran pemilihan $j = 0.3$ mm, jurang aliran bebas tersebut dilihat menjadi amalan kebiasaan penyelidik HPT. Satu kajian lain oleh Yusuf et al. (2018) mendemonstrasikan jurang aliran bebas yang lebih besar iaitu antara 0.31 mm dan 0.36 mm. Faktor penggunaan jurang aliran bebas yang lebih besar ini mungkin disebabkan oleh pemprosesan bahan yang lebih keras iaitu keluli tahan karat 316L berbanding bahan yang digunakan dalam kajian yang terdahulu. Penemuan ini menjelaskan kepentingan untuk mengekalkan jurang aliran bebas yang optimum dan dalam masa yang sama mempertimbangkan kekuatan awal bahan yang diproses dalam menentukan konfigurasi andas yang optimum. Justeru, pendekatan simulasi sebegini dilihat memberi manfaat dalam menganggar jurang aliran bebas yang optimum, bersesuaian untuk pemprosesan sesebuah bahan.

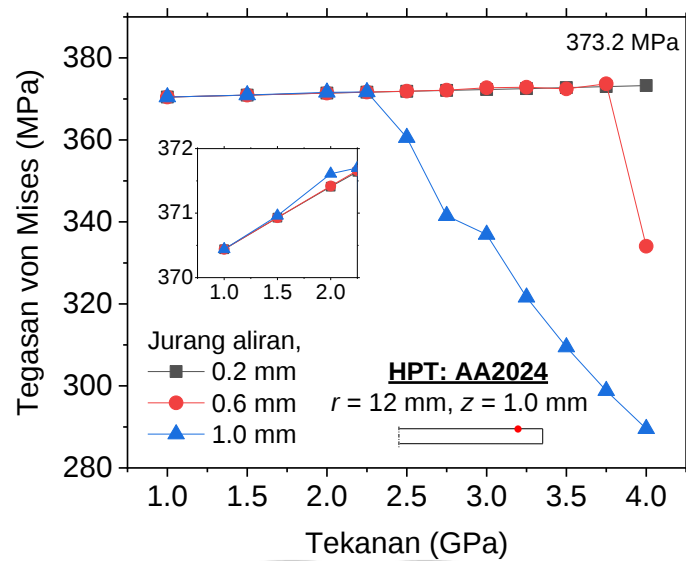
Rajah 4.32 menunjukkan pemerhatian taburan tekanan merentasi ketebalan sampel bagi konfigurasi tidak terkekang dengan $j = 1$ mm dan kuasi-terkekang yang diwakili oleh $j = 0.2$ mm. Dapat diperhatikan bahawa penurunan tekanan bagi kedudukan z yang berbeza bermula pada jejari yang hampir sama, iaitu $r \geq 8$ mm untuk konfigurasi tidak terkekang dan $r \geq 14$ mm untuk konfigurasi kuasi-terkekang. Bagi konfigurasi tidak terkekang, terdapat perbezaan yang ketara antara bahagian luar ($z = 0$ mm dan $z = 1$ mm) dan bahagian dalam sampel ($z = 0.5$ mm). Bahagian dalam sampel mengalami kejatuhan tekanan yang lebih tinggi berbanding bahagian luar. Ini disebabkan oleh kesan aliran keluar bahan yang berlaku pada bahagian ini. Sebaliknya, konfigurasi kuasi terkekang dengan $j = 0.2$ mm menghasilkan taburan tekanan yang lebih sekata merentasi ketebalan sampel kecuali pada kedudukan yang sangat menghampiri pinggir cakera ($r \geq 14.5$ mm).



Rajah 4.32 Taburan tekanan merentasi ketebalan sampel hasil anjakan paksian andas $u_z = 0.065$ mm, yang bersamaan dengan 4 GPa, dalam konfigurasi HPT (a) tidak terkekang dan (b) kuasi-terkekang.

Implikasi tekanan yang tidak homogen ini terhadap pembangunan tegasan diperhatikan. Rajah 4.33 menunjukkan perbezaan tegasan von Mises yang terjana pada permukaan atas sampel ($z = 1.0$ mm) di kedudukan jejari $r = 12$ mm dengan konfigurasi jurang aliran bebas andas yang berbeza. Jurang aliran ditetapkan antara $j = 0.2$ mm, iaitu keadaan menghampiri konfigurasi kekangan penuh, dan $j = 1.0$ mm, mewakili konfigurasi tidak terkekang. Jurang aliran $j = 0.2$ mm menunjukkan peningkatan tegasan von Mises akhir kepada 373.2 MPa dengan pembebanan paksian 4 GPa ini. Jurang aliran 0.6 mm dan 1.0 mm juga menunjukkan peningkatan tegasan pada fasa awal tekanan diberikan. Namun, berlaku penurunan tegasan dengan penambahan tekanan yang disebabkan oleh isipadu aliran keluar yang lebih banyak pada sempadan yang tidak terkekang menyebabkan kurang tekanan balikan terhasil. Bagi $j = 0.6$ mm, tegasan mula mengalami penurunan ketika tekanan mencapai 3.75 GPa. Untuk $j = 1.0$ mm pula, tegasan mengalami penurunan lebih awal iaitu pada 2.25 GPa.

Dapat diperhatikan bahawa penurunan tegasan adalah lebih besar dan lebih cepat pada $j = 1.0$ mm berbanding $j = 0.6$ mm. Oleh kerana tegasan dibuktikan berkadar terus dengan kekerasan, faktor perbezaan j ini menjelaskan kekurangan kekerasan yang



Rajah 4.33 Perbandingan evolusi tegasan pada jejari 12 mm sempadan atas sampel dengan jurang aliran 0.2 mm, 0.6 mm dan 1.0 mm (tidak terkekang).

diperoleh dalam kajian ini berbanding kajian HPT melibatkan AA2024 terdahulu yang berdiameter lebih kecil, seperti yang diberikan dalam Jadual 2.5. Ini kerana secara teori, pemprosesan HPT pada sampel dengan jejari yang lebih besar menghasilkan terikan kilas yang lebih besar. Walaupun begitu, dengan sampel berketebalan $H' = 1$ mm dan jumlah kedalaman andas $k = 0.5$ mm (0.25 mm kedalaman bagi setiap satu andas), j dalam kajian ini adalah 0.5 mm. Berdasarkan analisis simulasi aliran bahan, jurang ini cukup besar berbanding 0.2 mm untuk mengekalkan peningkatan tegasan sepanjang HPT. Oleh itu, berkemungkinan berlaku kejatuhan tekanan dengan jurang aliran 0.5 mm ini mengakibatkan ketirisan penguatan sampel HPT AA2024 berdiameter 30 mm ini.

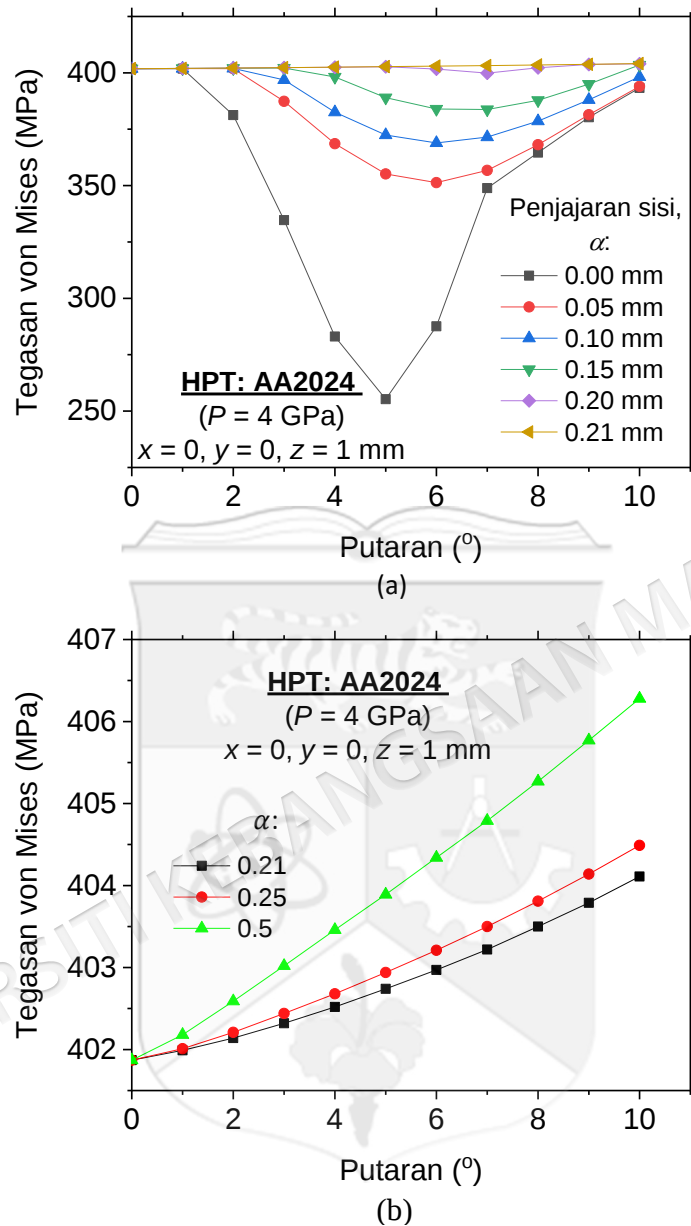
b. Kesan Penjajaran Andas

Terikan semasa peringkat beban mampatan adalah amat kecil ($\varepsilon < 1$) berbanding beban kilas (Song et al. 2014). Menurut teori ujian kilas asas pula, terikan di pusat cakera adalah sifar semasa pembebanan kilas. Sekiranya kedua-dua proses pembebanan mampatan dan kilas tersebut tidak mengenakan terikan yang tinggi terhadap pusat cakera, tegasan yang dialami juga seharusnya tidak ketara. Sebaliknya,

dapatan uji kaji sebenar menunjukkan pusat cakera turut mengalami penguatan yang signifikan dengan peningkatan bilangan putaran. Sebagai contoh, Müller et al. (2019) menunjukkan kekerasan pada pusat cakera mengalami sedikit peningkatan ($<10\%$) dengan $\frac{1}{4}$ putaran. Apabila terikan ditingkatkan sehingga dua putaran, kenaikan kekerasan adalah $> 30\%$ berbanding kekerasan awal. Alhajeri et al. (2016) pula merekodkan peningkatan kekerasan yang lebih ketara di pusat cakera iaitu hampir dua kali ganda (200%) berbanding kekerasan awal.

Dalam simulasi berangka ini, kelakuan penguatan turut dibuktikan pada keseluruhan sampel dengan pertambahan darjah putaran. Rajah 4.34 menunjukkan plot tegasan von Mises melawan sudut putaran andas pada pusat cakera (x_0, y_0) , bagi beberapa keadaan penjajaran, daripada penjajaran sempurna ($\alpha = 0$ mm) sehingga 0.21 mm ketidakjajaran. Dapat diperhatikan bahawa pusat cakera menunjukkan kelakuan pelembutan dengan keadaan penjajaran andas yang sempurna atau hampir sempurna ($\alpha \leq 0.2$ mm). Tegasan menurun dan kemudiannya meningkat, namun masih lebih rendah daripada kekuatan alah awal iaitu pada 400 MPa. Ia mempamerkan kelakuan pelembutan terikan dengan pemulihan. Kelakuan ini adalah penambahan kepada tiga corak evolusi tegasan pada sampel HPT yang dikenalpasti oleh Kawasaki et al. (2014) iaitu pengerasan terikan, pengerasan terikan dengan pemulihan dan pelembutan terikan. Walaupun tidak dibincangkan, kelakuan pelembutan dengan pemulihan ini dapat diperhatikan pada pusat cakera sampel HPT AA2024 yang dikaji oleh Vafaei et al. (2012).

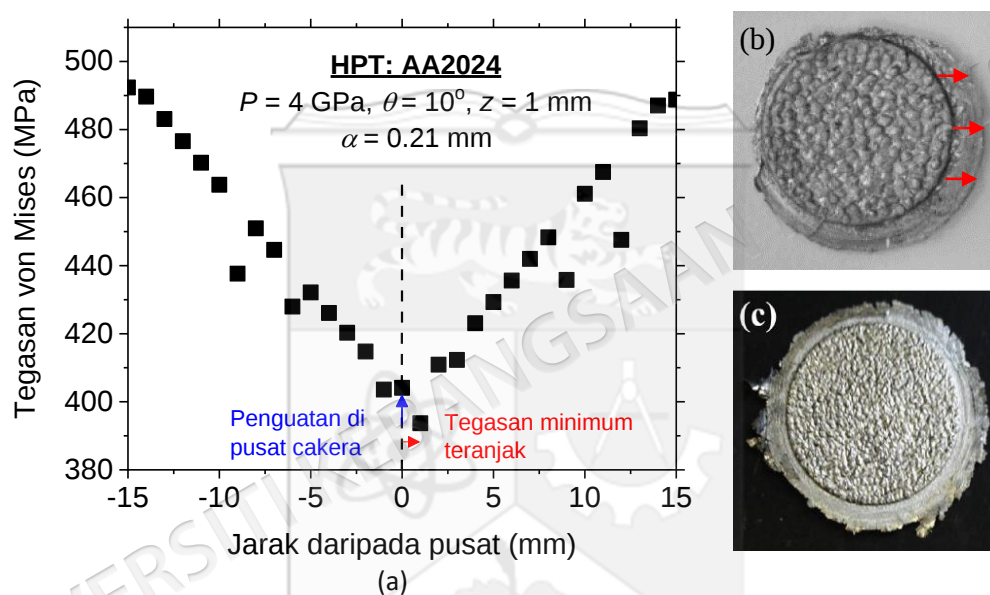
Sebaliknya, tegasan pada pusat cakera meningkat dengan anjakan pada penjajaran andas $\alpha \geq 0.2$ mm. Dengan penambahan putaran sebanyak 10° , penguatan berlaku sebanyak 0.6% bagi ketidakjajaran 0.21 mm dan meningkat kepada 1.1% bagi ketidakjajaran 0.5 mm. Walaupun hanya sedikit peningkatan tegasan dibuktikan dengan parameter ketidakjajaran yang dikaji, peningkatan yang lebih signifikan dijangkakan dengan sudut putaran yang lebih tinggi. Ini selaras dengan corak evolusi kehomogenan sampel HPT yang dibentangkan dalam seksyen 4.2.2 iaitu $\varepsilon \geq 50$ diperlukan bagi menghasilkan kehomogenan ciri pada sampel sepanjang jejarian dalam ubah bentuk plastik melampau HPT. Dapatan ini membuktikan andaian pengaruh penjajaran andas terhadap penguatan di pusat cakera yang dibuat oleh Shi et al. (2018).



Rajah 4.34 Aliran kelakuan tegasan Von Mises dengan peningkatan sudut putaran dengan beberapa keadaan ketidakjajaran: (a) pelembutan terikan dengan pemulihan, (b) pengerasan terikan.

Seperti yang dipersembahkan dalam Rajah 4.35(a), tegasan simetri yang miring ke arah suatu paksi tegasan minimum yang baru. Arah anjakan paksi baru ini adalah konsisten dengan arah ketidakjajaran paksi putaran $\alpha = 0.21$ mm. Dalam uji kaji sebenar, ketidakjajaran ini mungkin bersifat dinamik bergantung kepada darjah putaran, lalu menghasilkan penguatan pada semua jejari sampel. Peningkatan darjah

putaran seterusnya menghasilkan kehomogenan kekuatan merentasi dimensi sampel. Fenomena pengerasan di pusat cakera ini turut dilihat dalam uji kaji yang dilaporkan oleh Todaka et al. (2008), seperti Rajah 4.35(b). Walaupun perbincangan lanjut berkenaan peningkatan kekerasan di pusat cakera tidak disertakan dalam laporan tersebut, kejadian ketidakjajaran dijelaskan oleh pembentukan gerigis yang cenderung terbentuk ke satu bahagian pinggir sampel berbanding aliran keluar sekata ke semua arah jejarian sampel, seperti yang dipamerkan oleh kajian Okeke et al. (2019) dalam Rajah 4.35(c).



Rajah 4.35 Kebolehbandingan antara (a) profil tegasan hasil simulasi ketidakjajaran 0.21 mm, (b) pembentukan gerigis yang menyerupai keadaan ketidakjajaran andas dalam uji kaji HPT dengan penguatan ketara di pusat cakera (Todaka et al. 2008) dan (c) penghasilan gerigis yang sekata sepanjang perimeter sampel (Okeke et al. 2019).

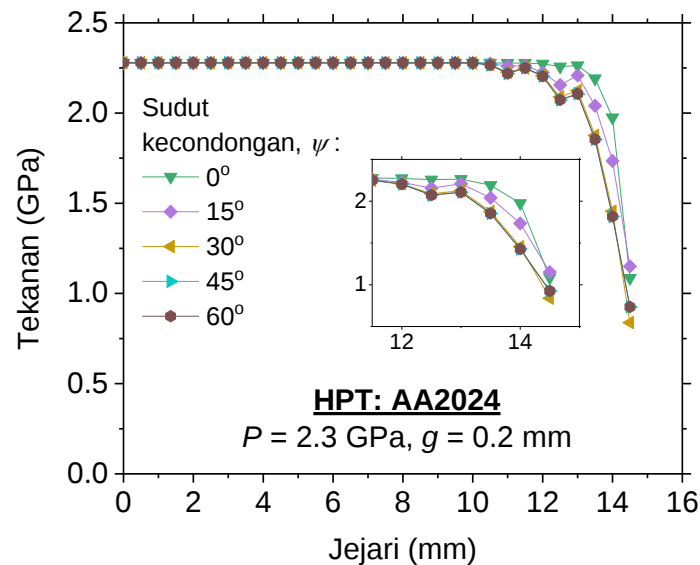
Penemuan ini menerangkan bahawa ketidakjajaran andas semasa HPT menyumbang kepada penguatan di pusat cakera. Walaupun begitu, penjajaran andas bukan merupakan faktor tunggal penguatan di pusat cakera. Sebaliknya, faktor peningkatan ubah bentuk selainnya seperti pengalihan beban (Pereira et al. 2015), permukaan sentuhan andas yang licin (Huang, Kawasaki et al. 2016) dan kekangan gerigis (Song et al. 2011) juga memberi kesan terhadap jumlah pengerasan di pusat cakera. Oleh kerana simulasi ini tidak mengambil kira faktor-faktor tersebut,

penguatan di pusat cakera adalah dijangka dengan ketidakjajaran yang lebih kecil daripada 0.2 mm. Dapatan ini membuktikan ketidakjajaran andas memberikan kesan positif terhadap penguatan sampel pada paksi putaran, sekaligus menyelesaikan kesulitan yang dialami dalam penetapan penjajaran andas sempurna dengan toleransi ± 0.01 semasa proses penyediaan mesin HPT.

c. Kesan Sudut Kecondongan Dinding

Sehingga kini, kajian yang melaporkan tentang sudut kecondongan dinding andas adalah amat terhad. Terdapat kajian yang melaporkan konfigurasi dinding andas berserenjang dengan permukaan lekukan andas (Alhajeri et al. 2016; Borodachenkova et al. 2015; Li et al. 2020) dan terdapat juga kajian yang melaporkan kecondongan konfigurasi dinding andas tanpa perincian yang spesifik (Han et al. 2017; Kawasaki & Langdon 2017). Sementara itu, antara sudut kecondongan dinding andas yang didokumenkan dengan jelas, termasuk 5° (Sakai et al. 2006), 15° (Panda et al. 2017), 22° (Figueiredo et al., 2012; Pereira et al., 2015) dan 45° (Edalati et al. 2016). Kajian-kajian ini menggariskan objektif yang berbeza. Maka kesan sudut kecondongan terhadap aliran tegasan masih belum dibincangkan. Dalam seksyen 4.5.2a, jurang aliran bebas $j = 0.21$ mm menunjukkan taburan tekanan yang sekata. Oleh yang demikian, j berkenaan dimalarkan untuk pemerhatian kesan kecondongan dinding andas terhadap kelakuan aliran tegasan AA2024.

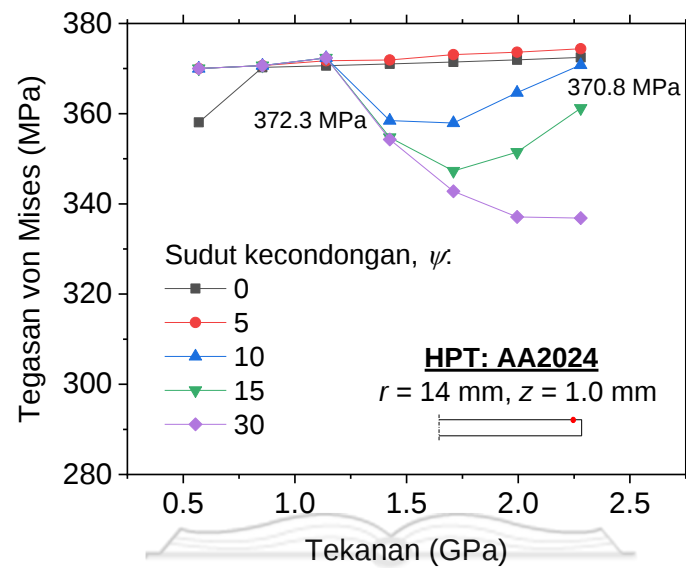
Rajah 4.36 menunjukkan taburan tekanan merentasi jejari sampel dengan penggunaan sudut kecondongan andas yang berbeza. Walaupun tekanan yang sama dikenakan ke atas sampel, perbezaan sudut kecondongan dinding andas menghasilkan kejatuhan tekanan yang berbeza pada jejari luar ($r \geq 12$ mm). Dapat diperhatikan bahawa dengan pertambahan sudut kecondongan dinding, ketidakseragaman tekanan sedikit meningkat. Ini adalah disebabkan lebih banyak isipadu bahan dibenarkan untuk mengalir keluar, sekaligus mengakibatkan lebih banyak kejatuhan tekanan pada kedudukan menghampiri pinggir cakera.



Rajah 4.36 Taburan tekanan sepanjang jejari sampel, dengan kepelbagaian sudut kecondongan dinding andas.

Rajah 4.37 menunjukkan evolusi tegasan von Mises dengan peningkatan tekanan pada jejari $r = 14$ mm permukaan atas sampel ($z = 1.0$ mm). Pada permulaan fasa tekanan sehingga $P \sim 1.25$ GPa, kenaikan tegasan dapat dilihat bagi semua konfigurasi sudut kecondongan dinding andas. Namun, dengan sudut kecondongan minimum $\psi = 10^\circ$, berlaku penurunan tegasan. Penurunan tegasan ini menjadi lebih ketara dengan pertambahan sudut kecondongan kepada 30° . Walaupun sesaran andas maksimum pada 0.065 mm menghasilkan perbezaan tekanan yang tidak ketara seperti yang dibuktikan dalam Rajah 4.36, perbezaan tegasan yang terhasil dengan perbezaan konfigurasi sudut kecondongan dinding andas adalah signifikan. Penurunan tegasan ini adalah disebabkan oleh konfigurasi sampel yang membenarkan sejumlah aliran bahan pada pinggir sampel.

Secara ideal, $\psi = 0$ menghasilkan evolusi tegasan yang terbaik kerana tidak berlaku sebarang penurunan tegasan semasa tekanan ditingkatkan, disebabkan oleh aliran bahan hanya dibenarkan pada jurang aliran bebas. Namun, dalam keadaan sebenar, sudut yang terlalu tajam boleh mengganggu kelancaran aliran tegasan berhampiran dinding. Ketaklinearan geometri yang tinggi menghasilkan zon logam mati pada kawasan penjuru kedalaman andas (Lee et al. 2012). Oleh yang demikian, suatu kecerunan pada dinding andas diperlukan bagi mengatasi kekurangan tersebut.



Rajah 4.37 Evolusi tegasan pada jejari $r = 14$ mm permukaan atas sampel ($z = 1.0$ mm) dengan perbezaan sudut kecondongan dinding andas ψ daripada 0° sehingga 30° .

Analisis kesan kecondongan dinding terhadap tegasan menunjukkan nilai maksimum pada $\psi = 10^\circ$. Walaupun evolusi tegasan menurun pada awalnya, pemulihan tegasan berlaku yang mana tegasan kembali meningkat kepada 370.8 MPa dengan peningkatan tekanan, menghampiri tegasan sebelum berlakunya penurunan iaitu 372.3 MPa. Pada $\psi = 15^\circ$ berlaku pemulihan tegasan. Namun, nilai tegasan akhir pada tekanan maksimum masih kurang berbanding tegasan awal sebelum penurunan tegasan. Walau bagaimanapun, semakin tinggi kecondongan dinding, semakin rendah tegasan akhir yang terhasil. Pada $\psi = 30^\circ$ pemulihan tegasan tidak berlaku. Sudut kecondongan dinding yang lebih besar ($\psi > 30^\circ$) juga menghasilkan corak tegasan yang sama seperti $\psi = 30^\circ$. Dapatan ini turut menjelaskan, selain daripada peranan tekanan dalam mengumpulkan kecacatan dan mempercepatkan penghalusan ira (Bazarnik et al. 2016), fasa mampatan juga dibuktikan boleh menyumbang kepada pengerasan terikan dengan konfigurasi $\psi \geq 10^\circ$.

4.6 RUMUSAN HASIL KAJIAN

Dalam bab ini, dapatan kajian telah dibentangkan dan sumbangan daripada setiap dapatan telah dibincangkan. Seksyen 4.2 membuktikan penambahbaikan ciri mekanikal dan mikrostruktur AA2024 yang dicapai melalui pemprosesan HPT. Berdasarkan sifat bahan yang diukur, model evolusi sifat mekanikal dengan penambahan terikan HPT kemudiannya diterbitkan dalam seksyen 4.3. Model analitikal ini digunakan untuk penentusahan model simulasi berangka HPT, seperti yang diterangkan dalam seksyen 4.4. Kebolehbandingan yang baik antara keputusan uji kaji dan simulasi sekaligus mengesahkan andaian yang dibuat dalam implementasi pengiraan. Seterusnya dalam seksyen 4.5, fenomena aliran tegasan dan parameter pemprosesan optimum dirungkai melalui analisis simulasi HPT menggunakan pendekatan kaedah unsur terhingga. Berdasarkan analisis dan perbincangan terperinci yang dihuraikan dalam bab ini, kesimpulan kajian dibuat dalam bab yang seterusnya. Sumbangan kajian terhadap bidang penyelidikan penguatan bahan termaju dan cadangan kajian masa hadapan turut dirumuskan.

BAB V

KESIMPULAN DAN CADANGAN

5.1 PENGENALAN

Dalam tesis ini, perincian kelakuan bahan logam ringan AA2024 yang diproses HPT telah diteliti melalui permodelan unsur terHINGGA. Model simulasi menyediakan suatu bentuk analisis yang menyeluruh terhadap ketidakpastian dalam proses penguatan HPT, merangkumi aspek sampel, peralatan dan parameter pemprosesan. Beberapa siri uji kaji dan permodelan analitikal turut dilaksanakan sebagai pelengkap proses permodelan simulasi berangka. Bab ini akan merumuskan kajian ini secara keseluruhan. Seterusnya, beberapa cadangan bagi tujuan penambahbaikan juga dibincangkan bagi tujuan kesinambungan kajian pada masa hadapan.

5.2 KESIMPULAN KAJIAN

Berdasarkan dapatan kajian yang dibincangkan dalam Bab IV, objektif kajian telah dicapai. Kesimpulan kajian ini distrukturkan kepada empat perkara utama mengikut objektif kajian yang telah digariskan. Pencapaian objektif kajian ini dicapai dalam setiap fasa kajian iaitu uji kaji, permodelan analitikal, penentusahan dan analisis berparameter, seperti berikut.

1. *Uji kaji*: Sifat mekanikal dan mikrostruktur aloi aluminium AA2024 telah ditingkatkan melalui ubah bentuk plastik melampau HPT. Kekerasan AA2024 berdiameter 30 mm berjaya ditingkatkan sehingga 230 Hv iaitu sebanyak 68.4% daripada kekerasan awal (137 MPa). Satu parameter kecerunan pengerasan M_D

telah diperkenalkan sebagai suatu perkakas dalam perancangan uji kaji untuk mengukur pencapaian ketepuan pengerasan bahan dengan penambahan bilangan putaran bagi sesebuah set uji kaji HPT. Dalam masa yang sama, kekuatan tegangan turut ditingkatkan sehingga 885.1 MPa iaitu sebanyak 88.7% berbanding kekuatan awal (469 MPa). Penguatan AA2024 ini disertai dengan pengurangan kemuluran namun terikan patah 15.5% yang direkodkan masih memadai untuk bahan logam. Analisis XRD membuktikan berlaku pengecilan saiz ira sehingga 27.2 nm, sekaligus mengesahkannya sebagai mekanisma penguatan AA2024 yang dominan.

2. *Analitikal*: Suatu model empirik evolusi kekerasan sampel HPT AA2024 dalam fungsi bilangan putaran dan jarak daripada pusat telah dicadangkan, dengan C, d, F dan g sebagai pemalar bahan. Pemalar bahan ini boleh mewakili kelakuan pengerasan bahan secara umum, merangkumi magnitud pengerasan, kebergantungan H terhadap jarak daripada pusat putaran, kadar ketepuan pengerasan dan kebergantungan kadar ketepuan terhadap r . Pemalar ini boleh mencirikan kelakuan pengerasan sesebuah bahan secara bandingan.

Seterusnya, fungsi penguatan bagi model keplastikan aloi aluminium AA2024 terproses HPT dalam sebutan kekerasan telah diterbitkan secara analitikal melalui model I dan II. Dalam model I, parameter η diperkenalkan bagi mewakili nisbah penguatan-pengerasan. Menggunakan teknik padanan lengkung, model I ditambahbaik menjadi model II dengan $R^2 = 0.85$. Model yang dibangunkan menyediakan kapasiti pengiraan taburan kekuatan sampel secara komprehensif pada sebarang pembebanan dan koordinat geometri sampel. Kelebihan model II ini mengatasi cabaran penyediaan sampel ujian tegangan yang terhad, dalam pencirian penguatan bahan HPT secara menyeluruh.

3. *Penentusahan*: Model simulasi HPT yang diformulasikan menggunakan persamaan menjujuk elastoplastik melalui kaedah unsur terhingga telah ditentusahkan. Pengiraan terikan dan tegasan daripada simulasi berangka

menunjukkan kebolehbandingan yang tinggi dengan ramalan formulasi analitikal mahupun uji kaji sebenar. Selain itu, kajian ini turut menggariskan ketidaktepatan penggunaan fungsi pengerasan plastik sempurna, khususnya pada peringkat penguatan sebelum mencapai tahap ketepuan.

4. *Analisis berparameter*: Analisis berparameter berdasarkan model simulasi berangka yang telah ditentukan menunjukkan keupayaannya dalam mengawal aliran keplastikan bahan pada setiap peringkat pembebanan. Analisis kepelbagaian jejari dan ketebalan sampel menepati ramalan teori yang mana penguatan adalah lebih tinggi pada sampel yang lebih besar dan nipis. Perkara yang menarik untuk digariskan ialah nisbah bidang $H'/D < 0.2$ perlu dipastikan bagi menghasilkan kehomogenan tegasan merentasi ketebalan sekurang-kurangnya sehingga $r/R = 0.6$. Corak aliran tegasan yang lebih rendah menghampiri paksi putaran mendemonstrasikan potensi aplikasi berbentuk cincin mahupun silinder berongga.

Pengubahsuaian konfigurasi andas juga mempengaruhi aliran tegasan setempat bahan HPT AA2024. Kesan konfigurasi andas terhadap aliran tegasan juga membuktikan konfigurasi andas kuasi terkekang dengan jurang aliran bebas $j \leq 0.2$ mm menghasilkan taburan tekanan pada sampel AA2024 ini yang lebih sekata merentasi ketebalan sampel kecuali pada kedudukan yang sangat menghampiri pinggir cakera. Jurang aliran bebas yang optimum dibuktikan berperanan dalam meningkatkan keupayaan penguatan sampel kesan tekanan balikan yang seragam. Di samping itu, ketidakjajaran andas $\alpha > 0.2$, adalah positif sebagai faktor penguatan di pusat cakera. Penjajaran sempurna sebaliknya cenderung untuk mempamerkan kelakuan pelembutan terikan dengan pemulihan. Namun begitu, ketidakjajaran yang lebih kecil daripada 0.2 mm juga dijangkakan menghasilkan penguatan di pusat cakera sekiranya faktor lain yang mempengaruhi ubah bentuk, seperti kekasaran permukaan sentuhan andas dan kekangan gerigis, diambil kira. Berbanding dua faktor konfigurasi andas yang telah disebutkan, sudut kecondongan dinding andas ψ pula didapati memberi kesan yang minimal terhadap penurunan tekanan.

Namun begitu, perbezaan tegasan yang terhasil dengan perbezaan konfigurasi sudut kecondongan dinding andas adalah signifikan. $\psi \leq 10^\circ$ diperlukan bagi memastikan peningkatan tegasan dengan penambahan tekanan. Analisis berparameter ini sekaligus membuktikan bahawa pembebanan paksian dalam fasa mampatan juga turut berpotensi untuk menyumbang kepada pengerasan terikan semasa proses HPT.

5.3 SUMBANGAN KAJIAN

Impak kajian ini adalah besar kerana membantu mempercepatkan pembangunan HPT meliputi pelbagai aspek. Transformasi aloi aluminium kekuatan tinggi untuk aplikasi kejuruteraan, khususnya automotif dan aeronautik, merancakkan lagi usaha ke arah penyelesaian masalah global iaitu penjimatan bahan api untuk mengurangkan kesan rumah hijau sedunia. Berdasarkan dapatan yang telah dibentangkan, sumbangan kajian ini diringkaskan seperti berikut:

1. *Penghasilan AA2024 kekuatan tinggi dengan diameter yang diperbesarkan:*

Dalam kajian ini, satu set parameter pemprosesan HPT, iaitu $P = 4$ GPa, $\omega = 0.2$ rpm dan N sehingga 6 putaran telah berjaya meningkatkan ciri mekanikal dan mikrostruktur AA2024 berdiameter 30 mm dalam suhu persekitaran. Sehingga kini, saiz sampel HPT AA2024 yang dihasilkan ini adalah antara pencapaian tertinggi berbanding 10 mm yang lazimnya dilaporkan. Dapatan ini adalah penting dan seiring dengan usaha penyelidikan HPT di seluruh dunia dalam meningkatkan skala sampel HPT ke arah penyediaan prospek aplikasi yang lebih besar.

2. *Sumbangan metodologi:* Pengenalan parameter M_D , η dan pemalar bahan C , d , F dan g berperanan sebagai indikator ciri kelakuan penguatan bahan semasa HPT. Parameter yang dicadangkan ini membantu merancang pemprosesan HPT dengan lebih baik, khususnya dalam menentukan magnitud dan tahap ketepuan pengerasan untuk pengubahsuaian parameter pemprosesan yang berkaitan. Dengan ini, kos dan masa uji cuba dapat disingkatkan. Parameter ini juga

berguna untuk pengelasan bahan HPT dalam memahami corak penguatan bahan melalui ubah bentuk HPT dengan lebih menyeluruh.

3. *Sumbangan praktikal:* Pengukuran kekerasan diketahui lebih menyeluruh pada pelbagai arah jejari sampel, berbanding pengukuran tegasan melalui ujian tegangan. Sehingga kini, tiada penyelidik yang mengintegrasikan evolusi kekuatan dan kekerasan untuk ramalan tegasan setempat, khususnya pada sebarang parameter pemprosesan dan koordinat dimensi sampel. Pendekatan ini dilihat amat praktikal bagi mengatasi kekangan dalam penyediaan sampel ujian tegangan daripada sampel HPT yang bersaiz kecil mahupun pendekatan mikro mekanik yang lebih rumit. Justeru, penentuan keutuhan sampel yang diproses adalah lebih praktikal, komprehensif dan efektif.
4. *Kawalan ubah bentuk:* Model simulasi berangka yang dicadangkan berjaya menyingkap fenomena aliran bahan pada setiap peringkat pembebanan untuk kawalan ubah bentuk yang lebih sistematik. Penelitian aliran bahan ini telah membuktikan beberapa elemen yang perlu dititikberatkan dalam usaha pembesaran sampel dan peningkatan kekuatan maksimum menggunakan konfigurasi uji kaji dan peralatan sedia ada.

Pada masa kini, kajian berkenaan permodelan proses HPT masih terhad. Secara keseluruhannya, model keplastikan bahan melalui simulasi berangka menyokong perkembangan HPT terutamanya bagi penelitian parameter yang tidak praktikal untuk dianalisis melalui pendekatan uji kaji. Kejuruteraan pemprosesan bahan terintegrasi komputer mendorong kepada peningkatan produktiviti, mengurangkan kos pembuatan, penjimatan bahan dan penambahbaikan kualiti produk yang diproses. Kesan parameter pemprosesan terhadap ciri mekanikal dan juga mikrostruktur dapat dianggarkan dengan tepat melalui pendekatan analisis yang lebih sistematik. Sumbangan kajian ini dan implikasi terhadap bidang pemprosesan bahan menerusi pendekatan ubah bentuk plastik melampaui diringkaskan dalam Jadual 5.1. Sehubungan itu, beberapa perkara dicadangkan dalam bahagian seterusnya untuk kesinambungan kajian di masa hadapan.

Jadual 5.1 Pengubahsuaian sifat mekanikal dan mikrostruktur bagi beberapa jenis bahan yang diproses menggunakan teknik HPT.

Bil.	Sumbangan kajian	Implikasi terhadap bidang
1.	AA2024 dengan kekuatan yang ditingkatkan. ^a	Pembesaran sampel AA2024 yang diproses HPT daripada 10 mm yang biasa dilaporkan kepada 30 mm meluaskan prospek aplikasi.
2.	Parameter nisbah penguatan-pengerasan, η . ^b	Pengkelasan bahan HPT mengikut evolusi kecerunan kekuatan-kekerasan sesebuah bahan.
3.	Parameter potensi pengerasan M_D . ^b	Kawalan keupayaan pengubahsuaian parameter pemprosesan bilangan putaran N terhadap keupayaan penguatan sepanjang jejari sampel r .
4.	Pemalar pengerasan bahan, C, d, F dan g . ^b	Indikator kelakuan pengerasan terikan yang menentukan kadar pengerasan dan kadar ketepuan pengerasan sesebuah bahan.
5.	Model integrasi evolusi kekuatan-kekerasan. ^c	Penentuan tegasan setempat σ sampel pada sebarang N dan r , khususnya untuk AA2024.
6.	Model simulasi menggunakan persamaan menjujuk yang ditentukan. ^d	Kawalan ubah bentuk HPT: 1. Kawalan ketidakpastian aliran bahan yang lebih menyeluruh merangkumi aspek geometri sampel, andas dan parameter pemprosesan. 2. Potensi penambahan kekuatan bahan menggunakan konfigurasi uji kaji sedia ada. 3. Potensi penambahan kekuatan melalui pengubahsuaian konfigurasi uji kaji, khususnya dimensi sampel dan andas.

^aAspek penghasilan produk,

^bAspek metodologi (pencirian dan pengkelasan),

^cAspek praktikal,

^dAspek kawalan ubah bentuk

5.4 CADANGAN KAJIAN LANJUTAN

Sebagai kesinambungan kajian lanjut pada masa hadapan, berikut adalah cadangan penambahbaikan untuk dikembangkan sebagai skop penguatan bahan menggunakan teknik HPT. Ia merangkumi cadangan untuk kerja simulasi dan uji kaji.

1. Pengetahuan pada skala mikro juga penting untuk memahami perincian kelakuan pengerasan bahan HPT. Oleh itu, satu model berangka yang mengintegrasikan antara pendekatan mikro dan makro mekanik dicadangkan.
2. Pemprosesan HPT untuk sesetengah jenis bahan telah dibuktikan mempunyai sifat kebergantungan kadar yang memerlukan model elasto-viscoplastik atau tegar-viscoplastik dipertimbangkan. Sehubungan itu, simulasi berangka memerlukan beberapa pembangunan algoritma untuk mensimulasikan kelakuan ini.
3. Pembangunan analisis termo-mekanikal terganding dilihat bermanfaat kerana sifat superplastik bahan HPT yang dicapai pada suhu tinggi semakin mendapat perhatian penyelidik HPT. Selain itu, faktor geseran gerigis yang diabaikan dalam kajian ini juga berkait rapat dengan penjanaan haba. Pengenalan kepada lebih banyak pembolehubah membolehkan lebih banyak ketidakpastian dalam fenomena HPT diselesaikan. Untuk itu, formulasi berkaitan proses termo-mekanikal ini perlu diperincikan.
4. Analisis lanjutan berkaitan permukaan alah untuk bahan HPT menggunakan peralatan ujian tegasan pada pelbagai paksi perlu dipertimbangkan. Ujian ini mungkin memberikan maklumat tambahan untuk mendapatkan permukaan kegagalan bagi bahan yang dikaji.

RUJUKAN

- Abd El Aal, M. I. & Kim, H. S. 2014. Wear properties of high pressure torsion processed ultrafine grained Al-7%Si alloy. *Materials and Design* 53: 373–382.
- Abd El Aal, M. I., Yoon, E. Y. & Kim, H. S. 2013. Recycling of AlSi8Cu3 alloy chips via high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 560: 121–128.
- Ahmadkhaniha, D., Huang, Y., Jaskari, M., Ja, A., Zanella, C., Karjalainen, L. P. & Langdon, T. G. 2018. Effect of high-pressure torsion on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of cast pure Mg. *J Mater Sci* 53: 16585–16597.
- Akbarpour, M. R., Farvizi, M., Lee, D. J., Rezaei, H. & Kim, H. S. 2015. Effect of high-pressure torsion on the microstructure and strengthening mechanisms of hot-consolidated Cu-CNT nanocomposite. *Materials Science and Engineering A* 638: 289–295.
- Al-Tabbakh, A. A., Karatepe, N., Al-Zubaidi, A. B., Benchaabane, A. & Mahmood, N. B. 2019. Crystallite size and lattice strain of lithiated spinel material for rechargeable battery by X-ray diffraction peak - broadening analysis. *International Journal of Energy Research* 1: 1–9.
- Alhajeri, S. N., Al-Fadhalah, K. J., Almazrouee, A. I. & Langdon, T. G. 2016. Microstructure and microhardness of an Al-6061 metal matrix composite processed by high-pressure torsion. *Materials Characterization* 118: 270–278.
- Alhamidi, A. & Horita, Z. 2015. Grain refinement and high strain rate superplasticity in aluminium 2024 alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 622: 139–145.
- Almazrouee, A. I., Al-Fadhalah, K. J., Alhajeri, S. N. & Langdon, T. G. 2015. Microstructure and microhardness of OFHC copper processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 641: 21–28.
- Andreau, O., Gubicza, J., Zhang, N. X., Huang, Y., Jenei, P. & Langdon, T. G. 2014. Effect of short-term annealing on the microstructures and flow properties of an Al-1% Mg alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 615: 231–239.
- Asghari-Rad, P., Sathiyamoorthi, P., Bae, J. W., Shahmir, H., Zargarani, A. & Kim, H. S. 2020. Effect of Initial Grain Size on Deformation Mechanism during High-Pressure Torsion in V₁₀Cr₁₅Mn₅Fe₃₅Co₁₀Ni₂₅ High-Entropy Alloy. *Advanced Engineering Materials* 22: 1–9.
- Asgharzadeh, A., Tiji, S. A. N., Esmailpour, R., Park, T. & Pourboghrat, F. 2020. Determination of hardness-strength and -flow behavior relationships in bulged

- aluminum alloys and verification by FE analysis on Rockwell hardness test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106: 315–331.
- Ashida, M., Chen, P., Doi, H., Tsutsumi, Y., Hanawa, T. & Horita, Z. 2015. Superplasticity in the Ti-6Al-7Nb alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 640: 449–453.
- ASTM-E8/E8M-13a. 2013. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. West Conshohocken, United States.
- Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., Yanagida, A. 2008. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(2):716–735.
- Baik, S. C., Estrin, Y., Kim, H. S. & Hellmig, R. J. 2003. Dislocation density-based modeling of deformation behavior of aluminium under equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A* 351(1–2): 86–97.
- Bazarnik, P., Huang, Y., Lewandowska, M. & Langdon, T. G. 2018. Enhanced grain refinement and microhardness by hybrid processing using hydrostatic extrusion and high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 712: 513–520.
- Bazarnik, P., Huang, Y., Lewandowska, M. & Langdon, T. G. 2015. Structural impact on the Hall-Petch relationship in an Al-5Mg alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 626: 9–15.
- Bazarnik, P., Romelczyk, B., Huang, Y., Lewandowska, M. & Langdon, T. G. 2016. Effect of applied pressure on microstructure development and homogeneity in an aluminium alloy processed by high-pressure torsion. *Journal of Alloys and Compounds* 688(Part B): 736–745.
- Beygelzimer, Y., Kulagin, R., Toth, L. S. & Ivanisenko, Y. 2016. The self-similarity theory of high pressure torsion. *Beilstein Journal of Nanotechnology* 7(1): 1267–1277.
- Bhovi, P. M., Patil, D. C., Kori, S. A., Venkateswarlu, K., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2016. A comparison of repetitive corrugation and straightening and high-pressure torsion using an Al-Mg-Sc alloy. *Journal of Materials Research and Technology* 5(4): 353–359.
- Boldyrev, I. S., Shchurov, I. A. & Nikonov, A. V. 2016. Numerical Simulation of the Aluminum 6061-T6 Cutting and the Effect of the Constitutive Material Model and Failure Criteria on Cutting Forces' Prediction. *Procedia Engineering* 150: 866–870.
- Borodachenkova, M., Barlat, F., Wen, W., Bastos, A. & Grácio, J. J. 2015. A microstructure-based model for describing the material properties of Al-Zn alloys

- during high pressure torsion. *International Journal of Plasticity* 68: 150–163.
- Borodachenkova, Marina, Wen, W. & Pereira, A. M. de B. 2017. High-Pressure Torsion-Experiments and Modeling. *Severe Plastic Deformation Techniques*. Bab 4. Hlm. 93–112. Intech, Rijeka, Croatia.
- Bourezg, Y. I., Hiba, A., Baudin, T., Helbert, A., Huang, Y., Bradai, D. & Langdon, T. G. 2018. Texture and microhardness of Mg-Rare Earth (Nd and Ce) alloys processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 724: 477–485.
- Bridgman, P. W. 1935. Effects of high shearing stress combined with high hydrostatic pressure. *Physical Review* 48(10): 825–847.
- Busby, J. T., Hash, M. C. & Was, G. S. 2005. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials* 336(2–3): 267–278.
- Cardarelli Francois. 2008. *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*, Edisi kedua. Springer-Verlag, London.
- Casadei A. & Broda R. 2008. *Impact of Vehicle Weight Reduction on Fuel Economy for Various Vehicle Architectures*. RD.07/71602.2. Ricardo Inc. for The Aluminum Association, Inc.
- Çavusoğlu, O., Toros, S., Gürün, H. & Güral, A. 2018. Warm deformation and fracture behaviour of DP1000 advanced high strength steel. *Ironmaking and Steelmaking* 45(7): 618–625.
- Cepeda-Jiménez, C. M., Orozco-Caballero, A., Garcia-Infanta, J. M., Zhilyaev, A. P., Ruano, O. A. & Carreño, F. 2014. Assessment of homogeneity of the shear-strain pattern in Al-7wt%Si casting alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 597: 102–110.
- Chastel, Y., Logé, R. & Bernacki, M. 2012. Techniques for modelling microstructure in metal forming processes. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. Bab 2. Woodhead Publishing Limited. Edisi pertama.
- Cheah L. W. 2010. *Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S.* PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Chen, Y., Gao, N., Sha, G., Ringer, S. P. & Starink, M. J. 2015. Strengthening of an Al-Cu-Mg alloy processed by high-pressure torsion due to clusters, defects and defect-cluster complexes. *Materials Science and Engineering A* 627: 10–20.
- Chen, Y., Gao, N., Sha, G., Ringer, S. P. & Starink, M. J. 2016. Microstructural evolution, strengthening and thermal stability of an ultrafine-grained Al-Cu-Mg alloy. *Acta Materialia* 109: 202–212.

- Dai, Q., Kelly, J. & Elgowainy, A. 2016. *Vehicle Materials: Material Composition of U.S. Light-duty Vehicles*. IL, United States.
- Deepracha, S., Vibulyaseak, K. & Ogawa, M. 2019. Complexation of TiO_2 With Clays and Clay Minerals for Hierarchically Designed Functional Hybrids. Dlm. Ariga (pnyt.) & Aono (pnyt.). *Advanced Supramolecular Nanoarchitectonics: Micro and Nanotechnologies*. Hlm. 125–150. Elsevier Inc.
- Descartes, S., Desrayaud, C. & Rauch, E. F. 2011. Inhomogeneous microstructural evolution of pure iron during high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 528(10–11): 3666–3675.
- Dewhurst, P., Collins, I. F. & Johnson, W. 1974. A theoretical and experimental investigation into asymmetrical hot rolling. *International Journal of Mechanical Sciences* 16(6): 389–397.
- Dobatkin, S. V., Gubicza, J., Shangina, D. V., Bochvar, N. R. & Tabachkova, N. Y. 2015. High strength and good electrical conductivity in Cu-Cr alloys processed by severe plastic deformation. *Materials Letters* 153: 5–9.
- Dobatkin, S. V., Rokhlin, L. L., Lukyanova, E. A., Murashkin, M. Y., Dobatkina, T. V. & Tabachkova, N. Y. 2016. Structure and mechanical properties of the Mg-Y-Gd-Zr alloy after high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 667: 217–223.
- Dobatkin, Sergey V., Bastarache, E. N., Sakai, G., Fujita, T., Horita, Z. & Langdon, T. G. 2005. Grain refinement and superplastic flow in an aluminum alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 408(1–2): 141–146.
- Edalati, K. 2019. Metallurgical Alchemy by Ultra-Severe Plastic Deformation via High-Pressure Torsion Process. *Materials Transactions* 60(7): 1221–1229.
- Edalati, K., Akiba, E. & Horita, Z. 2018. High-pressure Torsion for New Hydrogen Storage Materials. *Science and Technology of Advanced Materials* 19(1): 185–193.
- Edalati, K., Fujioka, T. & Horita, Z. 2009. Evolution of Mechanical Properties and Microstructures with Equivalent Strain in Pure Fe Processed by High Pressure Torsion. *Materials Transactions* 50(1): 44–50.
- Edalati, K. & Horita, Z. 2015. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988. *Materials Science and Engineering A* 652: 325–352.
- Edalati, K., Horita, Z. & Langdon, T. G. 2009. The significance of slippage in processing by high-pressure torsion. *Scripta Materialia* 60: 9–12.
- Edalati, K., Lee, D. J., Nagaoka, T., Arita, M., Kim, H. S., Horita, Z. & Pippan, R. 2016a. Real Hydrostatic Pressure in High-Pressure Torsion Measured by Bismuth Phase Transformations and FEM Simulations. *Materials Transactions* 57(4): 533–538.

- Edalati, K., Miresmaeili, R., Horita, Z., Kanayama, H. & Pippan, R. 2011. Significance of temperature increase in processing by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 528(24): 7301–7305.
- Edalati, K., Uehiro, R., Fujiwara, K., Ikeda, Y., Li, H., Sauvage, X., Valiev, R. Z. et al. 2017. Ultra-severe plastic deformation: Evolution of microstructure, phase transformation and hardness in immiscible magnesium-based systems. *Materials Science and Engineering A* 701: 158–166.
- Eskandarzade, M., Masoumi, A., Faraji, G., Mohammadpour, M. & Yan, X. S. 2017. A new designed incremental high pressure torsion process for producing long nanostructured rod samples. *Journal of Alloys and Compounds* 695: 1539–1546.
- Estrin, Y., Molotnikov, A., Davies, C. H. J. & Lapovok, R. 2008. Strain gradient plasticity modelling of high-pressure torsion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 56(4): 1186–1202.
- Fell, C. R., Qian, D., Carroll, K. J., Chi, M., Jones, J. L. & Meng, Y. S. 2013. Correlation Between Oxygen Vacancy, Microstrain, and Cation Distribution in Lithium-Excess Layered Oxides During the First Electrochemical Cycle. *Chemistry of Materials* 25(9), 1621–1629.
- Feng, B. & Levitas, V. I. 2017. Plastic flows and strain-induced alpha to omega phase transformation in zirconium during compression in a diamond anvil cell: Finite element simulations. *Materials Science and Engineering A* 680: 130–140.
- Fentahun, M. A. & Savas, M. A. 2018. Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts. *International Journal of Materials Engineering* 8(3): 40–54.
- Figueiredo, R. B., Aguilar, M. T. P., Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2012a. Analysis of plastic flow during high-pressure torsion. *Journal of Materials Science* 47(22): 7807–7814.
- Figueiredo, R. B., Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2011. Using finite element modeling to examine the flow processes in quasi-constrained high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 528(28): 8198–8204.
- Figueiredo, R. B., De Faria, G. C. V, Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2013. Three-dimensional analysis of plastic flow during high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*, 48(13): 4524–4532.
- Figueiredo, R. B. & Langdon, T. G. 2019. Processing Magnesium and Its Alloys by High-Pressure Torsion: An Overview. *Advanced Engineering Materials* 21: 1–15.
- Figueiredo, R. B., Pereira, P. H. R., Aguilar, M. T. P., Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2012b. Using finite element modeling to examine the temperature distribution in quasi-constrained high-pressure torsion. *Acta Materialia*, 60(6–7): 3190–3198.

- Gajdics, M., Calizzi, M., Pasquini, L., Schafner, E. & Révész, Á. 2016. Characterization of a nanocrystalline Mg–Ni alloy processed by high-pressure torsion during hydrogenation and dehydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy* 41(23): 9803–9809.
- Ganeev, A. V, Ivanisenko, Y. & Valiev, R. Z. 2019. Effects of grain refinement by HPT processing in carbon steel with various cementite morphology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 672: 1–4.
- Gaško, M. & Rosenberg, G. 2011. Correlation Between Hardness and Tensile Properties in Ultra-High Strength Dual Phase Steels – Short Communication. *Materials Engineering* 18: 155–159.
- Gavrus, A. & Francillette, H. 2011. An Anisotropic Behaviour Analysis of AA2024 Aluminium Alloy Undergoing Large Plastic Deformations. Dlm. Kvacakaj (pnyt.). *Aluminium Alloys, Theory and Applications*. Hlm.49–68. Intech, Rijeka, Croatia.
- Ghosh, K. S., Gao, N. & Starink, M. J. 2012. Characterisation of high pressure torsion processed 7150 Al – Zn – Mg – Cu alloy. *Materials Science and Engineering A* 552: 164–171.
- Ghosh, P., Renk, O. & Pippan, R. 2017. Microtexture analysis of restoration mechanisms during high pressure torsion of pure nickel. *Materials Science and Engineering A* 684: 101–109.
- Gode, C., Yilmazer, H., Ozdemir, I. & Todaka, Y. 2014. Microstructural refinement and wear property of Al-Si-Cu composite subjected to extrusion and high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 618: 377–384.
- Goyal, V., Ravi, R., Bakshi, S. R. & Soni, P. R. 2019. Development and Mechanical Properties of In Situ via Mechanical Alloying. *Journal of Materials Engineering and Performance* 28: 117–122.
- Haasen P. 1996. Mechanical Properties of Solid Solution. Bab 23. *Physical Metallurgy*. Edisi keempat. Elsevier Science B V.
- Han, J. K., Lee, H. J., Jang, J. il, Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2017. Micro-mechanical and tribological properties of aluminum-magnesium nanocomposites processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 684: 318–327.
- Han, Jae-kyung, Liss, K., Langdon, T. G. & Kawasaki, M. 2019. Synthesis of a bulk nanostructured metastable Al alloy with extreme supersaturation of Mg. *Scientific Reports* 9: 1–7.
- Han, Jian, Zhu, Z., Li, H. & Gao, C. 2016. Microstructural evolution, mechanical property and thermal stability of Al-Li 2198-T8 alloy processed by high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 651: 435–441.

- Henrique, P., Pereira, R., Figueiredo, R. B., Huang, Y., Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2014. Modeling the temperature rise in high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 593: 185–188.
- Herold, F., Schmidt, A., Frint, P. & Götze, U. 2018. Technical-economic evaluation of severe plastic deformation processing technologies — methodology and use case of lever-arm-shaped aircraft lightweight components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94: 3619-3632.
- Hohenwarter, A. 2015. Incremental high pressure torsion as a novel severe plastic deformation process: Processing features and application to copper. *Materials Science and Engineering A* 626: 80–85.
- Hohenwarter, A., Bachmaier, A., Gludovatz, B., Scheriau, S. & Pippan, R. 2009. Technical parameters affecting grain refinement by high pressure torsion. *International Journal of Materials Research* 100(12): 1653–1661.
- Hohenwarter, A & Pippan, R. 2019. Sample Size and Strain-Rate-Sensitivity Effects on the Homogeneity of High-Pressure Torsion Deformed Disks. *Metallurgical and Materials Transactions A* 50(2): 601–608.
- Hohenwarter, Anton, Bachmaier, A., Gludovatz, B., Scheriau, S. & Pippan, R. 2009. Technical parameters affecting grain refinement by high pressure torsion. *International Journal of Materials Research* 100(12): 1653–1661.
- Hottle, T., Ca, C., Mcdonald, J. & Dodder, R. 2017. Critical factors affecting life cycle assessments of material choice for vehicle mass reduction. *Transportation Research Part D* 56: 241–257.
- Huang, Y., Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2016. Investigating Anvil Alignment and Anvil Roughness on Flow Pattern Development in High-Pressure Torsion. *Materials Research Society Symposium: Trends on Severe Plastic Deformation*, hlm. 1–12. Cancun, Mexico: Cambridge University Press.
- Huang, Y., Lemang, M., Zhang, N. X., Pereira, P. H. R. & Langdon, T. G. 2016. Achieving superior grain refinement and mechanical properties in vanadium through high-pressure torsion and subsequent short-term annealing. *Materials Science and Engineering A* 655: 60–69.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Irfan, H., Mohamed Racik, K. & Anand, S. 2018. Microstructural evaluation of

- CoAl₂O₄ nanoparticles by Williamson – Hall and size – strain plot methods. *Journal of Asian Ceramic Societies* 6(1): 54–62.
- Ishikawa, T. 2012. Understanding and controlling microstructural evolution in metal forming: An overview. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. Woodhead Publishing Limited.
- Isik, M., Niinomi, M., Cho, K., Nakai, M., Liu, H., Yilmazer, H., Horita, Z. 2016a. Microstructural evolution and mechanical properties of biomedical Co-Cr-Mo alloy subjected to high-pressure torsion. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 59: 226–235.
- Ito, Y., Edalati, K. & Horita, Z. 2017. High-pressure torsion of aluminum with ultrahigh purity (99.9999%) and occurrence of inverse Hall-Petch relationship. *Materials Science and Engineering A* 679: 428–434.
- Ivanisenko, Y., Kulagin, R., Fedorov, V., Mazilkin, A., Scherer, T., Baretzky, B. & Hahn, H. 2016. High Pressure Torsion Extrusion as a new severe plastic deformation process. *Materials Science and Engineering A* 664: 247–256.
- Janbakhsh, M., Loghmanian, S. M. R. & Djavanroodi, F. 2014. Application of Different Hill's Yield Criteria to Predict Limit Strains for Aerospace Titanium and Aluminum Sheet Alloys. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 7(1), 35–44.
- Johnson, G. R. & Cook, W. H. 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *7th International Symposium on Ballistics*. Hlm. 541–547.
- Jonas, J. J., Ghosh, C. & Toth, L. S. 2014. The equivalent strain in high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 607: 530–535.
- Kalpakjian, S. & Schmid, S. 2017. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Edisi keenam. Pearson Education.
- Kamrani, M., Levitas, V. I. & Feng, B. 2017. FEM simulation of large deformation of copper in the quasi-constrain high-pressure-torsion setup. *Materials Science and Engineering A* 705: 219–230.
- Kawasaki, M. 2014. Different models of hardness evolution in ultrafine-grained materials processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science* 49(1): 18–34.
- Kawasaki, M., Ahn, B. & Langdon, T. G. 2010. Significance of strain reversals in a two-phase alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 527(26): 7008–7016.
- Kawasaki, M., Ahn, B., Lee, H., Zhilyaev, A. P. & Langdon, T. G. 2016. Using high-

- pressure torsion to process an aluminum – magnesium nanocomposite through diffusion bonding. *J. Mater. Res* 31(1): 88–99.
- Kawasaki, M., Figueiredo, R. B., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2014. Interpretation of hardness evolution in metals processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science* 49(19): 6586–6596.
- Kawasaki, M., Foissey, J. & Langdon, T. G. 2013. Development of hardness homogeneity and superplastic behavior in an aluminum-copper eutectic alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 561: 118–125.
- Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2011. Developing superplasticity and a deformation mechanism map for the Zn-Al eutectoid alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 528(19–20): 6140–6145.
- Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2012. An Investigation of Cavity Development during Superplastic Flow in a Zinc-Aluminum Alloy Processed Using Severe Plastic Deformation. *Materials Transactions* 53(1): 87–95.
- Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2017. Using Severe Plastic Deformation to Fabricate Strong Metal Matrix Composites. *Materials Research* 20(Suppl. 1): 46–52.
- Kawasaki, M., Lee, H. J., Ahn, B., Zhilyaev, A. P. & Langdon, T. G. 2014. Evolution of hardness in ultrafine-grained metals processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology* 3(4): 311–318.
- Khajouei-Nezhad, M., Paydar, M. H., Ebrahimi, R., Jenei, P., Nagy, P. & Gubicza, J. 2017. Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained aluminum consolidated by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 682: 501–508.
- Khiavi, S. G. & Emadoddin, E. 2018. Microhardness distribution and finite element method analysis of Al 5452 alloy processed by unconstrained high pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology* 7(4): 410–418.
- Khoddam, S., Hodgson, P. D., Zarei-Hanzaki, A. & Yan Foon, L. 2016. A simple model for material's strengthening under high pressure torsion. *Materials and Design* 99: 335–340.
- Kim, H. S. 2001. Finite element analysis of high pressure torsion processing. *Journal of Materials Processing Technology* 113(1–3): 617–621.
- Kim, H. S., Hong, S. I., Lee, Y. S., Dubravina, A. A. & Alexandrov, I. V. 2003. Deformation behavior of copper during a high pressure torsion process. *Journal of Materials Processing Technology* 142(2): 334–337.
- Kleemola, H. J. & Nieminen, M. A. 1974. On the Strain-Hardening Parameters of

- Metals. *Metall Trans* 5(8): 1863–1866.
- Kulagin, R., Beygelzimer, Y., Estrin, Y., Ivanisenko, Y., Baretzky, B. & Hahn, H. 2019. A Mathematical Model of Deformation under High Pressure Torsion Extrusion. *Metals* 1: 1–11.
- Kulagin, R., Beygelzimer, Y., Ivanisenko, Y., Mazilkin, A. & Hahn, H. 2017. Modelling of High Pressure Torsion using FEM. *Procedia Engineering* 207: 1445–1450.
- Kumar, S., Supriya, S., Pandey, R., Pradhan, L. K., Singh, R. K. & Kar, M. 2018. Effect of Lattice Strain on Structural and Magnetic Properties of Ca Substituted Barium Hexaferrite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 458: 30–38.
- Kunčická, L., Kocich, R. & Lowe, T. C. 2017. Advances in metals and alloys for joint replacement. *Progress in Materials Science* 88: 232–280.
- Kundu, A., Kapoor, R., Tewari, R. & Chakravartty, J. K. 2008. Severe plastic deformation of copper using multiple compression in a channel die. *Scripta Materialia* 58(3): 235–238.
- Lage, M. D. A., Soares, R. B., Pereira, P. H. R., Figueiredo, R. B., Lins, V. F. C. L. & Langdon, T. G. 2019. Effect of High-pressure Torsion on Corrosion Behavior of a Solution-treated Al-Mg-Sc Alloy in a Saline Solution. *Materials Research* 22(5): 1–8.
- Langdon, T. G. 2009. Seventy-five years of superplasticity: historic developments and new opportunities. *Journal of Material Science* 44: 5998–6010.
- Lanjewar, H., Kestens, L. & Verleysen, P. 2018. Dynamic High Pressure Torsion (DHPT)—A Novel Method for High Strain Rate Severe Plastic Deformation. *Proceedings* 2(8): 493.
- Larijani, N., Kammerhofer, C. & Ekh, M. 2015. Simulation of high pressure torsion tests of pearlitic steel. *Journal of Materials Processing Technology* 223: 337–343.
- Lee, D. J., Yoon, E. Y., Ahn, D. H., Park, B. H., Park, H. W., Park, L. J., Estrin, Y. 2014. Dislocation density-based finite element analysis of large strain deformation behavior of copper under high-pressure torsion. *Acta Materialia* 76: 281–293.
- Lee, D. J., Yoon, E. Y., Park, L. J. & Kim, H. S. 2012. The dead metal zone in high-pressure torsion. *Scripta Materialia* 67(4): 384–387.
- Lee, H. J., Han, J. K., Janakiraman, S., Ahn, B., Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2016. Significance of grain refinement on microstructure and mechanical properties of an Al-3% Mg alloy processed by high-pressure torsion. *Journal of Alloys and Compounds* 686: 998–1007.
- Levitas, V. I. & Zarechnyy, O. M. 2010. Numerical study of stress and plastic strain

- evolution under compression and shear of a sample in a rotational anvil cell. *High Pressure Research* 30(4): 653–669.
- Li, P., Hua, Y. L., Yan, S. L., Zhou, Y. F., Wei, X. F. & Xue, K. M. 2020. Strengthening mechanisms of pure tungsten subjected to high pressure torsion: Deviation from classic Hall-Petch relation. *Materialwiss* 51: 338–348.
- Lowe Terry, C. & Valliev Ruslan, Z. 1999. Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation. *Nato Science Partnership Subseries: 3*. Springer-Science Business Media, B.V. Overijse, Belgium.
- Lukyanova, E. A., Martynenko, N. S., Shakhova, I., Belyakov, A. N., Rokhlin, L. L., Dobatkin, S. V. & Estrin, Y. Z. 2016. Strengthening of age-hardenable WE43 magnesium alloy processed by high pressure torsion. *Materials Letters* 170: 5–9.
- Mahallawy, N. El, Shehata, F. A., Hameed, M. A. El, Aal, M. I. A. El & Kim, H. S. 2010. 3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in Al-Cu alloys during ECAP. *Materials Science and Engineering A* 527(6): 1404–1410.
- Mansor, M. R., Mustafa, Z., Fadzullah, S. H. S. M., Omar, G., Salim, M. A. & Akop, M. Z. 2018. Recent Advances in Polyethylene-Based Biocomposites. Dlm. Sapuan (pnyt.), Ismail (pnyt.), & Zainudin (pnyt.). *Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites*, hlm.71–96. Elsevier Ltd. Duxford, United Kingdom.
- Markushev, M. V, Avtokratova, E. V, Krymskiy, S. V & Sitdikov, O. S. 2018. Effect of Precipitates on Nanostructuring and Strengthening of High-strength Aluminium Alloys under High Pressure Torsion. *Journal of Alloys and Compounds* 743: 773–779.
- Masuda, S., Tsuchiya, K., Qiang, J., Miyazaki, H. & Nishino, Y. 2018. Effect of high-pressure torsion on the microstructure and thermoelectric properties of Fe₂VAl-based compounds. *Journal of Applied Sciences* 124: 1–9.
- Mirzaie, T., Mirzadeh, H. & Cabrera, J. M. 2016. A simple Zerilli-Armstrong constitutive equation for modeling and prediction of hot deformation flow stress of steels. *Mechanics of Materials* 94: 38–45.
- Mishra, R. S. & Mahoney, M. W. 2001. Friction Stir Processing: A New Grain Refinement Technique to Achieve High Strain Rate Superplasticity in Commercial Alloys. *Materials Science Forum* 357–359: 507–514.
- Mishra, S. K., Roy, H., Lohar, A. K., Samanta, S. K., Tiwari, S. & Dutta, K. 2015. A comparative assessment of crystallite size and lattice strain in differently cast A356 aluminium alloy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 75: 1–6.
- Mohamed, F. A. & Dheda, S. S. 2012. On the minimum grain size obtainable by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 558: 59–63.

- Mohamed, I. F., Lee, S., Edalati, K., Horita, Z., Abdullah, S., Omar, M. Z. & Wan Zamri, W. F. H. 2016. Grain refinement and microstructure evolution in aluminum A2618 alloy by high-pressure torsion. *Jurnal Teknologi* 78(6–9): 149–152.
- Mohamed, I. F., Lee, S. & Horita, Z. 2013. Strengthening of Al 6061 Alloy by High-Pressure Torsion through Grain Refinement and Aging. *Materials Science Forum* 765: 408–412.
- Mohamed, I. F., Lee, S. & Horita, Z. 2014. Nanostructure control of age-hardenable Al 2024 alloy by high-pressure torsion. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 63:1–6.
- Mohamed, I. F., Masuda, T., Lee, S., Edalati, K., Horita, Z., Hirosawa, S., Matsuda, K. 2017. Strengthening of A2024 alloy by high-pressure torsion and subsequent aging. *Materials Science and Engineering A* 704: 112–118.
- Mohamed, I. F., Yonenaga, Y., Lee, S., Edalati, K. & Horita, Z. 2015. Age hardening and thermal stability of Al-Cu alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 627: 111–118.
- Moscato, W., Shankar, M. R., Mann, J. B., Compton, W. D. & Chandrasekar, S. 2007. Bulk nanostructured materials by large strain extrusion machining. *Journal of Materials Research* 22(1): 201–205.
- Mote, V. D., Purushotham, Y. & Dole, B. N. 2012. Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. *Journal of Theoretical and Applied Physics* 6(6): 2–9.
- Müller, T., Kapp, M. W., Bachmaier, A., Felfel, P. & Pippan, R. 2019. Ultrahigh-strength low carbon steel obtained from the martensitic state via high pressure torsion. *Acta Materialia* 166: 168–177.
- Muniz, F. T. L., Miranda, M. A. R., Santos, C. M. dos & Sasaki, J. M. 2016. The Scherrer equation and the dynamical theory of X-ray diffraction. *Acta Cryst.* A72: 385–390.
- Murashkin, M. Y., Kil'Mametov, A. R. & Valiev, R. Z. 2008. Structure and Mechanical Properties of an Aluminum Alloy 1570 Subjected to Severe Plastic Deformation by High-Pressure Torsion. *The Physics of Metals and Metallography* 106(1): 90–96.
- Naghdy, S., Kestens, L., Herteló, S. & Verleysen, P. 2016. Evolution of microstructure and texture in commercial pure aluminum subjected to high pressure torsion processing. *Materials Characterization* 120: 285–294.
- Oh-ishi, K., Edalati, K., Seop, H. & Hono, K. 2013. High-pressure torsion for enhanced atomic diffusion and promoting solid-state reactions in the aluminum – copper system. *Acta Materialia* 61(9): 3482–3489.

- Okeke, U., Yilmazer, H., Sato, S. & Boehlert, C. J. 2019. Strength enhancement of an aluminum alloy through high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 760: 195–205.
- Omranpour, B., Ivanisenko, Y., Kulagin, R., Kommel, L., Sanchez, E. G., Nugmanov, D., Scherer, T. 2019. Evolution of microstructure and hardness in aluminum processed by High Pressure Torsion Extrusion. *Materials Science and Engineering A* 762: 1–10.
- Owen, L. R., Pickering, E. J., Playford, H. Y., Stone, H. J., Tucker, M. G. & Jones, N. G. 2017. An assessment of the lattice strain in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia* 122: 11–18.
- Panda, S., Toth, L. S., Fundenberger, J. J., Perroud, O., Guyon, J., Zou, J. & Grosdidier, T. 2017. Analysis of heterogeneities in strain and microstructure in aluminum alloy and magnesium processed by high-pressure torsion. *Materials Characterization* 123: 159–165.
- Parimi, A. K., Robi, P. S. & Dwivedy, S. K. 2011. Severe plastic deformation of copper and Al-Cu alloy using multiple channel-die compression. *Materials and Design* 32(4): 1948–1956.
- Parvin, H. & Kazeminezhad, M. 2016. Modelling the temperature rise effect through high-pressure torsion. *Materials Science and Technology* 32(12): 1218–1222.
- Parvin, H. & Kazeminezhad, M. 2020. Limiting grain size through high-pressure torsion of different materials. *Materials Science and Technology* 36: 245–250.
- Patil, D. C., Venkateswarlu, K., Kori, S. A., Das, G., Das, M., Alhajeri, S. N. & Langdon, T. G. 2014. Mechanical property evaluation of an Al-2024 alloy subjected to HPT processing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 63: 1–9.
- Pereira, P. H. R., Figueiredo, R. B., Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2015. An examination of the elastic distortions of anvils in high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 631: 201–208.
- Pereira, P. H. R., Figueiredo, R. B., Huang, Y., Cetlin, P. R. & Langdon, T. G. 2014. Modeling the temperature rise in high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 593: 185–188.
- Pippan, R., Scheriau, S., Taylor, A., Hafok, M., Hohenwarter, A. & Bachmaier, A. 2010. Saturation of Fragmentation During Severe Plastic Deformation. *Annual Review of Materials Research* 40: 319–343.
- Pippan, R., Scheriau, S., Hohenwarter, A. & Hafok, M. 2008. Advantages and limitations of HPT: A review. *Materials Science Forum* 584–586: 16–21.
- Purcek, G., Yanar, H., Shangina, D. V., Demirtas, M., Bochvar, N. R. & Dobatkin, S. V.

2018. Influence of high pressure torsion-induced grain refinement and subsequent aging on tribological properties of Cu-Cr-Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 742: 325–333.
- Rekov, A. M. 2018. Strain State during Rolling of Aluminum Samples. *Solid State Phenomena* 284: 436–440.
- Richert, M., Liu, Q. & Hansen, N. 1999. Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic-extrusion-compression. *Materials Science and Engineering A* 260(1–2): 275–283.
- Rijal, A., Singh, S. P., Han, J.-K., Kawasaki, M. & Kumar, P. 2020. Effect of High-Pressure Torsion on Hardness and Electrical Resistivity of Commercially Pure Cu. *Advanced Engineering Materials* 22: 1–11.
- Sabbaghianrad, S. & Langdon, T. G. 2016. Developing superplasticity in an aluminum matrix composite processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 655: 36–43.
- Sabbaghianrad, S., Torbati-sarraf, S. A. & Langdon, T. G. 2018. An investigation of the limits of grain refinement after processing by a combination of severe plastic deformation techniques: a comparison of Al and Mg alloys. *Materials Science and Engineering A* 712: 373–379.
- Sabiroy, I., Perez-Prado, M. T., Murashkin, M., Molina-Aldareguia, J. M., Bobruk, E. V., Yunusova, N. F. & Valiev, R. Z. 2010. Application of equal channel angular pressing with parallel channels for grain refinement in aluminium alloys and its effect on deformation behavior. *Int J Mater Form* 3(1): 411–414.
- Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N. & Sakai, T. 1999. Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia* 47(2): 579–583.
- Sakai, G., Nakamura, K., Horita, Z. & Langdon, T. G. 2006. Application of High Pressure Torsion to Bulk Samples. *Materials Science Forum* 504–504: 391–397.
- Salazar-Guapuriche, M. A., Zhao, Y. Y., Pitman, A. & Greene, A. 2006. Correlation of Strength with Hardness and Electrical Conductivity for Aluminium Alloy 7010. *Materials Science Forum* 519–521: 853–858.
- Schey, J. A. 2000. *Introduction to Manufacturing Processes*, Edisi ketiga. McGraw-Hill Education, New York.
- Schmidt G. & Lappus G. 1985. Digital Simulation Methods – A Tutorial. *Proceedings of the 7th IFAC/IFIP/IMACS Conference*, Vienna, Austria, hlm. 83 – 93.
- Serre, P., Figueiredo, R. B., Gao, N. & Langdon, T. G. 2011. Influence of strain rate on the characteristics of a magnesium alloy processed by high-pressure torsion.

Materials Science and Engineering A 528(10–11): 3601–3608.

- Shahmir, H., He, J., Lu, Z., Kawasaki, M. & Langdon, T. G. 2016. Effect of annealing on mechanical properties of a nanocrystalline CoCrFeNiMn high-entropy alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 676: 294–303.
- Shahmir, H. & Langdon, T. G. 2016. Characteristics of the allotropic phase transformation in titanium processed by high-pressure torsion using different rotation speeds. *Materials Science and Engineering A* 667: 293–299.
- Shahmir, H., Naghdi, F., Pereira, P. H. R., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2018. Factors influencing superplasticity in the Ti-6Al-4V alloy processed by high- pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 718: 198–206.
- Sharman, K., Bazarnik, P., Brynk, T., Gunay Bulutsuz, A., Lewandowska, M., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2015. Enhancement in mechanical properties of a β -titanium alloy by high-pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology* 4(1): 79–83.
- Shi, S., Zhang, Z., Wang, X., Zhou, G., Xie, G., Wang, D., Chen, X. 2018. Microstructure Evolution and Enhanced Mechanical Properties in SUS316LN Steel Processed by High Pressure Torsion at Room Temperature. *Materials Science and Engineering A* 711: 476–483.
- Shi, X., Wang, X., Jiao, L., Wang, Z., Yan, P. & Gao, S. 2018. A real-time tool failure monitoring system based on cutting force analysis. *Int J Adv Manuf Technol* 95: 2567–2583.
- Simm, T. H. 2018. Peak Broadening Anisotropy and the Contrast Factor in Metal Alloys. *Crystals* 8(212): 1–31.
- Song, Y., Wang, W., Gao, D., Yoon, E. Y., Lee, D. J. & Kim, H. S. 2014. Finite Element Analysis of the Effect of Friction in High Pressure Torsion. *Met. Mater. Int.* 20(3): 445–450.
- Song, Y., Yoo, E., Jun, D., Hwan, J. & Seop, H. 2011. Mechanical properties of copper after compression stage of high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 528(13–14): 4840–4844.
- Straumal, B. B., Pontikis, V., Kilmametov, A. R., Mazilkin, A. A., Dobatkin, S. V. & Baretzky, B. 2017. Competition between precipitation and dissolution in Cu–Ag alloys under high pressure torsion. *Acta Materialia* 122: 60–71.
- Stüwe, H. P. 2003. Equivalent Strains in Severe Plastic Deformation. *Advanced Engineering Materials* 5(5): 291–295.
- Sun, W. T., Qiao, X. G., Zheng, M. Y., He, Y., Hu, N., Xu, C., Gao, N. 2018.

- Exceptional grain refinement in a Mg alloy during high pressure torsion due to rare earth containing nanosized precipitates. *Materials Science and Engineering A* 728: 115–123.
- Sun, W. T., Qiao, X. G., Zheng, M. Y., Hu, N., Gao, N. & Starink, M. J. 2018. Evolution of long period stacking ordered structure and hardness of Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr alloy during processing by high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 738: 238–252.
- Sun, W. T., Qiao, X. G., Zheng, M. Y., Zhao, X. J., Chen, H. W., Gao, N. & Starink, M. J. 2018. Achieving ultra-high hardness of nanostructured Mg-8.2Gd-3.2Y-1.0Zn-0.4Zr alloy produced by a combination of high pressure torsion and ageing treatment. *Scripta Materialia* 155: 21–25.
- Tabor D. 1956. The Physical Meaning of Indentation and Scratch Hardness. *British Journal of Applied Physics* 7(5): 159–166.
- Takizawa, Y., Otsuka, K., Masuda, T., Kajita, T., Yumoto, M., Otagiri, Y. & Horita, Z. 2015. High-strain rate superplasticity of Inconel 718 through grain refinement by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 648: 178–182.
- Tejedor, R., Edalati, K., Benito, J. A., Horita, Z. & Cabrera, J. M. 2019. High-pressure torsion of iron with various purity levels and validation of Hall-Petch strengthening mechanism. *Materials Science and Engineering A* 743: 597–605.
- Tian, Y. Z., Xiong, T., Zheng, S. J., Bai, Y., Freudenberger, J., Pippan, R., Zhang, Z. F. et al. 2018. Ultrafine-grained CuAg7Zr0.05 alloy with fully recrystallized microstructure. *Materialia* 3: 162–168.
- Tiryakioğlu, M., Robinson, J. S., Salazar-Guapuriche, M. A., Zhao, Y. Y. & Eason, P. D. 2015. Hardness-strength relationships in the aluminum alloy 7010. *Materials Science and Engineering A* 631: 196–200.
- Todaka, Y., Umemoto, M., Yamazaki, A., Sasaki, J. & Tsuchiya, K. 2008. Influence of High-Pressure Torsion Straining Conditions on Microstructure Evolution in Commercial Purity Aluminum. *Materials Transactions* 49(1): 7–14.
- Um, H. Y., Yoon, E. Y., Lee, D. J., Lee, C. S., Park, L. J., Lee, S. & Kim, H. S. 2014. Hollow cone high-pressure torsion: Microstructure and tensile strength by unique severe plastic deformation. *Scripta Materialia* 71: 41–44.
- Václavov'a, K., Str'ask'y, J., Polyakova, V., Str'ask'a, J., Nejezchlebov'a, J., Seiner, H., Semenova, I. 2017. Microhardness and microstructure evolution of ultra-fine grained Ti-15Mo and TIMETAL LCB alloys prepared by high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 682: 220–228.
- Vafaeseefat, A. 2011. Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming. *Materials and Manufacturing Processes* 26: 93–98.

- Vafaei, R., Toroghinejad, M. R. & Pippan, R. 2012. Evaluation of mechanical behavior of nano-grained 2024 Al alloy during high pressure torsion (HPT) process at various temperatures. *Materials Science and Engineering A* 536: 73–81.
- Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., Kuzmina, N. F., Li, Y. & Langdon, T. G. 1999. Strengthening and grain refinement in an Al-6061 metal matrix composite through intense plastic straining. *Scripta Materialia*, 40(1), 117–122.
- Wang, X., Nie, M., Wang, C. T., Wang, S. C. & Gao, N. 2015. Microhardness and corrosion properties of hypoeutectic Al-7Si alloy processed by high-pressure torsion. *Materials and Design* 83: 193–202.
- Wei, P., Lu, C., Tieu, K., Su, L., Deng, G. & Huang, W. 2017. A study on the texture evolution mechanism of nickel single crystal deformed by high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 684: 239–248.
- Williams, B. P., Yaguchi, M., Lo, W.-S., Kao, C.-R., Lamontagne, L. K., Sneed, B. T., Brodsky, C. N. 2020. Investigating Lattice Strain Impact on the Alloyed Surface of Small Au@PdPt Core-Shell Nanoparticles. *Nanoscale* 12(16): 1–7.
- Williamson, G. & Hall, W. . 1953. X-Ray Line Broadening from Filed Aluminium and Wolfram. *Acta Metallurgica* 1(1): 22–31.
- Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP). 2014. *ECE-TRANS-180a15e*. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Geneva, Switzerland.
- Xu, X., Zhang, Q., Hu, N., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2013. Using an Al-Cu binary alloy to compare processing by multi-axial compression and high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 588: 280–287.
- Yogo, Y., Sawamura, M., Iwata, N. & Yukawa, N. 2017. Stress-strain curve measurements of aluminum alloy and carbon steel by unconstrained-type high-pressure torsion testing. *Materials and Design* 122: 226–235.
- Yoon, S. C., Horita, Z. & Kim, H. S. 2008. Finite element analysis of plastic deformation behavior during high pressure torsion processing. *Journal of Materials Processing Technology* 201(1–3): 32–36.
- Yusuf, S. M., Nie, M., Chen, Y., Yang, S. & Gao, N. 2018. Microstructure and corrosion performance of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting and processed through high-pressure torsion. *Journal of Alloys and Compounds* 763: 360–375.
- Zafari, A., Wei, X. S., Xu, W. & Xia, K. 2015. Effects of severe plastic deformation on grain refinement and martensitic transformation in a metastable β Ti alloy Effects of severe plastic deformation on grain refinement and martensitic transformation in a metastable β Ti alloy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 89:

1–7.

Zaharevskis, V., Kurushin, A. & Kovzels, O. 2018. Use of FEM Numerical Simulation Approach for Surface Rolling Process Control. *Engineering for Rural Development*, hlm.1378–1383.

Zhang, J., Starink, M. J., Gao, N. & Zhou, W. 2011. Effect of Mg addition on strengthening of aluminium alloys subjected to different strain paths in high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 528(4–5): 2093–2099.

Zhang, N. X., Chinh, N. Q., Kawasaki, M., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2016. Self-annealing in a two-phase Pb-Sn alloy after processing by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 666: 350–359.

Zhang, P., Li, S. X. & Zhang, Z. F. 2011. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and Engineering A* 529(1): 62–73.

Zhang, W., Ding, H., Pedro, H. R., Huang, Y. & Langdon, T. G. 2018. Grain refinement and superplastic flow in a fully lamellar Ti-6Al-4V alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering A* 732: 398–405.

Zhang, Z., Wang, J., Zhang, Q., Zhang, S., Shi, Q. & Qi, H. 2018. Research on Grain Refinement Mechanism of 6061 Aluminum Alloy Processed by Combined SPD Methods of ECAP and MAC. *Materials* 11(7): 1246–1261.

Zheng, R., Chen, J., Xiao, W. & Ma, C. 2016. Microstructure and tensile properties of nanocrystalline $(\text{FeNiCoCu})_{1-x}\text{Ti}_x\text{Al}_x$ high entropy alloys processed by high pressure torsion. *Intermetallics* 74: 38–45.

Zhilyaev, A. P., Lee, S., Nurislamova, G. V., Valiev, R. Z. & Langdon, T. G. 2001. Microhardness and microstructural evolution in pure nickel during high-pressure torsion. *Scripta Materialia* 44(12): 2753–2758.

Zhilyaev, A. P., Nurislamova, G. V., Kim, B. K., Bar'o, M. D., Szpunar, J. A. & Langdon, T. G. 2003. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion. *Acta Materialia* 51(3): 753–765.

Zhilyaev, A. P., Kim, B., Szpunar, J. A., Bar, M. D. & Langdon, T. G. 2005. The microstructural characteristics of ultrafine-grained nickel. *Materials Science and Engineering A* 391: 377–389.

Zhilyaev, Alexander P. & Langdon, T. G. 2008. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science* 53(6): 893–979.

Zhilyaev, Alexander P & Langdon, T. G. 2008. Progress in Materials Science using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in*

Materials Science 53: 893–979.

Zhu, Y. T., Jiang, H., Huang, J. & Lowe, T. C. 2001. A new route to bulk nanostructured metals. *Metallurgical and Materials TransactionsA: Physical Metallurgy and Materials Science* 32(6): 1559–1562.



LAMPIRAN A

SENARAI PENERBITAN

Senarai Penerbitan Jurnal

1. **Lamin, F.**, Ariffin, A. K. & Mohamed, I. F. 2019. Finite element analysis of plasticity behaviour of aluminium alloys in high-pressure torsion compressive loading stage. *International Journal of Structural Integrity* 10(5): 692-703. <https://doi.org/10.1108/IJSI-04-2019-0037> (Tarikh penerbitan: 7 October 2019).
2. **Lamin, F.**, Ariffin, A. K., Mohamed, I. F. & Nuphairode, C. 2020. Hardening model of severe plastically deformed AA2024 by high-pressure torsion. *International Journal of Structural Integrity* X(X): XX-XX. <https://doi.org/10.1108/IJSI-10-2019-0102> (Tarikh penerbitan: 21 March 2020).
3. Nuphairode, C., Mohamed, I. F., **Lamin, F.**, Wan Zamri, W. F. H. & Omar M. Z. 2020. The evolvement of Mechanical Properties and Microstructure of Commercial Aluminium Alloy 6061 via High-Pressure Torsion. *Jurnal Kejuruteraan* 32(3): 175-182.
4. **Lamin, F.**, Ariffin, A. K., Mohamed, I. F. & Nuphairode, C. 2021. Stress Flow Behaviour of AA2024 under High-Pressure Torsion Deformation by Parametric Finite Element Analysis of Anvil Configuration. *Journal of Failure Analysis and Prevention* X(X): XX-XX. (Akan diterbitkan).

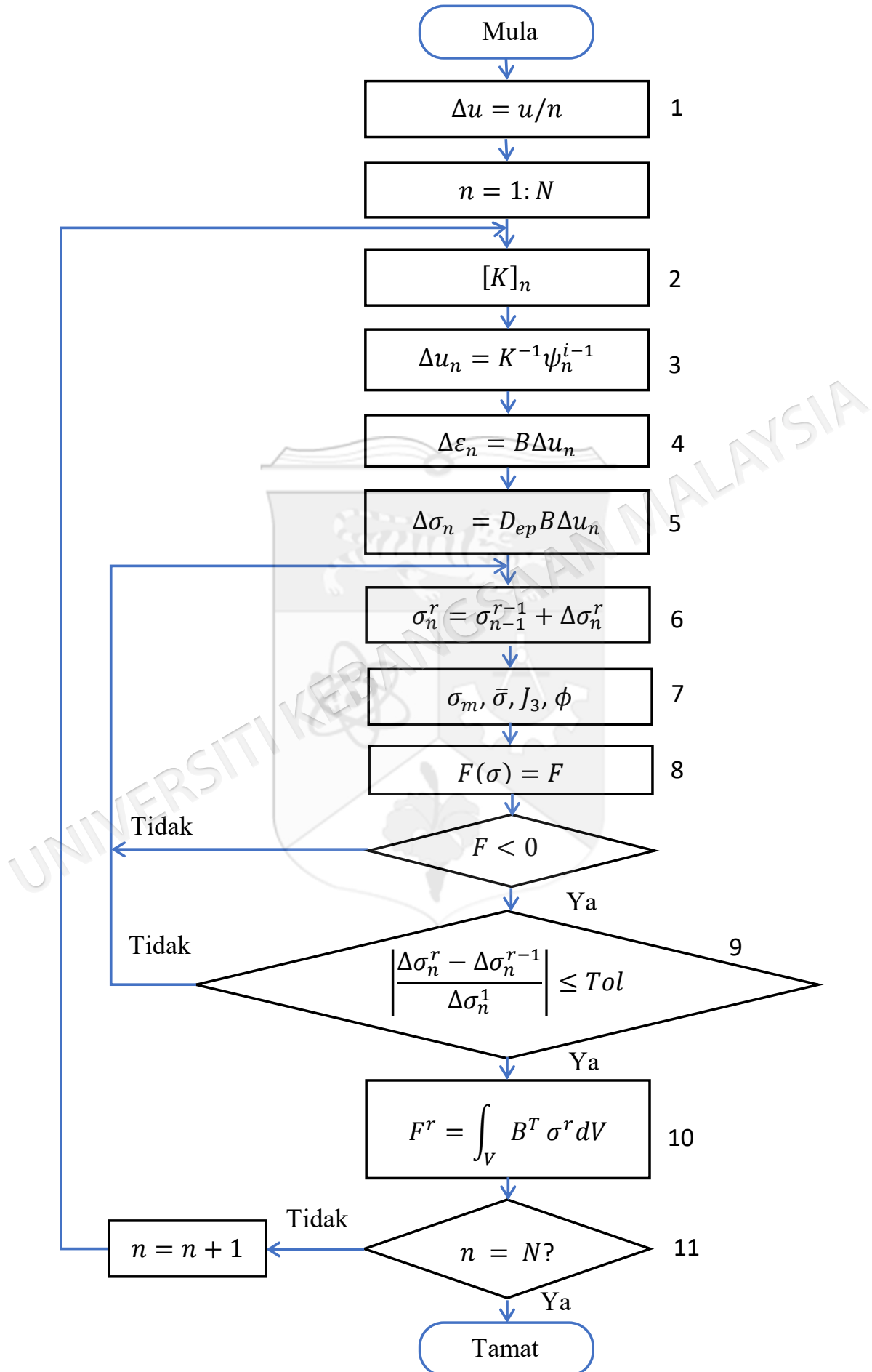
Senarai Penerbitan Kertas Persidangan

1. **Fauziana Lamin**, Ahmad Kamal Ariffin & Intan Fadhlina Mohamed. 2018. Empirical Relationship between Hardness and Tensile Properties of High Pressure Torsion-processed Al 6061. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 458(012081). Hlm. 1 - 8.
2. **Fauziana Lamin**, Ahmad Kamal Ariffin & Intan Fadhlina Mohamed. 2018. Anvil Displacement and Critical limit of a Prescribed Compressive Loading in High-Pressure Torsion Simulation for AA2024, AA5052 and AA6061. 3rd Symposium on Damage Mechanism in Materials and Structures.
3. **Fauziana Lamin**, Ahmad Kamal Ariffin & Intan Fadhlina Mohamed. 2019. Hardness Prediction Model of Aluminium Alloy with Hardening Behaviour induced by High Pressure Torsion. 29th European Safety and Reliability Conference. Hlm. 3562-3569.
4. **Fauziana Lamin**, Ahmad Kamal Ariffin, Intan Fadhlina Mohamed & Cheeranan Krutsuwan. 2019. Bi-linear Constitutive Model of AA2024 Processed by High-pressure Torsion", 11th International Conference on Numerical Analysis in Engineering.
5. **Fauziana Lamin**, Ahmad Kamal Ariffin, Intan Fadhlina Mohamed & Cheeranan Krutsuwan. 2021. Effect of Anvil Outflow Gap and Alignment on Stress Evolution of Aluminium Alloy in High-Pressure Torsion Deformation. 5th Symposium on Damage Mechanism in Materials and Structures.

LAMPIRAN B

IMPLEMENTASI BERANGKA HPT

1. Bagi mentakrifkan kenaikan berperingkat $[\Delta u]_n$, u dibahagikan kepada sebilangan kenaikan kecil n .
2. Kira matrik kekakuan tangen. Lelaran pertama i menggunakan matrik kekakuan elastik, $[D_e]_n$. Selainnya, matrik kekakuan elastoplastik $[D_{ep}]_n$ digunakan.
3. Kira kenaikan anjakan.
4. Kira kenaikan terikan.
5. Kira kenaikan tegasan.
6. Kira tegasan semasa σ_n .
7. Kira invariant, bagi σ_n^r .
8. Cari $F(\sigma)$ yang mana F adalah permukaan alah sementara. Jika $F < 0$, teruskan ke langkah 9. Jika tidak, kecilkan dan betulkan tahap tegasan dan kira tegasan semasa dalam langkah 6 sehingga syarat dipenuhi.
9. Semak penumpuan untuk setiap lelaran menggunakan kriteria penumpuan setempat pada setiap titik Gaussian. Jika pengiraan kurang atau sama dengan toleran (Tol), teruskan ke langkah 10. Jika tidak, ulang langkah 6.
10. Kira daya jasad F^r . Kemudian, kemaskini σ , ε , koordinat x , y , z , tindakbalas F_R dan sebagainya.
11. Jika $n \neq N$, $n = n + 1$ dan teruskan langkah peningkatan $[\Delta u]_n$ seterusnya dengan ulang langkah 2. Jika tidak, pengiraan tamat.



LAMPIRAN C

ALGORITMA PENGATURCARAAN HPT

```
//mainWindow  
  
package builder; import com.comsol.api.*;  
import com.comsol.model.*;  
import com.comsol.model.physics.*;  
import com.comsol.model.application.*;  
  
public class runApps extends ApplicationMethod {  
  
    public void execute() {  
        model.sol("sol1").study("std1");  
        with(model.study("std1").feature("stat"));  
            set("notlistsolnum", 1);  
            set("notsolnum", "1");  
            set("listsolnum", 1);  
            set("solnum", "1");  
        endwith();  
        model.sol("sol1").feature().remove("s1");  
        model.sol("sol1").feature().remove("v1");  
        model.sol("sol1").feature().remove("st1");  
        model.sol("sol1").create("st1", "StudyStep");  
        with(model.sol("sol1").feature("st1"));  
            set("study", "std1");  
            set("studystep", "stat");  
        endwith();  
        model.sol("sol1").create("v1", "Variables");  
        with(model.sol("sol1").feature("v1"));
```

```

        set("control", "stat");
    endwhile();
    model.sol("sol1").create("s1", "Stationary");
    model.sol("sol1").feature("s1").create("p1", "Parametric");
    model.sol("sol1").feature("s1").feature().remove("pDef");
    with(model.sol("sol1").feature("s1").feature("p1"));
        set("control", "stat");
    endwhile();
    with(model.sol("sol1").feature("s1"));
        set("control", "stat");
    endwhile();
    model.sol("sol1").feature("s1").create("fc1", "FullyCoupled");
    with(model.sol("sol1").feature("s1").feature("fc1"));
        set("termmonres", "auto");
        set("reserrfact", 1000);
        set("linsolver", "dDef");
        set("termmonres", "auto");
        set("reserrfact", 1000);
    endwhile();
    model.sol("sol1").feature("s1").feature().remove("fcDef");
    model.sol("sol1").attach("std1");
    model.result().create("pg1", 3);
    with(model.result("pg1"));
        set("data", "dset1");
    endwhile();
    model.result("pg1").create("surf1", "Surface");
    with(model.result("pg1").feature("surf1"));
        set("expr", new String[] "solid2.misesGp");
    endwhile();
    model.result("pg1").label("Stress (solid2)");
    model.result("pg1").feature("surf1").create("def", "Deform");
    with(model.result("pg1").feature("surf1").feature("def"));
        set("scaleactive", true);
        set("scale", "1");

```

```

        set("expr", new String[]{"u2", "v2", "w2"};
        set("descr", "Displacement field (Material)");
    endwhile();
    model.sol("sol1").runAll();
    model.result("pg1").run();
    }
}

//createModel-----

package builder;

import com.comsol.api.*;
import com.comsol.model.*;
import com.comsol.model.physics.*;
import com.comsol.model.application.*;

public class createModel extends ApplicationMethod {

    public void execute() {
        //Global Definition: Parameter
        with(model.param());
            set("Jejari", "15 [mm]", "Jejari sampel");
            set("Tinggi", "1.25 [mm]", "Tinggi sampel");
            set("rpm", "0.1 [rpm]", "Kadar putaran");
            set("P", "4 [MPa]", "Tekanan");
            set("N", "8", "Bilangan putaran");
            set("teta", "N/180*3.142", "Darjah putaran (rad)");
            set("x0", "0");
            set("y0", "0");
            set("para", "0", "Parameter kenaikan");
            set("YM", "73.1E9 [Pa]", "Modulud Young");
            set("IYS", "465E6 [Pa]", "Kekuatan alah awal");
            set("TM", "65E6 [Pa]", "Modulus tangen");
            set("v", "0.33", "Nisbah Poisson");
            set("Rho", "2780 [kg/m³]", "Ketumpatan");
        }
    }
}

```

```

endwith();

//Global Def:  Var & Function-----

model.variable().create("var1");
with(model.variable("var1"));
    set("ar", "sqrt((x-x0)^2+(y-y0)^2)");
endwith();
model.variable("var1").descr("ar", "r(x,y)");

model.func().create("int1", "Interpolation");
with(model.func("int1"));
    set("funcname", "loadfunc");
    ssetIndex("table", "0", 0, 0);
    ssetIndex("table", "-P", 0, 1);
    ssetIndex("table", "2", 1, 0);
    ssetIndex("table", "-P", 1, 1);
endwith();

model.func().create("int2", "Interpolation");
with(model.func("int2"));
    set("funcname", "dispfunc");
    setIndex("table", "0", 0, 0);
    setIndex("table", "0", 0, 1);
    setIndex("table", "2", 1, 0);
    setIndex("table", "teta", 1, 1);
endwith();

//Geometry & Cylinder Coordinate-----

model.coordSystem().create("sys2", "geom1",
"Cylindrical");
model.geom("geom1").run();
model.geom("geom1").create("cyl1", "Cylinder");
model.geom("geom1").lengthUnit("mm");
with(model.geom("geom1").feature("cyl1"));
    set("r", "Jejari");

```

```

        set("h", "Tinggi");
    endwhile();
    model.geom("geom1").runPre("fin");

//Material-----
    model.material().create("mat1", "Common", "comp1");
    model.material("mat1").label("2024 (UNS A92024)
    [-T3,298K]");
    model.material("mat1").info().create("DIN");
    model.material("mat1").info("DIN").body("AlCu4Mg1");
    model.material("mat1").info().create("UNS");
    model.material("mat1").info("UNS").body("A92024");
    model.material("mat1").info().create("Composition");
    model.material("mat1").info("Composition").body("bal. Al,
    (3.8-4.9) Cu, (1.2-1.8) Mg, 0.5 Si, 0.5 Fe, (0.3-0.9) Mn,
    0.1 Cr, 0.25 Zn, 0.15 Ti (wt%)");
    with(model.material("mat1"));
        set("family", "aluminum");
    endwhile();
    with(model.material("mat1").propertyGroup("def"));
        set("SR", "SR_ T3_ 298K_ 1(t[1/h])[Pa]");
        set("t", "");
    endwhile();
    model.material("mat1").propertyGroup("def").func()
    .create("SR_ T3_ 298K_ 1", "Piecewise");
    with(model.material("mat1").propertyGroup("def")
    .func("SR_ T3_ 298K_ 1"));
        set("funcname", "SR_ T3_ 298K_ 1");
        set("arg", "t");
        set("extrap", "constant");
        set("pieces", new String[][]{{"0.1", "1000.0",
        "(exp(6.184149E+00))*1.000000e6"}});
    endwhile();
    with(model.material("mat1"));

```

```

        set("family", "aluminum");
    endwhile();
    with(model.material("mat1").propertyGroup("def"));
        set("youngsmodulus", new String[]{"YM"});
        set("poissonsratio", new String[]{"v"});
        set("density", new String[]{"Rho"});
    endwhile();
    model.material("mat1").propertyGroup()
        .create("ElastoplasticModel", "Elastoplastic material
model");
    with(model.material("mat1")
        .propertyGroup("ElastoplasticModel"));
        set("sigmags", new String[]{"IYS"});
        set("Et", new String[]{"TM"});
    endwhile();

//Physic-----
    //model.geom("geom1").run();model.physics()
        .create("solid2", "SolidMechanics", "geom1");
    model.study("std1").feature("stat")
        .activate("solid", true);
    model.physics("solid").feature("lemm1").feature()
        .create("plstyl1", "Plasticity", 3);
    with(model.physics("solid").feature("lemm1")
        .feature("plstyl1"));
        set("PlasticStrainModel", "LargePlasticStrains");
    endwhile();
    with(model.physics("solid").prop("Structural
TransientBehavior"));
        set("StructuralTransientBehavior", "Quasistatic");
    endwhile();
    model.physics("solid").feature().create("fix1",
"Fixed", 2);

```

```

model.physics("solid").feature("fix1").selection().
set(new int[]{3});
model.physics("solid").feature().create("bndl1",
"BoundaryLoad", 2);
model.physics("solid").feature("bndl1").selection().
.set(new int[]{4});
with(model.physics("solid").feature("bndl1"));
    set("FperArea", new String[]{"0", "0",
    "loadfunc(para)"});
endwith();
model.physics("solid").feature().create("disp1",
"Displacement2", 2);
model.physics("solid").feature("disp1").selection().
set(new int[]{4});
with(model.physics("solid").feature("disp1"));
    setIndex("coordinateSystem", "sys2", 0);
endwith();
model.physics("solid").feature("disp1")
.setIndex("Direction", true, 1);
with(model.physics("solid").feature("disp1"));
    setIndex("U0", "ar*dispfunc(para)", 1);
endwith();

//Mesh-----
model.mesh("mesh1").feature().create("ftet1", "FreeTet");
with(model.mesh("mesh1").feature("size"));
    set("hauto", "6");
endwith();
model.mesh("mesh1").run();

//Study-----
with(model.study("std1").feature("stat"));
    set("plot", "on");

```

```

endwith();
with(model.study("std1").feature("stat"));
    set("physselection", "solid");
    //set("activate", new String[]{"solid", "off", "
solid2", "on"});
    set("useparam", "on");
    setIndex("pname", "r", 0);
    setIndex("plistarr", "", 0);
    setIndex("punit", "", 0);
    setIndex("pname", "r", 0);
    setIndex("plistarr", "", 0);
    setIndex("punit", "", 0);
    setIndex("pname", "para", 0);
    setIndex("plistarr", "0 range(0.02,0.02,1.0)
range(1.05,0.05,2)", 0);
endwith();
}
}

//computeModel-----
package builder;

import com.comsol.api.*;
import com.comsol.model.*;
import com.comsol.model.physics.*;
import com.comsol.model.application.*;

public class runApp extends ApplicationMethod {

public void execute() {
    model.sol("sol1").study("std1");
    with(model.study("std1").feature("stat"));
        set("notlistsolnum", 1);
        set("notsolnum", "1");

```

```

        set("listsolnum", 1);
        set("solnum", "1");
    endwhile();
    model.sol("sol1").feature().remove("s1");
    model.sol("sol1").feature().remove("v1");
    model.sol("sol1").feature().remove("st1");
    model.sol("sol1").create("st1", "StudyStep");
    with(model.sol("sol1").feature("st1"));
        set("study", "std1");
        set("studystep", "stat");
    endwhile();
    model.sol("sol1").create("v1", "Variables");

    with(model.sol("sol1").feature("v1"));
        set("control", "stat");
    endwhile();
    model.sol("sol1").create("s1", "Stationary");
    model.sol("sol1").feature("s1").create("p1",
    "Parametric");
    model.sol("sol1").feature("s1").feature().remove("pDef");
    with(model.sol("sol1").feature("s1").feature("p1"));
        set("control", "stat");
    endwhile();
    with(model.sol("sol1").feature("s1"));
        set("control", "stat");
    endwhile();
    model.sol("sol1").feature("s1").create("fc1",
    "FullyCoupled");
    with(model.sol("sol1").feature("s1").feature("fc1"));
        set("termonres", "auto");
        set("reserrfact", 1000);
        set("linsolver", "dDef");
        set("termonres", "auto");
        set("reserrfact", 1000);

```

```

endwith();
model.sol("sol1").feature("s1").feature().remove("fcDef");
model.sol("sol1").attach("std1");
model.result().create("pg1", 3);
with(model.result("pg1"));
    set("data", "dset1");
endwith();
model.result("pg1").create("surfl", "Surface");
with(model.result("pg1").feature("surfl"));
    set("expr", new String[]{"solid2.misesGp"});
endwith();
model.result("pg1").label("Stress (solid2)");
model.result("pg1").feature("surfl").create("def",
"Deform");
with(model.result("pg1").feature("surfl").feature("def"));
    set("scaleactive", true);
    set("scale", "1");
    set("expr", new String[]{"u2", "v2", "w2"});
    set("descr", "Displacement field (Material)");
endwith();
model.sol("sol1").runAll();
model.result("pg1").run();
}
}

```

```
//validateCalculation-----
```

```
package builder;
```

```
import com.comsol.api.*;
```

```
import com.comsol.model.*;
```

```
import com.comsol.model.physics.*;
```

```
import com.comsol.model.application.*;
```

```
public class validation extends ApplicationMethod {
```

```

public void execute() {

//Evaluate sigmaSimulation along r
    model.result().table("tbl1").clearTableData();

    model.result().dataset().create("cpt1", "CutPoint3D");
    with(model.result().dataset("cpt1"));
        set("pointy", "0");
        set("pointz", "1");
        set("pointx", "0.1 range(0.5,0.5,14.5)");
    endwhile();
    model.result().dataset("cpt1").run();

    model.result().numerical().create("pev1", "EvalPoint");
    with(model.result().numerical("pev1"));
        set("data", "cpt1");
        setIndex("looplevelinput", "last", 0);
        set("expr", "solid2.misesGp");
        set("descr", "von Mises stress, Gauss-point
        evaluation");
    endwhile();

    model.result().table().create("tbl1", "Table");
    model.result().table("tbl1").comments("Point Evaluation 1
    (solid2.misesGp)");
    with(model.result().numerical("pev1"));
        set("table", "tbl1");
    endwhile();
    model.result().numerical("pev1").setResult();

    model.result().table("tbl1").save("E:/PhD/simulasi/sim
    .txt");

    double sim[][] = readMatrixFromFile("upload:///sim");
    //double pt[][] = transpose (p);
    //String pgTag = model.result().uniquetag("pg");

```

```

//ResultFeature pg = model.result().create(pgTag, 2);
//ResultFeature plot = pg.create("pt1", "PointData");
//plot.set("pointdata", pt);
//plot.run();
//useGraphics(model.result(pgTag), "form1/graphics1");

//remeshCurrentConfiguration-----
package builder; import com.comsol.api.*;
import com.comsol.model.*;
import com.comsol.model.physics.*;
import com.comsol.model.application.*;

public class remesh extends ApplicationMethod {

public void execute() {
    //String remesh = "mesh2";
    //String newMesh = "mesh3";

//Create Remeshed Component-----
    model.result().dataset("dset1").createDeformedConfig
        ("deform1", "mesh2");
    model.geom("deform1").feature("frommesh1").importData();
    model.geom("deform1").run();
    model.mesh("mesh2").run();
    model.modelNode().create("comp2");
    model.geom().create("geom2", 3);
    model.mesh().create("mesh3", "geom2");
    model.geom("geom2").create("imp1", "Import");
    with(model.geom("geom2").feature("imp1"));
        set("type", "mesh");
        set("mesh", "mesh2");
    endwhile();
    model.geom("geom2").feature("imp1").importData();
    model.coordSystem().create("sys4", "geom2",
        "Cylindrical");

```

```
model.geom("geom2").run();
```

```
//Assign Material-----
```

```
model.material().create("mat2", "Common", "comp2");
model.material("mat2").label("2024 (UNS A92024)
[-T3,298K]");
model.material("mat2").info().create("DIN");
model.material("mat2").info("DIN").body("AlCu4Mg1");
model.material("mat2").info().create("UNS");
model.material("mat2").info("UNS").body("A92024");
model.material("mat2").info().create("Composition");
model.material("mat2").info("Composition").body("bal. Al,
(3.8-4.9) Cu, (1.2-1.8) Mg, 0.5 Si, 0.5 Fe, (0.3-0.9) Mn,
0.1 Cr, 0.25 Zn, 0.15 Ti (wt%)");
with(model.material("mat2"));
    set("family", "aluminum");
endwith();
with(model.material("mat2").propertyGroup("def"));
    set("SR", "SR_ T3_ 298K_ 1(t[1/h])[Pa]");
    set("t", "");
endwith();
model.material("mat2").propertyGroup("def").func().create
("SR_ T3_ 298K_ 1", "Piecewise");
with(model.material("mat2").propertyGroup("def").func
("SR_ T3_ 298K_ 1"));
    set("funcname", "SR_ T3_ 298K_ 1");
    set("arg", "t");
    set("extrap", "constant");
    set("pieces", new String[][]{"0.1", "1000.0",
    "(exp(6.184149E+00))*1.000000e+006"});
endwith();
with(model.material("mat2"));
    set("family", "aluminum");
endwith();
```

```

model.physics().create("solid2", "SolidMechanics",
    "geom2");
model.study("std1").feature("stat").activate("solid3",
    true);
with(model.physics("solid2").prop("StructuralTransient
    Behavior"));
    set("StructuralTransientBehavior", "Quasistatic");
endwith();
model.physics("solid2").feature("lemm1").feature()
    .create("plstyl", "Plasticity", 3);
with(model.physics("solid2").feature("lemm1").feature
    ("plstyl"));
    set("PlasticStrainModel", "LargePlasticStrains");
endwith();
with(model.material("mat2").propertyGroup("def"));
    set("youngsmodulus", new String[] "YM");
    set("poissonsratio", new String[] "v");
    set("density", new String[] "Rho");
endwith();
model.material("mat2").propertyGroup().create
    ("ElastoplasticModel", "Elastoplastic material model");
with(model.material("mat2").propertyGroup
    ("ElastoplasticModel"));
    set("sigmags", new String[] "IYS");
    set("Et", new String[] "TM");
endwith();

//Assign Physics-----
model.physics("solid2").feature().create("fix1", "Fixed",
    2);
model.physics("solid2").feature("fix1").selection().set
    (new int[] 3);
model.physics("solid2").feature().create("bndl1",
    "BoundaryLoad", 2);

```

```

model.physics("solid2").feature("bndl1").selection().set
(new int[]4);
with(model.physics("solid2").feature("bndl1"));
    set("FperArea", new String[] "0", "0",
"loadfunc(para)");
endwith();
model.physics("solid2").feature().create("displ",
"Displacement2", 2);
model.physics("solid2").feature("displ").selection().set
(new int[]4);
with(model.physics("solid2").feature("displ"));
    setIndex("coordinateSystem", "sys4", 0);
endwith();
model.physics("solid2").feature("displ").setIndex
("Direction", true, 1);
with(model.physics("solid2").feature("displ"));
    setIndex("U0", "ar*dispfunc(para)", 1);
endwith();

//Mesh-----
-    model.mesh("mesh3").feature().create("ftet1",
"FreeTet");
    with(model.mesh("mesh3").feature("size"));
        set("hauto", "6");
    endwith();
    model.mesh("mesh3").run();

//Study-----
-    with(model.study("std1").feature("stat"));
        set("physselection", "solid");
        set("activate", new String[] "solid", "off",
"solid2", "on");
    endwith();

model.result().dataset().create("dset2", "Solution");

```

```

model.result("pg1").run();
model.result().dataset("dset2").label("Study 1
/Solution 2");
model.result("pg1").run();
with(model.result("pg1"));
    set("data", "dset2");
endwith();
model.result("pg1").run();

with(model.result("pg1").feature("surfl"));
    set("expr", "solid2.misesGp");
    set("descr", "von Mises stress, Gauss-point
evaluation");
endwith();
model.result("pg1").run();
}
}

//resetParameter-----
package builder; import com.comsol.api.*;
import com.comsol.model.*;
import com.comsol.model.physics.*;
import com.comsol.model.application.*;

public class resetParameter extends ApplicationMethod {

public void execute() {
    String answer = "Are you sure you want to reset
parameters?";

    if (answer.equals("Yes"));
model.param().set("Jejari", "15 [mm]");
    model.param().set("Tinggi", "1.25 [mm]");
    model.param().set("rpm", "0.1 [rpm]");
    model.param().set("P", "4 [MPa]");

```

```
model.param().set("N", "8");  
model.param().set("teta", "N/180*3.142");  
model.param().set("YM", "73.1E9 [Pa]");  
model.param().set("IYS", "465E6 [Pa]");  
model.param().set("TM", "65E6 [Pa]");  
//geomState = "notUpdated";  
  
}  
  
}
```

