

PEMBANGUNAN ALOI ALUMINIUM UNTUK PEMROSESAN LOGAM
SEPARA PEPEJAL

MOHD SHUKOR BIN SALLEH

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH
DOKTOR FALSAFAH

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2015

PENAKUAN

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

15 Mei 2015

MOHD SHUKOR BIN SALLEH
P62291

PENGHARGAAN

Alhamdulillah kepada Allah SWT kerana memberikan saya ketabahan dan kesihatan yang baik serta ketajaman pemikiran untuk menyiapkan kajian peringkat PHD ini. Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Profesor Dr. Mohd Zaidi Bin Omar selaku penyelia utama saya di atas segala tunjuk ajar, pendapat, nasihat, keprihatinan dan dorongan sehingga saya dapat menyiapkan kajian ini dengan jayanya. Terima kasih juga saya ucapkan kepada Profesor Madya Dr. Syarif Junaidi selaku penyelia bersama yang banyak membantu saya dengan memberikan pendapat yang bernas semasa menjalankan kajian ini.

Terima kasih kepada Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia yang telah menyediakan kemudahan makmal untuk menjalankan penyelidikan ini. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Malaysia, yang telah menyediakan pembiayaan untuk kajian ini melalui gran GUP-2012-040 dan AP-2012-014 yang diketuai oleh Profesor Dr. Mohd Zaidi Bin Omar. Terima kasih juga saya ucapkan kepada Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM) dan Kementerian Pendidikan Malaysia (KPM) kerana telah menaja saya disepanjang pengajian ini.

Tidak lupa juga kepada semua pensyarah, staf teknikal terutama En. Faizal Bin Ismail, En. Rosli Bin Ahmad dan En. Rosli Bin Yusof serta rakan-rakan di Jabatan Mekanik dan Bahan di atas keprihatinan dan bantuan yang diberikan kepada saya untuk menyiapkan kajian ini.

Penghargaan teristimewa buat keluarga terutama kepada isteri saya Dr. Norasila Binti Zakaria dan anak-anak Aisyah Hana, Alesya Huda, Muhamad Arif dan Muhamad Muaz. Terima kasih juga saya ucapkan kepada ayah saya Tn. Hj. Salleh Bin Mohd Ali dan ibu Pn. Hajah Ramlah Binti Hj. Daud serta adik beradik yang sentiasa memberi semangat dalam menyiapkan penyelidikan ini. Akhir kata, saya berdoa kepada Allah SWT agar kita semua mendapat rahmat dan petunjuk dari Nya serta berjaya mencapai cita-cita masing-masing.

ABSTRAK

Pembentukan-tikso merupakan salah satu jenis pemrosesan logam separa pepejal yang menghasilkan produk hampir siap untuk kegunaan industri automotif. Kebanyakan aloi komersial yang sedia ada tidak memenuhi kriteria proses pembentukan-tikso seperti mempunyai tingkap suhu pemrosesan yang kecil, kepekaan cecair terhadap suhu yang tinggi (melebihi $0.020\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) dan suhu pemejalan yang terlalu besar (melebihi $140\text{ }^{\circ}\text{C}$) sehingga menyukarkan proses pembentukan-tikso dijalankan. Justeru itu aloi baharu yang memenuhi kriteria proses pembentukan-tikso perlu dibangunkan agar proses pembentukan-tikso dapat dijalankan dengan sempurna dan dapat mengurangkan dari berlakunya kecacatan pada produk yang dihasilkan. Bagi tujuan ini, pengiraan dengan menggunakan perisian *Java-Based Material Properties (JMatPro)* digunakan untuk meramalkan kesan kandungan tembaga (Cu) dan magnesium (Mg) terhadap kebolehbentukan-tikso aloi A319 dan aloi Al-5%Si. Keputusan pengiraan termodinamik menunjukkan kandungan Cu (4.0-6.0%bt.) dan Mg (1.0-2.0%bt.) sesuai untuk aloi A319 manakala kandungan Cu (1.0-3.0 %bt.) dan Mg (0.5-1.2%bt.) dikenalpasti sesuai untuk aloi Al-5%Si untuk mengurangkan kepekaan cecair dan membesarkan tingkap suhu pemrosesan. Bahan suapan dihasilkan melalui tuangan cerun penyejuk sebelum digunakan untuk pembentukan-tikso pada 50% kandungan cecair. Beberapa sampel aloi tersebut turut dikenakan rawatan haba T6. Bagi aloi A319, rawatan haba larutan dijalankan pada suhu $505\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 8 jam diikuti dengan pelindapkejutan di dalam air pada suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan penuaan buatan pada suhu $158\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 4 jam. Untuk aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg, rawatan haba larutan dijalankan pada suhu $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 8 jam diikuti dengan pelindapkejutan di dalam air pada suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan seterusnya penuaan buatan pada suhu $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 4 jam. Mikrostruktur dan pembentukan fasa dianalisa dengan menggunakan mikroskop optik, mikroskop pengimbas elektron, spektroskop tenaga serakan sinar-X dan belauan sinar-X sementara sifat mekanikal diperolehi daripada ujian kekerasan dan tegangan. Keputusan menunjukkan peningkatan kandungan Cu dan Mg dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tegangan aloi A319 dan aloi Al-5%Si. Peningkatan pembentukan fasa Al_2Cu , Mg_2Si dan $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_5$ menyumbang kepada peningkatan kekerasan dan kekuatan aloi. Mikrostruktur aloi yang dirawat haba T6 menunjukkan pensferoidan partikel Si dan pemendakan fasa Al_2Cu , Mg_2Si dan $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ dengan lebih seragam berbanding aloi yang tidak dirawat haba. Kekerasan maksimum selepas rawatan haba T6 bagi aloi A319 yang mengandungi 6%bt. Cu dan 2%bt. Mg masing-masing ialah 133 HV dan 137 HV manakala tegangan muktamad masing-masing ialah 361 MPa dan 321 MPa. Kekerasan maksimum selepas rawatan haba T6 bagi aloi Al-5%Si yang mengandungi 3%bt. Cu dan 1.2%bt. Mg pula masing-masing ialah 111 HV dan 124 HV manakala kekuatan tegangan muktamad masing-masing ialah 303 MPa dan 306 MPa. Peningkatan unsur Cu dan Mg di dalam aloi A319 dan Al-5%Si telah memperbaiki kebolehbentukan-tikso dan sifat mekanik aloi tersebut dalam keadaan pembentukan-tikso dan terawat haba melalui pengerasan larutan pepejal dan pemendakan. Komponen automotif juga berjaya difabrikasi dengan menggunakan aloi yang dihasilkan melalui proses pembentukan-tikso.

DEVELOPMENT OF ALUMINIUM ALLOYS FOR SEMISOLID METAL PROCESSING

ABSTRACT

Thixoforming is a type of semisolid metal processing to produce near net-shape products for the automotive industry. Most of the commercial alloys do not meet the criteria of the thixoforming like having a small working window temperature, high fraction liquid sensitivity (more than $0.020\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) and the solidification temperature is too large (more than $140\text{ }^{\circ}\text{C}$) make it difficult for thixoforming process. Therefore, the new alloys that meet the thixoforming criteria should be developed for thixoforming process, so that it can reduce the occurrence of defect on the produced products. For this purpose, a Java-based Material Properties (*JMatPro*) calculation software was used as a first approximation to predict the effects of copper (Cu) and magnesium (Mg) content on thixoformability of A319 and Al-5%Si alloys. The thermodynamic calculation results showed that Cu (4.0-6.0 wt%) and Mg (1.0-2.0 wt%) amount were identified suitable for A319 alloy while Cu (1.0-3.0 wt%) and Mg (0.5-1.2 wt%) content were suitable for Al-5%Si alloy to reduce the liquid sensitivity as well as enlarge the working window temperature. The feedstock material for thixoforming was produced through cooling slope casting under argon gas atmosphere. The chemical composition of the as-cooling slope alloys were determined by X-ray fluorescence. The alloys were then subjected to thixoforming process at 50 % liquid and some of the thixoformed alloys were treated with T6 heat treatment. For A319 alloys, the solution heat treated were performed at $505\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 8 hours followed by quenching in warm water at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and artificial aging at $158\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 4 hours. The samples of Al-5Si% were solution heat treated at $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 8 hours, then quenched in warm water at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, followed by artificial aging at $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 4 hours. Microstructure and phase formation were analysed using an optical microscope, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy and X-ray diffraction while mechanical properties were obtained from hardness and tensile tests. The results indicate that the addition of Cu and Mg in A319 alloy resulted in increased the hardness and tensile strength. The formation of high Al_2Cu and Mg_2Si phase led to an increase in the hardness and tensile strength of the thixoformed alloys. The microstructures of T6 heat treated samples showed a spheroidisation of eutectic silicon and the intermetallic phase Al_2Cu , Mg_2Si and $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ were distributed homogeneously in the sample. The maximum hardness of A319 alloy with 6wt% Cu and 2wt% Mg were 133 HV and 137 HV while ultimate tensile strength were 361 MPa and 321 MPa respectively. The hardness of Al-5%Si alloys with 3wt% Cu and 1.2wt% Mg were 111 HV and 124 HV while the ultimate tensile strength were 303 MPa and 306 MPa respectively. The addition of Cu and Mg have improved the thixoformability and mechanical properties of A319 and Al-5%Si alloys in as-thixoformed and heat treated condition through solid solution strengthening and precipitation of intermetallic phase. Thixoformed automotive components were successfully fabricated using the produced alloy.

KANDUNGAN

		Halaman
PENGAKUAN		ii
PENGHARGAAN		iii
ABSTRAK		iv
ABSTRACT		v
KANDUNGAN		vi
SENARAI JADUAL		x
SENARAI ILUSTRASI		xii
SENARAI SINGKATAN		xxiii
SENARAI SIMBOL		xxiv
BAB I	PENDAHULUAN	
1.1	Pengenalan	1
1.2	Permasalahan Kajian	4
1.3	Objektif Kajian	7
1.4	Skop Kajian	7
BAB II	KAJIAN KEPUSTAKAAN	
2.1	Aluminium	9
2.2	Sistem Aloi Aluminium-Silikon (Al-Si)	10
2.3	Sistem Aloi Aluminium-Silikon-Tembaga-Magnesium (Al-Si-Cu-Mg)	13
2.4	Sistem Aloi Aluminium-Silikon-Magnesium (Al-Si-Mg)	17
2.5	Kesan Unsur Pengaloiian Terhadap Aloi Aluminium-Silikon (Al-Si)	20
2.6	Pemprosesan Logam Separa Pepejal	22
	2.6.1 Reologi buburan aloi separa pepejal	24
	2.6.2 Peneukleusan ira sama matra aloi aluminium	24

2.7	Kebaikan dan Kelemahan Pemprosesan Logam Separa Pepejal	28
2.8	Kriteria Pemilihan Aloi Untuk Proses Pembentukan-tikso	32
	2.8.1 Julat suhu pemejalan	33
	2.8.2 Kepekaan cecair terhadap suhu	33
	2.8.3 Tingkap suhu pemprosesan	34
2.9	Teknologi Penghasilan Bahan Suapan Bukan Dendritik	34
	2.9.1 Adukan mekanikal	35
	2.9.2 Tuangan hidrodinamik magnet (MHD)	36
	2.9.3 Proses tergiat cairan teraruh terikan (SIMA)	38
	2.9.4 Tuangan semburan	40
	2.9.5 Tuangan cerun penyejuk	42
2.10	Proses Pembentukan-tikso	45
	2.10.1 Pemanasan bilet secara aruhan	46
	2.10.2 Pemampatan	51
	2.10.3 Kelakuan ubahbentuk aloi semasa pembentukan-tikso	54
2.11	Rawatan Haba	57
	2.11.1 Rawatan haba larutan	58
	2.11.2 Lindapkejut	60
	2.11.3 Penuaan buatan	61
2.12	Rumusan	62
 BAB III BAHAN DAN KAEDAH KAJIAN		
3.1	Pengenalan	63
3.2	Permodelan Termodinamik	66
3.3	Bahan Suapan	68
3.4	Penyediaan Bahan Suapan	68
3.5	Tuangan Cerun Penyejuk	70
3.6	Pemanasan Separa dan Pelindapkejutan Sampel Tuangan Cerun Penyejuk	74
3.7	Proses Pembentukan-tikso	74
3.8	Rawatan Haba T6	77
3.9	Analisis Komposisi Kimia	78
3.10	Ujian Ketumpatan Dan Keliangan	78
3.11	Kajian Mikrostruktur	79
3.12	Kajian Morfologi dan Komposisi Fasa Aloi Aluminium	82
3.13	Analisis Fasa Aloi Aluminium	83
3.14	Analisis Terma	85

3.15	Ujian Makrokekeraan	85
3.16	Ujian Mikrokekeraan	87
3.17	Ujian Tegangan	88
3.18	Fabrikasi Komponen Automotif	90
3.19	Rumusan	90
BAB IV	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	
4.1	Pengenalan	92
4.2	Kesan Peningkatan Unsur Cu dan Mg Terhadap Kriteria Pembentukan-tikso Aloi A319 dan Al-5%Si	93
	4.2.1 Tingkap suhu pemprosesan	94
	4.2.2 Kepekaan cecair terhadap suhu	98
	4.2.3 Suhu pemejalan	99
4.3	Pencirian Bahan Suapan	101
	4.3.1 Penuangan acuan kekal	101
	4.3.2 Analisis komposisi kimia	104
	4.3.1 Analisis terma	106
	4.3.4 Tingkap suhu pemprosesan berdasarkan DSC	106
	4.3.5 Kepekaan cecair terhadap suhu berdasarkan DSC	107
	4.3.6 Suhu pemejalan berdasarkan DSC	109
4.4	Penuangan Cerun Penyejuk	112
	4.4.1 Penentuan suhu tuangan dan panjang cerun penyejuk yang optimum	113
4.5	Pemanasan Separa Dan Lindapkejut	121
4.6	Aloi Pembentukan-tikso	131
	4.6.1 Aloi pembentukan-tikso A319	131
	4.6.2 Kesan peningkatan unsur Cu dan Mg terhadap mikrostruktur aloi A319	133
	4.6.3 Aloi pembentukan-tikso Al-5%Si-Cu	151
	4.6.4 Kesan peningkatan unsur Cu dan Mg terhadap mikrostruktur aloi Al-5%Si	153
	4.6.5 Analisis fasa aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg	169
	4.6.6 Analisis fasa aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg	172
4.7	Ketumpatan Dan Keliangan	176
4.8	Kesan Peningkatan unsur Cu dan Mg Terhadap Sifat Mekanik Aloi A319 Dan Al-5%Si	178
	4.8.1 Mikrokekeraan dan makrokekeraan	178
	4.8.2 Kekuatan tegangan dan pemanjangan	185
	4.8.3 Analisis permukaan patah	195

4.9	Ringkasan Kesan Peningkatan Unsur Cu dan Mg Di antara Aloji A319 dan Aloji Al-5%Si	202
4.10	Aloji Pembentukan-tikso Dirawat Haba T6	204
4.10.1	Kesan peningkatan unsur Cu dan Mg terhadap mikrostruktur aloji A319 selepas dirawat haba T6	204
4.10.2	Kesan peningkatan unsur Cu dan Mg terhadap mikrostruktur aloji Al-5%Si selepas dirawat haba T6	218
4.10.3	Analisis fasa aloji A319 dengan peningkatan kandungan Cu dan Mg	231
4.10.4	Analisis fasa aloji Al-5%Si dengan peningkatan kandungan Cu dan Mg	235
4.11	Kesan Peningkatan Unsur Cu dan Mg Terhadap Sifat Mekanik Aloji A319 dan Al-5%Si Yang Dirawat Haba T6	238
4.11.1	Mikrokekeraan dan Makrokekeraan	238
4.11.2	Kekuatan tegangan dan pemanjangan aloji	243
4.11.3	Analisis permukaan patah	251
4.12	Ringkasan Kesan Peningkatan Unsur Cu dan Mg Di antara Aloji A319 dan Aloji Al-5%Si Yang Dirawat Haba T6	255
4.13	Ringkasan Sifat Mekanik Aloji Pembentukan-tikso Sebelum Dan Selepas Rawatan Haba T6	257
4.14	Fabrikasi Komponen Automotif	262
4.15	Rumusan	265
 BAB V KESIMPULAN DAN CADANGAN		
5.1	Kesimpulan	266
5.2	Sumbangan Kajian	268
5.3	Cadangan Penyelidikan	269
5.3	Penutup	270
 RUJUKAN		
 LAMPIRAN		
A	Senarai Penerbitan	288
B	Graf DSC Dan Profil Kandungan Cecair Aloji Aluminium	290
C	Jadual Kekeraan Aloji	297
D	Graf Ujian Tegangan Aloji	298

SENARAI JADUAL

Nombor Jadual		Halaman
2.1	Pengkelasan siri aloi tuangan berdasarkan jenis unsur pengaloiian	10
2.2	Komposisi kimia aloi tuangan hipoeutektik Al-Si	13
2.3	Tindakbalas tak varian dan kuartenari pada aloi aluminium dalam gambarajah fasa Al-Si-Cu-Mg	16
2.4	Tindakbalas binari dan ternari yang berlaku pada unsur aluminium dalam gambarajah fasa Al-Si-Mg	19
2.5	Perbandingan pemprosesan logam separa pepejal dan tuangan acuan graviti untuk menghasilkan rim tayar kenderaan	31
3.1	Unsur yang digunakan untuk fabrikasi aloi aluminium	68
3.2	Komposisi kimia aloi tuangan acuan kekal	70
3.3	Parameter tuangan cerun penyejuk untuk aloi A319	72
3.4	Parameter tuangan cerun penyejuk untuk aloi Al-5%Si-Cu	73
3.5	Spesifikasi pelantak hidraulik menegak	77
3.6	Spesifikasi pemanas aruhan berfrekuensi tinggi	77
3.7	Set aloi yang dikaji	80
3.8	Komposisi kimia larutan <i>Keller</i>	80
4.1	Parameter pemprosesan aloi yang dikaji dengan menggunakan kaedah permodelan termodinamik	97
4.2	Suhu solidus, likuidus dan suhu pemejalan untuk aloi yang dikaji dengan menggunakan permodelan termodinamik	100
4.3	Komposisi kimia aloi tuangan yang dihasilkan	105
4.4	Parameter pemprosesan aloi yang dikaji dengan menggunakan <i>DSC</i>	108

4.5	Perbandingan parameter pemrosesan aloi yang dikaji dengan menggunakan permodelan <i>JMatPro</i> dan teknik <i>DSC</i>	109
4.6	Suhu solidus, likuidus dan suhu pemejalan aloi yang dikaji dengan menggunakan teknik <i>DSC</i>	111
4.7	Perbandingan suhu solidus, likuidus dan suhu pemejalan aloi yang dikaji dengan menggunakan permodelan <i>JMatPro</i> dan teknik <i>DSC</i>	112
4.8	Suhu dan masa memegang isoterma untuk aloi yang dikaji	126
4.9	Keelektronegatifan setiap unsur yang terdapat dalam aloi yang dikaji	147
4.10	Peratusan keliangan sampel aloi aluminium	178
4.11	Keputusan ujian tegangan aloi pembentukan-tikso A319	187
4.12	Keputusan ujian tegangan aloi pembentukan-tikso A319	245
4.13	Makrokekeraan dan mikrokekeraan aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg sebelum dan selepas rawatan haba T6	259
4.14	Makrokekeraan dan mikrokekeraan aloi Al-5%Si dan aloi yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg sebelum dan selepas rawatan haba T6	259
4.15	Kekuatan tegangan dan pemanjangan aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg	260
4.16	Kekuatan tegangan dan pemanjangan aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg selepas rawatan haba T6	260
4.17	Kekuatan tegangan dan pemanjangan aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg	261
4.18	Kekuatan tegangan dan pemanjangan aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg selepas rawatan haba T6	261
4.19	Parameter pembentukan-tikso untuk menghasilkan penutup aci sesondol	263

SENARAI ILUSTRASI

Nombor Rajah		Halaman
2.1	Gambarajah fasa untuk sistem aluminium-silikon	12
2.2	Gambarajah fasa aloi Al-Si-Cu-Mg	15
2.3	Fasa sistem aloi Al-Si-Cu-Mg dalam keadaan separa pepejal	15
2.4	Gambarajah fasa cecair Al-Si-Mg	18
2.5	Gambarajah fasa pepajal Al-Si-Mg	19
2.6	Graf kelikatan melawan daya ricihan aloi aluminium	23
2.7	Kelikatan ketara melawan pecahan pepejal untuk sistem aloi Al-15Pb yang disejukkan pada 0.33 K min^{-1} pada kadar ricihan yang berbeza	26
2.8	Kelikatan ketara melawan kadar ricihan bagi sistem aloi Al-15Pb untuk pelbagai pecahan pepejal	26
2.9	Graf pemanasan aloi bagi proses tuangan dan pembentukan-tikso	31
2.10	Diagram pecahan cecair melawan suhu	34
2.11	Diagram skematik <i>rheo-caster</i> berterusan	36
2.12	Diagram skematik untuk sistem pengaduk elektromagnet (a) pengadukan mandatar (b) pengadukan menegak dan (c) pengadukan heliks	38
2.13	Ilustrasi skematik peringkat proses tergiat cairan teraruh terikan	40
2.14	Proses tuangan semburan	41
2.15	Sistem tuangan cerun penyejuk	44
2.16	Evolusi mikrostruktur semasa tuangan cerun penyejuk (a) dendrit (b) roset (c) ripened roset dan (d) sfera	45
2.17	Proses pembentukan-tikso	46

2.18	Pemanasan bilet secara aruhan	48
2.19	Kesan pemanasan pada suhu 550 °C (a) 4 minit (b) 6 minit	51
2.20	Diagram skematik peralatan pembentukan-tikso	53
2.21	Komponen automotif yang dihasilkan daripada aloi A357 (a) ampaian letak enjin (b) pengalas stereng kereta	54
2.22	Graf menunjukkan sifat tiksotropi pada buburan aloi separa pepejal	55
2.23	Empat mekanisma yang mengawal ubah bentuk aloi semasa pembentukan-tikso di dalam keadaan separa pepejal (a) aliran cecair (b) aliran cecair dan partikel pepejal (c) gelinciran diantara partikel pepejal (d) ubah bentuk plastik pada partikel pepejal	57
2.24	Proses rawatan haba T6	58
3.1	Carta alir keseluruhan kajian yang dijalankan	65
3.2	Carta alir keseluruhan kajian yang dijalankan	71
3.3	Aparatus tuangan cerun penyejuk	73
3.4	Unit pemampat pembentukan-tikso hidraulik menegak	76
3.5	Acuan pembentukan-tikso	76
3.6	Pemotongan bilet untuk analisis mikrostruktur	81
3.7	Mesin pencanai	81
3.8	Mesin pengilap	82
3.9	Mikroskop optik	82
3.10	Mikroskop elektron imbasan (SEM)	83
3.11	Spektrometer belauan sinar-X	84
3.12	Permeteran kalori pengimbasan kebezaan (DSC)	85
3.13	Mesin digital makrokekeraan Rockwell	86
3.14	Mesin digital mikrokekeraan Vickers	87

3.15	Ilustrasi lekuk intan pada sampel ujian mikrokekerasan Vickers	88
3.16	Mesin pengujian semesta	89
3.17	Saiz sampel ujian tegangan yang digunakan	89
3.18	Penukup aci sesondol enjin kereta waja <i>Campro</i>	90
4.1	Graf peratus cecair melawan suhu untuk aloi A319 dan aloi yang dipelbagaikan kandungan Cu	95
4.2	Graf peratus cecair melawan suhu untuk aloi A319 dan aloi yang dipelbagaikan kandungan Mg	95
4.3	Graf peratus cecair melawan suhu untuk aloi Al-5%Si yang dipelbagaikan kandungan Cu	96
4.4	Graf peratus cecair melawan suhu untuk aloi Al-5%Si yang dipelbagaikan kandungan Mg	96
4.5	Mikrostruktur aloi tuangan yang dihasilkan (a) aloi A319 (b) aloi A1 (c) Aloii B1 (d) aloi C1 (e) aloi D1 (e) aloi E1 (f) aloi F1	103
4.6	Mikrostruktur aloi tuangan yang dihasilkan dari Al-5%Si (a) aloi A2 (b) aloi B2 (c) Aloii C2 (d) aloi D2 (e) aloi E2 (f) aloi F2	104
4.7	Bilet yang dihasilkan semasa proses tuangan cerun penyejuk	113
4.8	Mikrograf optik aloi A319 melalui tuangan cerun penyejuk (a) 620 °C-300 mm (b) 620 °C-400 mm (c) 620 °C-500 mm (d) 630 °C-300 mm (e) 630 °C-400 mm (f) 630 °C-500mm (g) 640 °C-300 mm (h) 640 °C-400 mm dan (i) 640 °C-500 mm	116
4.9	Mikrograf optik aloi A2 melalui tuangan ceru penyejuk (a) 640 °C-300 mm (b) 640 °C-400 mm (c) 640 °C-500 mm (d) 650 °C-300 mm (e) 650 °C-400 mm (f) 650 °C-500mm (g) 660 °C-300 mm (h) 660 °C-400 mm (i) 660 °C-500 mm	117
4.10	Saiz sfera α -Al untuk aloi A319 yang terhasil daripada suhu tuangan dan panjang cerun penyejuk yang berbeza	119
4.11	Faktor bentuk α -Al untuk aloi A319 yang terhasil daripada suhu tuangan dan panjang cerun penyejuk yang berbeza	120

4.12	Saiz sfera α -Al untuk aloi A2 yang terhasil daripada suhu tuangan dan panjang cerun penyejuk yang berbeza	120
4.13	Faktor bentuk α -Al untuk aloi A2 yang terhasil daripada suhu tuangan dan panjang cerun yang berbeza	121
4.14	Mikrograf aloi A319 yang dihasilkan selepas pemanasan separa pada suhu 50% kandungan cecair selama 3 minit	122
4.15	Diagram suhu melawan masa untuk proses pemanasan separa dan pelindapkejutan	123
4.16	Mikrograf aloi yang dihasilkan selepas pemanasan separa pada 50% kandungan cecair selama 5 minit (a) aloi A319 : 571 °C, (b) aloi A1 : 568 °C, (c) aloi B1 : 566 °C, (d) aloi C1 : 565 °C, (e) aloi D1 : 570 °C, (f) aloi E1 : 564 °C dan (g) aloi F1 : 558 °C	125
4.17	Saiz pepejal α -Al selepas pemanasan separa pada 50% kandungan cecair selama 5 minit	126
4.18	Faktor bentuk pepejal α -Al selepas pemanasan separa pada 50% kandungan cecair selama 5 minit	126
4.19	Mikrograf aloi A2 yang dihasilkan selepas pemanasan separa pada suhu 50% kandungan cecair selama 3 minit	128
4.20	Mikrograf aloi yang dihasilkan selepas pemanasan separa pada 50% kandungan cecair selama 5 minit (a) aloi A2 : 585 °C, (b) aloi B2 : 580 °C, (c) aloi C2 : 574 °C, (d) aloi D2 : 580 °C, (e) aloi E2 : 575 °C, (f) aloi F2 : 570 °C	129
4.21	Saiz α -Al selepas pemanasan separa pada 50% kandungan cecair selama 5 minit	130
4.22	Faktor bentuk α -Al selepas pemanasan separa pada 50% kandungan cecair selama 5 minit	130
4.23	Sampel A319 yang dihasilkan dari pembentukan-tikso pada (a) 40% kandungan cecair (b) 45% kandungan cecair dan (c) 50% kandungan cecair	132
4.24	Bilet yang dihasilkan dari proses pembentukan-tikso untuk aloi A319	133
4.25	Mikrograf aloi yang dihasilkan melalui proses pembentukan-tikso (a) aloi A319, (b) aloi A1, (c) aloi B1, (d) aloi C1, (e) aloi D1, (f) aloi E1 dan (g) aloi F1	134

4.26	Saiz pepejal α -Al dan faktor bentuk aloi pembentukan-tikso	136
4.27	Pemetaan unsur dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi A319 (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	137
4.28	Pemetaan unsur dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi C1 (6%bt. Cu) (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	138
4.29	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi F1 (2 %bt. Mg) (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	139
4.30	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX Aloii A319	142
4.31	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX Aloii C1	143
4.32	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX Aloii D1	144
4.33	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX Aloii F1	145
4.34	Mikrostruktur aloi elektron terserak balik untuk aloi pembentukan-tikso (a) A319, (b) aloi A1 (b) aloi B1, (c) aloi C1, (d) aloi D1, (e) aloi E1, (f) aloi F1 (a : β - Al_5FeSi ; b: $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_5$; c: Al_2Cu ; d: Mg_2Si ; e: $\text{Al}_9\text{FeMg}_3\text{Si}_5$)	149
4.35	Gambarajah fasa bagi aloi A319	150
4.36	Gambarajah fasa bagi aloi C1	151
4.37	Gambarajah fasa bagi aloi F1	151
4.38	Bilet yang dihasilkan dari proses pembentukan-tikso untuk aloi Al-5%Si-Cu (aloi A2)	152
4.39	Mikrograf aloi yang dihasilkan melalui proses pembentukan-tikso (a) aloi A2, (b) aloi B2, (c) aloi C2, (d) aloi D2 (e) aloi E2 dan (f) aloi F2	153
4.40	Saiz pepejal α -Al dan faktor bentuk aloi pembentukan-tikso Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu dan Mg	155
4.41	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi A2 (1 %bt. Cu) (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	156
4.42	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan	157

	SEM-EDX bagi aloi C2 (3%bt. Cu) (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	
4.43	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi D2 (0.5 %bt. Mg) (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	158
4.44	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi F2 (1.2 %bt. Mg) (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	159
4.45	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi A2	161
4.46	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi C2	162
4.47	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi D2	163
4.48	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi F2	164
4.49	Mikrostruktur aloi elektron terserak balik untuk aloi pembentukan-tikso (a) aloi tuangan A2 (b) tikso A2 (c) tikso B2 (d) tikso C2 (e) tikso D2 (f) tikso E2 (g) tikso F2 (a : Al ₂ Cu, b : Al ₅ FeSi, c : Al ₅ Cu ₂ Mg ₃ Si ₅ , d : Mg ₂ Si, e : Al ₉ FeMg ₃ Si ₅)	167
4.50	Gambarajah fasa bagi aloi A2	168
4.51	Gambarajah fasa bagi aloi C2	168
4.52	Gambarajah fasa bagi aloi F2	169
4.53	Spektrum pembelauan sinar-X untuk aloi A319 yang mengandungi (a) 3%bt. Cu, (b) 4%bt. Cu, (c) 5%bt. Cu dan (d) 6%bt. Cu	171
4.54	Spektrum pembelauan sinar-X untuk aloi A319 yang mengandungi (a) 1%bt. Mg, (b) 1.5%bt. Mg dan (c) 2%bt. Mg	172
4.55	Spektrum pembelauan sinar-X untuk aloi Al-5%Si yang mengandungi (a) 1%bt. Cu, (b) 2%bt. Cu dan (c) 3%bt. Cu	174
4.56	Spektrum pembelauan sinar-X untuk aloi Al-5%Si yang mengandungi (a) 0.5%bt. Mg, (b) 0.8%bt. Mg dan (c) 1.2%bt. Mg	175
4.57	Ketumpatan aloi A319 dengan peningkatan kandungan Cu (aloi A1-C1) dan Mg (aloi D1-F1)	177
4.58	Ketumpatan aloi Al-5%Si dengan peningkatan	177

	kandungan Cu (aloi A2-C2) dan Mg (aloi D2-F2)	
4.59	Posisi pelekukan sampel A319 semasa ujian mikrokekerasan	180
4.60	Pelekukan sampel A319 pada fasa yang terbentuk (pembesaran 400X)	180
4.61	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan (4-6%bt.) (A319: 3%bt. Cu ; A1: 4%btCu ; B1: 5%bt.Cu dan C1: 6%bt.Cu)	181
4.62	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Mg (%bt.) yang berbeza (A319 : 0.3%bt. Mg; D1 : 1%btMg ; E1 : 1.5%bt.Mg dan C1 : 2%bt.Mg)	182
4.63	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu (%bt.) yang berbeza (A2 : 1%bt. Cu ; B2 : 2%bt.Cu ; C2 : 3%bt.Cu	184
4.64	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Mg (%bt.) yang berbeza (D2 : 0.5%bt. Mg ; E2 : 0.8%bt. Mg ; F2 : 1.2%bt. Mg)	184
4.65	Sampel ujian tegangan	186
4.66	Graf tegasan melawan terikan bagi aloi pembentukantikso A319 (a) sampel 1 (b) sampel 2 dan (c) sampel 3	187
4.67	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Cu (%bt.) yang berbeza (A319: 3%bt. Cu ; A1: 4%bt. Cu ; B1: 5%bt. Cu dan C1: 6%bt. Cu)	188
4.68	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi A319 dan aloi yang ditingkatkan kandungan Mg (%bt.) yang berbeza (A319: 0.3%bt. Mg ; D1: 1%bt. Mg ; E1: 1.5%bt. Mg dan F1: 2%bt. Mg)	189
4.69	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Cu (%bt.) yang berbeza. (A2 : 1%bt. Cu ; B2 : 2%bt. Cu ; C2 : 3%bt.Cu).	191
4.70	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi Al-5%Si yang ditingkatkan kandungan Mg (%bt.) (D2 : 0.5%bt. Mg ; E2 : 0.8%bt.Mg ; F2 :	192

	1.2%bt.Mg)	
4.71	Sampel aloi A319 yang dihasilkan melalui kaedah (a) tuangan acuan kekal dan (b) pembentukan-tikso	193
4.72	Mikrograf SEM permukaan patah aloi (a) aloi tuangan A319 (b) tikso-A319 (c) tikso A1 (d) tikso B1(e) tikso C1 (f) tikso D1 (g) tikso E1 (h) tikso F1	199
4.73	Mikrograf SEM permukaan patah aloi (a) aloi tuangan A2 (b) tikso A2 (c) tikso B2 (d) tikso C2 (e) tikso D2 (f) tikso E2 (g) tikso F2	200
4.74	Ilustrasi proses patah aloi aluminium yang berlaku pada bahagian eutektik aloi Al	201
4.75	Mikrograf aloi yang dihasilkan selepas rawatan haba T6 (a) aloi tuangan A319, (b) tikso A319, (c) tikso aloi A1, (d) tikso aloi B1, (e) tikso aloi C1, (f) tikso aloi D1, (g) tikso aloi E1 dan (h) tikso aloi F1	205
4.76	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi A319 selepas rawatan haba T6 (a) imej elektron terserak balik (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	206
4.77	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi C1 (6%bt. Cu) selepas rawatan haba T6 (a) imej elektron terserak balik, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg.	207
4.78	Pemetaan unsur di dalam aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi F1 selepas rawatan haba T6 (a) imej elektron terserak balik, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	208
4.79	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi A319 selepas rawatan haba T6	210
4.80	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso C1 (6%bt. Cu) selepas rawatan haba T6	211
4.81	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso D1 (1.0%bt. Mg) selepas rawatan haba T6	212
4.82	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso F1 (2.0%bt. Mg) selepas rawatan haba T6	213
4.83	Mikrostruktur aloi elektron terserak balik selepas rawatan haba T6 (a) aloi tuangan A319 (b) tikso A319 (c) tikso A1 (d) tikso B1 (e) tikso C1 (f) tikso D1 (g)	215

	tikso E1 dan (h) tikso F1 (a : Al ₂ Cu, b : Al ₅ FeSi ₃ , c : Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , d : Mg ₂ Si, e : Al ₉ FeMg ₃ Si ₅)	
4.84	Model pensferoidan partikel Si	216
4.85	Gambarajah skematik “ <i>Ostwald ripening</i> ”	216
4.86	Mikrograf aloi yang dihasilkan selepas rawatan haba T6 (a) aloi tuangan A2, (b) Aloj tikso A2, (c) aloj tikso B2, (d) aloj tikso C2, (e) aloj tikso D2, (f) aloj tikso E2, (g) aloj tikso F2	219
4.87	Pemetaan unsur aloi dengan menggunakan elektron terserak balik bagi aloi A2 selepas rawatan haba T6 (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	220
4.88	Pemetaan unsur aloi dengan menggunakan elektron terserak balik bagi aloi C2 selepas rawatan haba T6 (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	221
4.89	Pemetaan unsur aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi D2 selepas rawatan haba T6 (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	222
4.90	Pemetaan unsur aloi dengan menggunakan SEM-EDX bagi aloi F2 selepas rawatan haba T6 (a) imej SEM, (b) Al, (c) Si, (d) Cu, (e) Mn, (f) Fe dan (g) Mg	223
4.91	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso A2 (1.0%bt. Cu) selepas rawatan haba T6.	225
4.92	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso C2 (3.0%bt. Cu) selepas rawatan haba T6	226
4.93	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso D2 (0.5%bt. Mg) selepas rawatan haba T6	227
4.94	Mikrograf elektron terserak balik dan EDX aloi tikso F2 (1.2%bt. Mg) selepas rawatan haba T6	228
4.95	Mikrostruktur aloi elektron terserak balik selepas rawatan haba T6 (a) aloi tuangan A2 (b) tikso A2 (c) tikso B2 (d) tikso C2 (e) tikso D2 (f) tikso E2 (g) tikso F2 (a : Al ₂ Cu, b : Al ₅ FeSi ₃ , c : Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , d : Mg ₂ Si, e : Al ₉ FeMg ₃ Si ₆)	230
4.96	Spektrum pembelauan sinar-X bagi aloi yang dirawat haba T6 (a) 3%bt. Cu, (b) 4%bt. Cu, (c) 5%bt. Cu dan	233

	(d) 6%bt.Cu	
4.97	Spektrum pembelauan sinar-X bagi aloi yang dirawat haba T6 (a) 1.0%bt. Mg, (b) 1.5%bt. Mg dan (c) 2.0%bt.Mg	234
4.98	Spektrum pembelauan sinar-X untuk aloi Al-5%Si yang telah dirawat haba T6 (a) 1%bt. Cu, (b) 2%bt. Cu, (c) 3%bt. Cu.	236
4.99	Spektrum pembelauan sinar-X untuk aloi Al-5%Si yang telah dirawat haba T6 (a) 0.5%bt. Mg, (b) 0.8%bt. Mg dan (c) 1.2%bt.Mg	238
4.100	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi A319 yang dirawat haba T6 dengan kandungan Cu (%bt.) yang berbeza (A319: 3%bt. Cu, A1: 4%bt. Cu, B1: 5%bt. Cu dan C1: 6%bt. Cu).	239
4.101	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi A319 yang dirawat haba T6 dengan kandungan Mg (%bt.) yang berbeza (A319: 0.3%bt. Mg, D1: 1%bt. Mg, E1: 1.5%bt. Mg dan F1: 2%bt. Mg).	240
4.102	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi Al-5%Si yang dirawat haba T6 dengan kandungan Cu (%bt.) yang berbeza (A2: 1%bt. Cu, B2: 2%bt. Cu dan C2: 3%bt. Cu)	241
4.103	Mikrokekerasan dan makrokekerasan bagi aloi Al-5%Si yang dirawat haba T6 dengan kandungan Mg (%bt.) yang berbeza (D2: 0.5%bt. Mg, E2: 0.8%bt. Mg dan F2: 1.2%bt. Mg).	242
4.104	Graf tegasan melawan terikan bagi aloi pembentukantikso A319 (a) sampel 1 (b) sampel 2 dan (c) sampel 3	245
4.105	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi A319 dan aloi yang mengandungi 4-6%bt. Cu selepas dikenakan rawatan haba T6 (A319: 3%bt. Cu, A1: 4%bt. Cu, B1: 5%bt. Cu dan C1: 6%bt. Cu).	246
4.106	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi A319 dan aloi yang mengandungi 1-2%bt. Mg selepas dikenakan rawatan haba T6 (A319: 0.3%bt. Mg, D1: 1%bt. Mg, E1: 1.5%bt. Mg dan F1: 2%bt. Mg)	247
4.107	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi Al-5%Si yang mengandungi 1-3%bt. Cu selepas dikenakan rawatan haba T6 (A2: 1%bt. Cu, B2:	248

	2%bt. Cu dan C2: 3%bt. Cu).	
4.108	Kekuatan tegangan, kekuatan alah dan pemanjangan bagi aloi Al-5%Si yang mengandungi 0.5-1.2%bt. Mg selepas dikenakan rawatan haba T6 (A2: 0.5%bt. Mg, E2: 0.8%bt. Mg dan F2 1.2%bt. Mg)	249
4.109	Mikrograf SEM permukaan patah aloi selepas rawatan haba T6 (a) aloi tuangan A319 (b) tikso A319 (c) tikso A1 (d) tikso B1 (e) tikso C1 (f) tikso D1 (g) tikso E1 dan (h) tikso F1	253
4.110	Mikrograf SEM permukaan patah aloi selepas rawatan haba T6 (a) aloi tuangan A2 (b) tikso A2 (c) tikso B2 (d) tikso C2 (e) tikso D2 (f) tikso E2 (g) tikso F2	254
4.111	Penukup aci sesondol enjin proton Waja	262
4.112	Acuan penukup aci sesondol	263
4.113	Penukup aci sesondol selepas dijalankan kemas permukaan (a) aloi F1 dan (b) aloi F2	264
4.114	Perbandingan kekerasan penukup aci sesondol yang dihasilkan oleh aloi pembentukan-tikso	264
4.115	Perbandingan spesifikasi kekuatan tegangan kepala silinder (<i>cylinder head</i>) dengan aloi pembentukan-tikso yang dihasilkan (selepas rawatan haba T6)	265

SENARAI SINGKATAN

A319	Al-7%bt.Si-4%bt.Cu
A356	Al-7%bt.Si-0.3%bt.Mg
A357	Al-7%bt.Si-0.5%bt.Mg
A380	Al-8.5%bt.Si-3.5%bt.Cu-1.3%bt.Fe
A390	Al-17%bt.Si-4.5%bt.Cu-0.6%bt.Mg
Al-Si	Aluminium-silikon
Al-Si-Cu	Aluminium-silikon-tembaga
Al-Si-Cu-Mg	Aluminium-silikon-tembaga-magnesium
ASM	American Society for Metals
CamPro	Cam Profile
CNC	Kawalan Berangka Terkomputer
DSC	Permeteran Kalori Pengimbasan Kebezaan
EDX	Sinar-X Serakan Tenaga
GP	Guinier-Preston
GS	Saiz Sfera
JMatPro	Java Based Material Properties
MHD	Tuangan Hidrodinamik Magnet
SEM	Mikroskop Elektron Imbasan
SF	Faktor Bentuk
SiC	Silikon Karbida
SIMA	Proses Tergiat Cairan Teraruh Terikan
Sn-Pb	Sistem Stanum Plumbum
XRD	Spektrometer Pembelauan Sinar-X
XRF	Pendarflour Sinar-X

SENARAI SIMBOL

$\%at.$	peratus atom
$\%bt.$	peratus berat
A	ampere
Å	angstrom
D	min dua penjuru D1 dan D2
$D1$	diameter penjuru yang diukur pada lekuk intan
$D2$	diameter penjuru yang diukur pada lekuk intan ke dua
Df/dT	kepekaan cecair terhadap suhu
d_{hkl}	jarak antara satah kekisi
e	kedalaman tusukan oleh beban F_1 semasa ujian makrokekeraan Rockwell
E	pemalar 100 unit bagi pelekuk intan dan bebola keluli
F	beban yang dikenakan semasa ujian mikrokekeraan Vickers (kgf)
F_0	beban permulaan minor semasa ujian makrokekeraan Rockwell
F_1	beban tambahan major semasa ujian makrokekeraan Rockwell
g	gram
H	kekeraan bahan
HR	nombor kekeraan Rockwell
HV	kekeraan Vickers
K	Kelvin
Kg	kilogram
KHz	kilohertz
KM	kilometer
Kv	kilovolt
KW	kilowatt