

**PENGHASILAN AGREGAT RINGAN DARI ABU BAHAN API TERHANCUR
SEBAGAI BAHAN UTAMA**

oleh

KHAIRUL NIZAR BIN ISMAIL

**Tesis yang diserahkan untuk memenuhi keperluan bagi
Ijazah Doktor Falsafah**

Julai 2006

PENGHARGAAN

Syukur Alhamdulillah,

Saya ingin merakamkan penghargaan saya kepada ketiga-tiga penyelia saya iaitu, Prof. Madya Dr Khairun Azizi Mohd Azizli (Dekan Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan & Sumber Mineral, Universiti Sains Malaysia), Lt. Kol. Prof. Dato' Dr Kamarudin Hussin (Rektor, Kolej Universiti Kejuruteraan Utara Malaysia) dan Prof. Dr Sabarudin Mohd (Dekan Fakulti Kejuruteraan Awam & Alam Sekitar, Kolej Universiti Kejuruteraan Teknikal Malaysia) di atas dorongan, pertolongan, nasihat dan tunjuk ajar yang telah diberikan sepanjang tempoh penyelidikan ini.

Saya juga ingin merakam ribuan terima kasih kepada pensyarah dan kakitangan PPK Bahan & Sumber Mineral iaitu Prof. Madya Dr Ahmad Fauzi Mohd Noor, Prof. Madya Dr Azizan Aziz, Prof Dr Zainal Ariffin Ahmad, En. Samayamutthirian, Dr Cheong dan Dr Srimala atas bantuan yang diberikan. Terima kasih juga kepada kakitangan PPK Bahan, KUKUM, Prof. Madya Dr Shamsul Baharin Jamaludin, En. Ruzaidi Ghazali & En Sobri Idris yang banyak membantu menjayakan penyelidikan ini.

Ucapan penghargaan ini juga untuk kedua ibu bapa saya Haji Ismail Halim dan Hajah Faridah Idris serta keluarga atas doa dan dorongan. Tidak lupa kepada isteri tersayang, Wan Eliza Wan Mohamed Noor dan anak-anak, Anis Adlina, Aina Amira dan Arif Adli yang memahami dan melalui kesukaran bersama-sama saya sepanjang penyelidikan ini dijalankan. Semoga ia akan mendorong peningkatan ilmu kepada isteri dan anak-anak saya. Tidak lupa kepada Kerajaan Malaysia atas tajaan biasiswa untuk menjayakan penyelidikan ini. Hanya Allah S.W.T yang dapat membalas jasa dan budi tuan-tuan.

Terima kasih.

SUSUNAN KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
JADUAL KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vii
SENARAI RAJAH	ix
SENARAI SIMBOL	xiv
SENARAI SINGKATAN	xv
SENARAI LAMPIRAN	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xix

BAB SATU : PENGENALAN

1.1	Agregat Ringan	1
1.2	Penggunaan Agregat di Malaysia.	2
1.3	Sumber Bahan Api Terhancur di Malaysia	4
1.4	Penggunaan Abu Bahan Api Terhancur Dalam Penghasilan Agregat Ringan	6
1.5	Skop Kajian.	8
1.6	Objektif Kajian	9

BAB DUA : KAJIAN MAKLUMAT

2.1	Pengenalan	10
2.2	Jenis-jenis Agregat Ringan	10
2.3	Faktor Yang Mempengaruhi Penghasilan Agregat Ringan	17
2.4	Ciri-Ciri Agregat Ringan	20
	2.4.1 Bentuk, Saiz dan Permukaan Agregat Ringan	21
	2.4.2 Ketumpatan Partikel Agregat	22
	2.4.3 Ketumpatan Pukal (<i>Loose bulk density</i>)	23
	2.4.4 Penyerapan Air.	24
	2.4.5 Kekuatan Agregat	28
	2.4.6 Kandungan Sulfat	28
	2.4.7 Kehilangan pencucuhan (<i>Loss On Ignition</i>)	29

2.5	Bahan Mentah Yang Digunakan Untuk Menghasilkan Agregat Ringan	29
2.5.1	Abu Bahan Api Terhancur (<i>Pulverised Fuel Ash</i>)	29
2.5.1.1	Komposisi Mineral	31
2.5.1.2	Komposisi Kimia	32
2.5.1.3	Mikrostruktur Abu Bahan Api Terhancur	35
2.5.2	Abu Sekam Padi	37
2.5.3	Tanah Liat Berkembang (<i>Expanded Clay</i>)	39
2.5.4	Debu Kuari	40
2.6	Proses Penghasilan Agregat Ringan	42
2.6.1	Rekabentuk Campuran Agregat Ringan	44
2.6.2	Penggumpalan	46
2.6.3	Proses Pensinteran	49
2.6.4	Mikrostruktur Agregat Ringan Daripada Abu Bahan Api Terhancur	52
2.7	Konkrit Agregat Ringan	56
2.7.1	Rekabentuk Konkrit Agregat Ringan	57
2.7.2	Ciri-ciri Konkrit Agregat Ringan	58
2.7.3	Mikrostruktur Konkrit Agregat Ringan	58

BAB TIGA : METODOLOGI KAJIAN

3.1	Pengenalan	63
3.2	Pensampelan Bahan Mentah	65
3.2.1	Abu Bahan Api Terhancur (ABAT)	65
3.2.2	Debu Kuari	66
3.2.3	Tanah Liat Berkembang	66
3.2.4	Abu Sekam Padi	66
3.3	Pencirian Bahan Mentah	67
3.3.1	Pengisaran	67
3.3.2	Analisis Saiz Partikel	68
3.3.3	Penentuan Graviti Tentu	69
3.3.4	Penentuan Unsur	69
3.3.5	Penentuan Fasa Bahan	70
3.3.6	Kajian Mikrostruktur	70
3.4	Penghasilan Agregat Ringan	71
3.4.1	Pemilihan komposisi campuran bahan mentah kawalan	72
3.4.1.1	Pencampuran	73

3.4.1.2	Penggumpalan	73
3.4.1.3	Pensinteran	73
3.4.2	Kesan perubahan komposisi campuran bahan mentah dengan perubahan suhu pensinteran	74
3.4.3	Komposisi Campuran PQ, PR & PQR	75
3.5	Pencirian Agregat Ringan	77
3.5.1	Warna dan Bentuk Sampel	77
3.5.2	Penentuan Ketumpatan	78
3.5.3	Nilai Hentaman Agregat	80
3.5.4	Keliangan	81
3.5.5	Penyerapan Air	82
3.5.6	Kajian Mikrostruktur Menggunakan Mikroskop Optik dan Imbasan Elektron	83
3.6	Ujian Awal Konkrit Agregat Ringan	83
3.6.1	Komposisi Campuran Konkrit Agregat Ringan	83
3.6.2	Pencirian Konkrit Agregat Ringan	86

BAB EMPAT : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1	Pencirian Bahan Mentah	88
4.1.1	Analisis saiz partikel	88
4.1.2	Analisis Graviti Tentu	91
4.1.3	Analisis Komposisi Kimia (XRF)	91
4.1.4	Penentuan Fasa Bahan (XRD)	93
4.1.5	Analisis Morfologi	94
4.2	Pencirian Agregat Ringan Sampel Kawalan A dan B	99
4.2.1	Warna dan Keadaan Fizikal Agregat	99
4.2.2	Kesan Suhu Pensinteran Keatas Sifat Fizikal Agregat Ringan	106
4.2.2.1	Ketumpatan Pukul Partikel dan Keliangan Sebenar	106
4.2.2.2	Keliangan Ketara dan Penyerapan Air	109
4.2.2.3	Analisis Mikrostruktur	111
4.3	Kesan Perubahan Suhu Pensinteran keatas Ciri-Ciri Agregat Ringan	113
4.3.1	Agregat Sampel PQ	113
4.3.1.1	Warna dan Keadaan Fizikal Agregat	113
4.3.1.2	Ketumpatan Pukul dan Keliangan Ketara	116
4.3.1.3	Keliangan Sebenar dan Penyerapan Air	118
4.3.1.4	Analisis Mikrostruktur	120
4.3.1.5	Perbincangan Mengenai Agregat Ringan PQ	120

4.3.2	Agregat Sampel PR	122
4.3.2.1	Warna dan Keadaan Fizikal Agregat	122
4.3.2.2	Perbandingan Ketumpatan Pukul dan Keliangan Ketara	125
4.3.2.3	Keliangan Sebenar dan Penyerapan Air	127
4.3.2.4	Mikrostruktur Agregat Ringan PR	129
4.3.2.5	Perbincangan Mengenai Agregat Ringan PR	130
4.3.3	Agregat Kajian Sampel PQR	131
4.3.3.1	Warna dan Keadaan Fizikal Agregat	131
4.3.3.2	Ketumpatan Pukul dan Keliangan Ketara	134
4.3.3.3	Keliangan Sebenar dan Penyerapan Air	136
4.3.3.4	Analisis Mikrostruktur	138
4.3.3.5	Perbincangan Mengenai Agregat Ringan PQR	139
4.4	Kajian Lanjutan Agregat Ringan Sampel PQR 1	140
4.4.1	Analisis Penentuan Fasa PQR 1 Sebelum dan Selepas Pensinteran	140
4.4.2	Analisis Mikrostruktur	142
4.5	Konkrit Agregat Ringan	156
4.5.1	Keputusan Ujian Konkrit Agregat Ringan	156
4.5.2	Mikrostruktur Ikatan Antara Simen dan Agregat Ringan	159

BAB LIMA : KESIMPULAN DAN CADANGAN MASA HADAPAN

5.1	Kesimpulan	163
5.2	Cadangan Masa Hadapan	165

SENARAI RUJUKAN	167
------------------------	------------

LAMPIRAN	173
-----------------	------------

SENARAI JADUAL

	Muka surat
1.1 Campuran Bahan Api Dalam Penjanaan Elektrik 1995-2005 (%)	5
2.1 Pengkelasan Agregat Ringan (RILEM, 1976)	14
2.2 Kesan Proses Pensinteran (Worall, 1975)	19
2.3 Jadual Ketumpatan Pukal Agregat Ringan (FIP Manual, 1983)	24
2.4 Jadual Penyerapan Air Oleh Agregat Ringan	26
2.5 Kadar Penyerapan Air Bagi Agregat <i>Lytag</i> (Swamy & Lambert, 1981)	26
2.6 Jadual Kekuatan Agregat (takat pecah) Pada Saiz 10mm – 5mm (FIP Manual, 1983)	28
2.7 Julat Sebatian Kimia Abu Bahan Api Terhancur (ACI 226.3R, 1987)	33
2.8 Pengkelasan Jenis Abu Bahan Api Terhancur Berdasarkan Komposisi Kimia. (ACI 226.3R, 1987)	34
2.9 Spesifikasi Bahan Api Terhancur Menurut Piawaian British, BS 3892	34
2.10 Komposisi Bahan Mentah <i>Lytag</i> (2006) Dan Verma (1998)	45
2.11 Ciri-ciri Agregat Sampel <i>Lytag</i> (2006) Dan Verma (1998) Yang Dihasilkan	45
2.12 Suhu pensinteran agregat ringan ABAT yang biasa digunakan	49
2.13 Ketumpatan Konkrit Agregat Ringan Dari Agregat Ringan Abu Bahan Api Terhancur (Sumber: Data Produk <i>Lytag</i> , Oktober 1998)	57
3.1 Komposisi Bahan Mentah Kawalan A dan B	72
3.2 Komposisi Campuran PQ, PR Dan PQR	75
3.3 Nisbah Campuran Konkrit Agregat Ringan Kajian	84
4.1 Perbezaan Saiz Min Bahan Mentah	90
4.2 Perbezaan Graviti Tentu Bahan Mentah	91
4.3 Perbandingan Julat Sebatian Kimia Abu Bahan Api Terhancur (ACI 226.3R, 1987) Dan Swamy (1981) Dengan Sampel Kajian	92
4.4 Perbezaan Analisis Komposisi Kimia Keseluruhan Bahan Mentah	93
4.5 Pemerhatian Ke Atas Agregat Ringan Yang Telah Dihasilkan Dengan Komposisi Kawalan A Dan B	99

4.6	Keputusan Analisis Fizikal Agregat Kawalan A Dan B	106
4.7	Kandungan Debu Kuari Komposisi Campuran PQ	113
4.8	Kandungan Abu Sekam Padi Komposisi Campuran PR	122
4.9	Kandungan Debu Kuari Dan Abu Sekam Padi Dalam Komposisi Campuran PQR	131
4.10	Ciri-ciri Agregat Sampel PQR 1	142
4.11	Keputusan Kekuatan Mampatan Dan Ketumpatan Kiub Yang Diperolehi Bagi Ujian Awal Konkrit Ringan.	158

SENARAI RAJAH

	Muka surat
1.1 Penghasilan Agregat Biasa Di Kuala Lumpur Dan Selangor	3
2.1 Jenis-Jenis Agregat (sumber : RILEM 1976)	11
2.2 Agregat Ringan Dari Abu Bahan Api Terhancur (Verma <i>et al</i> ,1998)	13
2.3 Agregat Ringan Azerit (Pioro, 2004)	13
2.4 Bangunan BMW Di Jerman Dibina Dengan Menggunakan Agregat Ringan	16
2.5 Mikrostruktur Agregat Ringan Pada Suhu Pensinteran Yang Berbeza (Cheeseman & Viridi, 2005)	20
2.6 a) Partikel Abu Bahan Api Terhancur. b) EDX (American Concrete Institute, ACI 226.3R,1987)	36
2.7 Morphologi Abu Bahan Api Terhancur (Elkhadiri et al, 2002)	36
2.8 Sekam Padi	37
2.9 Partikel Abu Sekam Padi Selepas Pembakaran	38
2.10 Analisis Saiz Partikel Abu Sekam Padi (www.rickhuskash.com)	38
2.11 Mikrostruktur Tanah Liat Berkembang Yang Melalui Proses Persinteran Pada Suhu 1140 ⁰ C (Segadaes <i>et al</i> , 2005)	39
2.12 Analisis Saiz partikel debu kuari, debu kapur dan simen (Ho et al, 2002).	40
2.13 Mikrostruktur Debu Kuari (Ho et al, 2002)	41
2.14 Carta Alir Proses Penghasilan Agregat Ringan (Bijen ,1986)	42
2.15 Daya Ikatan Antara Butiran (Brook, 1969)	46
2.16 Tegangan Permukaan Antara Dua Partikel (Gokhan & Ata, 2000)	47
2.17 Diagram Fasa Pembentukan Pelet Agregat (Harrison & Munday, 1975)	48
2.18 Jenis-jenis Ikatan Pengikat (Venenere, 1991)	50
2.19 Persinteran Agregat Jenis Lytag (Lytag Ltd)	51
2.20 Pandangan Keseluruhan Agregat Lytag Dengan Pembesaran x10 (Swamy & Lambert, 1981)	53

2.21	Keratan Rentas Agregat Ringan, (x320, skala 10 μm) (Swamy & Lambert, 1981)	54
2.22	Permukaan Keratan Rentas Agregat Lytag,(Swamy & Lambert, 1981)	55
2.23	Partikel <i>Cenosphere</i> Yang Bertindakbalas Terlukur (x750,skala 10 μm) (Puertas & Jemenaz, 2002)	56
2.24	Saling Hubung Agregat Lytag Dengan Matrik Konkrit (x40 ,Skala 100 μm) (Swamy & Lambert, 1981)	59
2.25	Imej Mikrograf Menunjukkan Ikatan Antara Permukaan Simen Dan Agregat Ringan (x75)(Lo & Cui, 2004)	60
2.26	Permukaan Agregat Ringan Dengan Lapisan Hubung Matrik Simen (x 2000) (Lo & Cui, 2004)	61
2.27	Mikrostruktur Zon Antara Muka Di antara Agregat Dan Matrik Simen (Karen, 2004)	61
2.28	Ikatan Saling Kunci (<i>interlocking</i>) Di antara Permukaan Agregat RIngan Dengan Matrik Simen (x 5000) (Lo & Cui, 2004)	62
3.1	Carta Alir Prosedur Kajian	64
3.2	Carta Alir Pencirian Bahan Mentah	67
3.3	Pengisar Planet Yang Digunakan Untuk Proses Pengisaran	68
3.4	Carta Alir Penghasilan Agregat Ringan	71
3.5	Relau Pemanasan Untuk Proses Pensinteran	74
3.6	Carta Alir Pencirian Yang Dijalankan Ke Atas Partikel Agregat Ringan	77
3.7	Proses Penyediaan Dan Ujian Ke Atas Konkrit agregat Ringan Kajian	85
4.1	Graf Taburan Saiz Partikel bahan mentah	89
4.2	Warna Bahan-Bahan Mentah Yang Digunakan Untuk Menghasilkan Agregat Ringan.	90
4.3	Analisis Fasa Bahan Mentah Dan Campuran Bahan Mentah	94
4.4	Mikrograf SEM Perbandingan Sampel Bahan Mentah	95
4.5	Perbandingan Analisis EDAX Sampel Bahan Mentah	96
4.6	Mikrograf SEM Sampel Abu Bahan Api Terhancur Yang Menunjukkan Diameter Partikel ' <i>Cenosphere</i> '	97
4.7	Mikrograf SEM Partikel ' <i>Cenosphere</i> '(Pembesaran 2200x)	98

4.8	Imej Partikel Cenosphere Di bawah Mikroskop Optik (Pembesaran 1000x)	98
4.9	Agregat Anum Sampel Kawalan A	100
4.10	Agregat Anum Sampel Kawalan B	101
4.11	Agregat Ringan Sampel Kawalan A Dan B Pada Suhu Pensinteran 1100 °C	102
4.12	Agregat Ringan Sampel Kawalan A dan B Pada Suhu Pensinteran 1300 °C	102
4.13	Perubahan Warna Dan Bentuk Sampel Agregat Kawalan A Dan B Dengan Peningkatan Suhu Pensinteran	105
4.14	Perbandingan Ketumpatan Pukal Partikel Dan Keliangan Sebenar Agregat Ringan Sampel Kawalan A Dan B Melawan suhu Pensinteran.	108
4.15	Graf Hubungkait Di antara Kadar Keliangan Ketara Dan Kadar Penyerapan Air Dengan Suhu Pensinteran Sampel Kawalan A Dan Kawalan B	110
4.16	Analisis Mikrostruktur Agregat Ringan Kawalan A dan B Pada Tiga Suhu Pensinteran Yang Berbeza	112
4.17	Perubahan Warna Dan Bentuk Sampel Agregat PQ Dengan Peningkatan Suhu Pensinteran	115
4.18	Graf Perbandingan Di Antara Ketumpatan Pukal Partikel PQ Dan Keliangan Ketara Melawan Suhu Pensinteran	117
4.19	Graf Perbandingan Di Antara Keliangan Sebenar Dan Penyerapan Air Sampel Agregat PQ Lawan Peningkatan Suhu Pensinteran	119
4.20	Analisis Mikrostruktur agregat Ringan Sampel PQ Pada Tiga Suhu Pensinteran	121
4.21	Perubahan Warna Dan Bentuk Sampel Agregat PR Dengan Peningkatan Suhu Pensinteran	124
4.22	Graf Perbandingan Di antara Ketumpatan Pukal Partikel PR Dan Keliangan Ketara Melawan Suhu Pensinteran.	127
4.23	Graf Keliangan Sebenar dan Penyerapan Air Sampel Agregat PR 1, PR 2 Dan PR 3 Lawan Peningkatan Suhu Pensinteran.	129
4.24	Analisis Mikrostruktur Agregat Ringan Sampel PR 1, PR 2 Dan PR 3 Pada Tiga Suhu Pensinteran Yang Berbeza	130
4.25	Perubahan Warna Sampel Agregat PQR 1, PQR 2 Dan PQR 3 Dengan Peningkatan Suhu Pensinteran	133

4.26	Graf Perbandingan Di antara Ketumpatan Pukal Partikel Dan Keliangan Ketara PQR Melawan Suhu Pensinteran	135
4.27	Graf Keliangan Sebenar Dan Penyerapan Air Sampel-sampel PQR Melawan Peningkatan Suhu Pensinteran	137
4.28	Analisis Mikrostruktur Agregat Ringan Sampel PQR 1, PQR 2 Dan PQR 3 Pada Tiga Suhu Pensinteran Yang Berbeza	139
4.29	Perbandingan Analisis Penentuan Fasa Sampel PQR 1 Sebelum Dan Selepas Pensinteran	141
4.30	Keratan Rentas Sampel Azgregat PQR 1 Dengan Pembesaran 100x Menggunakan Mikroskop Optik Yang Menunjukkan Liang Terbuka Dan Tertutup Agregat Ringan.	143
4.31	Agregat Ringan Kajian Menunjukkan Keliangan. (Mikroskop Optik 100x)	144
4.32	Morfologi Permukaan Agregat Ringan PQR 1 Menggunakan Mikroskop Imbasan Elektron	145
4.33	Mikrostruktur Sampel Agregat Ringan PQR 1 Berbanding Dengan Kenaikan Suhu Pensinteran	147
4.34	Morfologi Keratan Agregat Ringan PQR 1 Menggunakan Mikroskop Imbasan Elektron	148
4.35	Ujian EDX Ke Atas Keratan Agregat Ringan PQR 1 Menggunakan Mikroskop Imbasan Elektron	149
4.36	Mikrostruktur Bahagian Tengah Agregat Yang Menunjukkan Struktur Indung Madu	150
4.37	Mikrostruktur Bahagian Tengah Agregat Yang Menunjukkan Struktur Indung Madu Pada Pembesaran 150x	150
4.38	Mikrostruktur Agregat Ringan PQR 1 Yang Menunjukkan Struktur Indung Madu Pada Pembesaran 330x	151
4.39	Mikrostruktur Agregat Ringan PQR 1 Yang Menunjukkan Struktur Indung Madu Pada Pembesaran 500x	152
4.40	Mikrostruktur Bahagian Liang Agregat Dengan Pembesaran 500x	153
4.41	Mikrostruktur Bahagian Liang Agregat Pada Pembesaran 2000x	153
4.42	Mikrostruktur Liang Kecil Agregat Ringan Pada Pembesaran 3700x	154
4.43	Struktur Kristal Dari Cantuman Cenosphere Pada Pembesaran 6000 x	155
4.44	Struktur Cenopshere Dalam Agregat Rringan PQR 1 Dengan Pembesaran 11000x	155

4.45	Agregat Ringan PQR 1	156
4.46	Keratan Kiub Konkrit Agregat Ringan Yang Dihasilkan	157
4.47	Permukaan 'Saling Kunci' (Interlock) Agregat Ringan Kajian	160
4.48	Mikrostruktur Permukaan Agregat PQR 1 Dengan Matrik Simen-Pasir	161
4.49	Pemetaan Letaan Simen Dan Agregat PQR 1	162
4.50	Pemetaan Agregat PQR 1 Dan Letaan Simen	162

SENARAI SIMBOL

Simbol

V _c	Keliangan sebenar
ρ_{spec}	Ketumpatan serbuk
ρ_{part}	Ketumpatan agregat
μm	Micron
M1	Jisim botol
M2	Jisim serbuk dan botol
M3	Jisim serbuk, botol dan air suling
M4	Jisim botol dan air suling
W1	Berat sampel agregat di udara
W2	Berat sampel terampai di dalam air
W3	Berat sampel di udara selepas dihampagas
ρ_{pukal}	Ketumpatan pukal agregat
ρ_{serbuk}	Ketumpatan sebenar agregat
Q	Nilai bacaan pada mesin ujian semesta-UTM
A	Luas permukaan kiub beban dikenakan

SENARAI SINGKATAN

Singkatan

ABAT	Abu Bahan Api Terhancur
SiO ₂	Silika
Al ₂ O ₃	Alumina
FeO ₃	Ferum
CaO	Kalsium
XRD	X-ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence
SEM	Scanning Electron Microscopy
LOI	Lost On Ignition
d ₅₀	Purata Saiz Min Partikel
Q	Kuarza
M	Mulit
G	Grafit
H	Hematit
K	Kaolinit
A	Anhidrat

SENARAI LAMPIRAN

	Muka surat
Lampiran A : Analisis Saiz Partikel Bahan Mentah	173
Lampiran B : Analisis Kimia Bahan Mentah (XRF)	177
Lampiran C : Analisis Penentuan Unsur Bahan (XRD)	181
Lampiran D : Senarai Penerbitan	185

PENGHASILAN AGREGAT RINGAN DARI ABU BAHAN API TERHANCUR SEBAGAI BAHAN UTAMA.

ABSTRAK

Kajian ini merangkumi penghasilan agregat ringan daripada abu bahan api terhancur. Matlamat utama kajian ini adalah untuk menghasilkan agregat ringan yang boleh digunakan sebagai agregat gantian dalam konkrit kegunaan struktur. Abu bahan api terhancur adalah bahan mentah utama yang digunakan dalam kajian ini dan merupakan sisa buangan yang boleh menyebabkan pencemaran alam sekitar. Agregat ringan dari abu bahan api terhancur mempunyai ketumpatan yang rendah, kekuatan yang tinggi dan seterusnya mengurangkan beban mati dan kos pengendalian bahan binaan dalam kerja-kerja pembinaan.

Proses penghasilan agregat ringan dari abu bahan api terhancur melibatkan pengisaran, pencampuran, penggumpalan dan pensinteran bahan mentah untuk proses pengerasan dan ikatan partikel. Ia juga meliputi kajian tentang pencirian fizikal, mekanikal dan kimia bahan mentah seperti abu bahan api terhancur, tanah liat terkembang, debu kuari dan abu sekam padi. Debu kuari, tanah liat terkembang dan abu sekam padi turut digunakan sebagai bahan mentah tambahan dalam proses ini. Kesan pensinteran di antara suhu 1180 °C dan 1250 °C ke atas ketumpatan, keliangan ketara, peratus penyerapan air, mineralogi dan mikrostruktur agregat ringan telah dikaji. Pencirian sampel agregat ringan juga dibuat menggunakan analisis penyerakan sinar-X (XRD), analisis belauan sinar X (XRF) dan morfologi menggunakan mikroskop sinaran elektron.

Analisis kimia menunjukkan abu bahan api terhancur yang digunakan berada dalam kelas F dengan purata saiz partikel 6.92 µm. Ia mengandungi fasa kaca silika bersama dengan fasa kristal kuarza, hematit dan mulit. Agregat ringan yang terbaik

dihasilkan daripada kajian ini mengandungi 50 % abu bahan api terhancur, 30 % abu sekam padi, 10 % debu kuari dan 10 % tanah liat terkembang (PQR 1) dan telah digunakan untuk kajian selanjutnya. Keputusan yang diperolehi mendapati pada suhu 1230 °C, agregat ringan PQR 1 mempunyai ketumpatan pukal partikel sebanyak 1.388 g/cm³ , manakala ketumpatan pukal longgar adalah 990 kg/m³ untuk agregat bersaiz kasar. Penyerapan air selama 24 jam untuk agregat PQR 1 adalah 0.24 % dan mempunyai keliangan sebanyak 27.15 %. Berdasarkan keputusan XRD, didapati fasa grafit yang mengandungi karbon telah hilang dan terbebas sebagai gas karbon dioksida. Keputusan di sokong oleh analisis mikrostruktur yang menunjukkan terdapat liang pada keratan agregat ringan dengan peningkatan suhu pensinteran. Keputusan ini telah memenuhi Piawaian British BS 3797 Bahagian 2 (1990) untuk agregat ringan. Konkrit agregat ringan yang menggunakan agregat ringan PQR 1 telah dihasilkan dan ujian kekuatan mampatan, ketumpatan dan mikrostruktur telah dijalankan pada hari ke 28 usia konkrit. Kekuatan mampatan yang diperolehi pada hari ke 28 adalah 30.5 N/mm² (30 MPa) manakala purata ketumpatan adalah 1867.56 kg/m³.

THE PRODUCTION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES FROM PULVERISED FUEL ASH AS THE MAIN MATERIAL.

ABSTRACT

The present study covers the production of lightweight aggregates using pulverized fuel ash. The main aim of this research was to produce lightweight aggregates which can be used as replacement for normal (natural) aggregates in structural concrete. Pulverised fuel ash was the main raw material used in this study and among the wastes which can cause disposal and environmental degradation problems. Lightweight aggregates produced from pulverised fuel ash, will have low density, high strength and it will reduce the dead weight and material handling costs for construction work.

The production processes of lightweight aggregate from pulverised fuel ash involved grinding, mixing of raw materials, agglomeration and sintering process for hardening and binding of the particles. It also involved study on the physical, mechanical and chemical properties of raw materials such as pulverized fuel ash, expanded clay, quarry dust and rice husk ash. Quarry dust, clay and rice husk ash were also used as additional raw materials in this process. The effect of sintering at temperatures between 1180 °C and 1250 °C on density, apparent porosity, percent of water absorption, mineralogy and microstructure of lightweight aggregates was examined. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and the morphology was examined by scanning electron microscope (SEM).

Chemical analysis showed that pulverized fuel ash used, was F class with an average particle size of 6.92 µm. It contained siliceous glass phase together with the crystalline quartz phase, hematite and mullite. The best lightweight aggregates

obtained from this study consisted of 50 % pulverized fuel ash, 30 % rice husk ash, 10% quarry dust and 10 % expanded clay (PQR 1) and was used for further study. Result obtained showed that at the sintering temperature of 1230°C, the lightweight aggregate PQR 1 had particle bulk density of 1.388 g/cm³ and loose bulk density of 990 kg/m³ for coarse aggregates. The 24 hours water absorption for aggregate PQR 1 was 0.24 % and contained 27.15 % porosity. Based on the XRD result, it was found that the graphite phase that contained carbon was absent and had decomposed as carbon dioxide gas. This result was further supported by the microstructure of the aggregate which showed the existence of voids in the cross section of the aggregate with increasing sintering temperature. This result has satisfied the specification of British Standard BS 3797, Part 2 (1976) for lightweight aggregate. Lightweight concrete using the lightweight aggregates PQR 1 was produced and the compressive strength, density and microstructure of the lightweight aggregate concrete were studied up to 28 days. The average 28-day compressive strength was recorded as 30.5 N/mm² (30 MPa) while, the average density was 1867.56 kg/m³.

BAB 1 PENGENALAN

1.1 Agregat Ringan.

Agregat didefinisikan sebagai satu bahan kaku pepejal yang mampat dan biasanya dirujuk sebagai batu baur, granit atau pasir. Agregat ringan pula boleh didefinisikan sebagai satu bahan pepejal yang mempunyai rongga di dalamnya dan ketumpatan yang lebih rendah dari agregat biasa. Ciri-ciri agregat ringan ini boleh ditentukan melalui bentuk, permukaan, saiz, ketumpatan, modulus keanjalan, kekuatan dan juga kadar penyerapan. Menurut Piawaian British BS 3797, (1990), spesifikasi agregat ringan untuk konkrit menjelaskan bahawa agregat ringan kasar perlu mempunyai ketumpatan pukal kurang dari 1200 kg/m^3 .

Biasanya agregat ringan dihasilkan dari bahan-bahan semulajadi seperti lempung, tanah liat, syal, debu gunung berapi dan abu bahan api terhancur. Semua jenis agregat ringan dihasilkan dengan menggunakan bahan mentah yang mempunyai kandungan silika yang tinggi. Kebanyakan agregat ringan dihasilkan secara pembakaran bahan mentah pada suhu yang tinggi sehingga mencapai suhu lakur yang akan memperkuat struktur agregat ringan tersebut (FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete, 1983).

Agregat ringan mempunyai sifat-sifat fizikal yang berbeza daripada agregat biasa. Perbezaan yang paling ketara adalah ketumpatan agregat ringan biasanya 30 % lebih rendah daripada agregat biasa. Agregat ringan untuk kegunaan struktur mempunyai ketumpatan kurang daripada 2.0 mg/m^3 dan ketumpatan pukal kering kurang daripada 1200 kg/m^3 (Owen & Newman, 2003). Kelebihan menggunakan agregat yang berketumpatan rendah adalah ia dapat mengurangkan kos keseluruhan pembinaan di mana rekabentuk dan saiz sesuatu struktur seperti

cerucuk, tiang, rasuk dan dinding dapat dikurangkan semasa peringkat rekabentuk. Jurutera struktur perlu mengambil kira beban mati (*dead load*) seperti berat konkrit di dalam rekabentuk struktur bangunan. Pengurangan berat konkrit sehingga 30 % dapat menjimatkan kos pembinaan yang diperlukan untuk struktur-struktur utama bangunan (FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete, 1983).

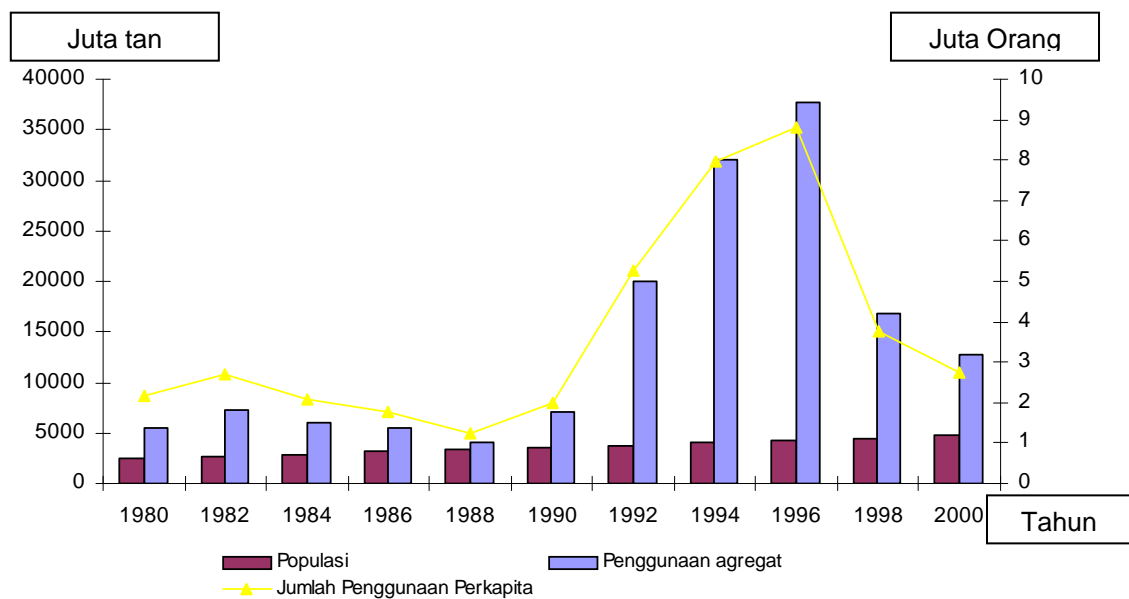
Peningkatan penggunaan agregat ringan dalam penghasilan konkrit ringan di Amerika Syarikat dan Eropah telah didorong oleh kesukaran mendapat kelulusan perlombongan dan juga pengenalan cukai-cukai baru ke atas sumber asli. Ini menyebabkan sumber-sumber bahan mentah terbuang seperti abu bahan api terhancur, lempung tanah liat dan abu gunung berapi digunakan untuk menghasilkan agregat ringan (Newman & Choo, 2003).

Penghasilan agregat ringan secara komersial memerlukan kos modal yang agak tinggi kerana ia memerlukan peralatan seperti pengisar, relau pembakaran dan tapak kilang yang besar. Kos penggunaan tenaga elektrik atau bahan api adalah tinggi kerana agregat perlu dikeluarkan dalam kuantiti yang banyak bagi menjamin bekalan yang berterusan. Pada kebiasaannya, tapak kilang dibina berdekatan dengan sumber bahan mentah (FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete, 1983) .

1.2 Penggunaan Agregat di Malaysia.

Penggunaan agregat ringan di Malaysia adalah di tahap yang amat minimum disebabkan tiada agregat ringan dihasilkan secara komersial di dalam negara. Ini di sebabkan agregat biasa, iaitu batu baur amat mudah diperolehi dari kuari-kuari di seluruh Malaysia. Rajah 1.1 jelas menunjukkan jumlah pengeluaran agregat biasa

berkait rapat dengan pembangunan dan jumlah penduduk di sesuatu kawasan. Projek pembangunan di sekitar Kuala Lumpur dan Selangor mendorong kepada peningkatan ini. Pada tahun 2000, penggunaan agregat untuk pembinaan adalah 7.5 kg sehari untuk setiap penduduk di Kuala Lumpur dan Selangor. Kadar tertinggi pengeluaran adalah pada tahun 1996 di mana pengeluaran agregat adalah sebanyak 38 juta tan (Cheong, 2002). Kadar pengeluaran agregat susut selepas tahun 1996 akibat daripada kegawatan ekonomi dunia yang menyebabkan projek pembangunan mengalami kesan yang agak teruk.



Rajah 1.1 : Penghasilan agregat biasa di Kuala Lumpur dan Selangor, (Cheong, 2002)

Seiring dengan pembangunan di alaf baru, bahan-bahan binaan yang baru perlu diperkenalkan di dalam industri pembinaan. Pergantungan terhadap batu baur atau granit untuk penghasilan konkrit perlu dikurangkan atas faktor alam sekitar. Kesedaran mengenai pentingnya pemuliharaan alam semulajadi menyebabkan kerja-kerja pengkuarian perlu dikurangkan atas sebab hakisan dan juga pencemaran udara.

Agregat ringan adalah bahan yang boleh digunakan sebagai bahan alternatif kepada batu baur di dalam penghasilan konkrit. Penggunaan agregat ringan dapat mengurangkan ketumpatan konkrit dan pada masa yang sama boleh digunakan untuk menghasilkan konkrit ringan. Ia tidak terbatas untuk kegunaan dinding kalis haba, malahan boleh digunakan untuk kegunaan struktur seperti tiang, rasuk dan asas, sekiranya kekuatan mampatan konkrit menepati piawaian yang ditetapkan seperti Piawaian British BS 8110 Bahagian 2 (1997) konkrit kegunaan struktur.

Dengan menggunakan konkrit agregat ringan, beban mati untuk sesuatu binaan akan berkurangan serendah 25 % (Lytag, 2006) daripada konkrit biasa dan ini mengurangkan saiz binaan struktur. Sekiranya faktor ini diambilkira dalam proses merekabentuk struktur binaan, ianya akan mengurangkan kos keseluruhan binaan tanpa menjejaskan kekuatan binaan (Clarke, 1993). Konkrit ringan yang dihasilkan perlu mempunyai ketumpatan konkrit yang rendah untuk dikelasifikasikan sebagai konkrit ringan dan dalam masa yang sama mempunyai kekuatan mampatan yang tinggi.

Penghasilan agregat ringan di Malaysia adalah wajar dibangunkan untuk kegunaan sektor pembinaan di masa akan datang. Bahan-bahan mentah seperti abu bahan api terhancur, tanah liat lempung, debu kuari serta abu sekam padi, boleh digunakan untuk menghasilkan agregat ringan. Penggunaan abu bahan api terhancur boleh mengurangkan pencemaran alam sekitar dan salah satu cara adalah menggunakannya untuk menghasilkan agregat ringan.

1.3 Sumber Abu Bahan Api Terhancur di Malaysia.

Di Malaysia, peningkatan harga diesel mulai 1 Julai 2005 dari RM 1.081 seliter kepada RM 1.281 seliter turut menyebabkan peningkatan kos dalam

penjanaan kuasa elektrik. Pengantungan kepada diesel untuk penjanaan kuasa elektrik di Malaysia telah dikurangkan oleh pihak Tenaga Nasional Berhad dengan pembinaan lebih banyak logi janakuasa yang menggunakan arang batu seperti di Lumut, Perak dan di Pasir Gudang, Johor. Penggunaan arang batu yang meningkat akan menghasilkan lebih banyak abu bahan api terhancur yang boleh digunakan untuk penghasilan agregat ringan. Laporan Rancangan Malaysia ke 8 (2000) menunjukkan industri penjanaan kuasa elektrik akan terus berkembang. Jumlah penjanaan kuasa elektrik dijangka meningkat 67.8 % iaitu 69,371 gigawatt/jam pada tahun 2000 kepada 102,340 gigawatt/jam pada tahun 2005.

Berdasarkan Jadual 1.1, penggunaan minyak dan gas dalam penjanaan elektrik, dijangka mengalami penurunan kerana kosnya yang semakin meningkat serta pengurangan pergantungan terhadap sumber asli. Penjanaan kuasa elektrik menggunakan sumber air juga turut berkurangan kerana kos pembangunan empangan yang tinggi. Hanya penjanaan kuasa elektrik dengan menggunakan arang batu dijangka meningkat dari 7.9 % pada tahun 2000 kepada 30.3 % pada tahun 2005. Peningkatan penggunaan arang batu ini turut melibatkan peningkatan sisa buangan selepas pembakaran arang batu.

Jadual 1.1 : Campuran bahan api dalam penjanaan elektrik 1995-2005 (%)

Tahun	Minyak	Arang Batu	Gas (%)	Hidro	Lain-lain	Jumlah (gigawattjam)
1995	11.0	9.7	67.8	11.3	0.2	41,813
2000	5.3	7.9	78.7	8.0	0.1	69,371
2005	3.0	30.3	61.0	5.4	0.3	102,340

Sumber: *Laporan Rancangan Malaysia Ke 8 (2000)*

Kepelbagaian sumber untuk menjanakan kuasa elektrik boleh dilihat dari usaha pihak Tenaga Nasional Berhad membina sebuah lagi janakuasa elektrik yang menggunakan arang batu sebagai bahan bakarnya di Lekir, Perak. Janakuasa yang dimajukan oleh TNB Janamanjung Sdn. Bhd. telah beroperasi sepenuhnya pada tahun 2003 dan menelan belanja sebanyak RM 7000 juta. Stesen janakuasa ini dibina di atas tanah tebus guna seluas 102 hektar, manakala 189 hektar lagi diperuntukkan untuk kolam takungan abu bahan api terhancur yang dijangka boleh menampung kapasiti bahan api terhancur untuk jangka masa 25 tahun (Utusan Malaysia, 1999). Berdasarkan maklumat di atas, penggunaan semula abu bahan api terhancur perlu dibuat untuk mengelak pencemaran alam sekitar. Penghasilan agregat ringan daripada abu bahan api terhancur adalah satu cara untuk meningkatkan penggunaan bahan sisa ini.

1.4 Penggunaan Abu Bahan Api Terhancur Dalam Penghasilan Agregat Ringan.

Abu bahan api terhancur (*pulverised fuel ash*) merupakan sisa daripada pembakaran arang batu dari loji janakuasa elektrik. Penggunaan abu bahan api terhancur secara komersial sebagai bahan tambah simen di dalam konkrit telah digunakan di kebanyakan negara seperti United Kingdom dan Amerika Syarikat. Namun penggunaannya masih kurang daripada 50% abu bahan api terhancur yang telah dihasilkan oleh setiap negara tersebut (Bijen, 1986).

Abu bahan api terhancur adalah bahan mentah yang paling sesuai untuk menghasilkan agregat ringan untuk kegunaan struktur berbanding dengan lempung tanah liat, batuan loh dan abu gunung berapi. Ini adalah kerana agregat yang dihasilkan menggunakan suhu persinteran yang tinggi sehingga melebihi 1100°C

yang akhirnya menghasilkan ikatan jejambat yang kuat di antara partikel abu bahan api terhancur (Satish & Leif, 2002). Ini menyebabkan agregat ringan tersebut mempunyai kekuatan yang lebih tinggi berbanding dengan agregat ringan daripada sumber bahan mentah yang lain seperti lempung tanah liat dan batu loh. Ciri-ciri bagi agregat ringan daripada abu bahan api terhancur adalah lebih ringan hasil dari struktur indung madu (*honeycomb structure*) yang terbentuk semasa proses pensinteran. Kandungan silika yang melebihi 60 % dalam abu bahan api terhancur merupakan faktor utama yang membantu menghasilkan agregat ringan yang kuat semasa ia lakur pada suhu pensinteran. Agregat ringan yang dihasilkan dengan menggunakan lempung tanah liat pula biasanya tidak melalui proses pensinteran. Proses pengerasannya hanya melalui proses pengeringan pada suhu di bawah 600°C (Owen & Newman, 2003).

Di negara maju seperti Amerika Syarikat, United Kingdom, Jepun dan Eropah, penghasilan agregat ringan dari abu bahan api terhancur mempunyai pasaran yang luas. Terdapat banyak loji penghasilan agregat ringan dibina berhampiran dengan loji janakuasa elektrik. Ini didorong oleh kesedaran negara-negara maju tentang pentingnya proses kitar semula untuk mengurangkan masalah pencemaran alam sekitar.

Abu bahan api terhancur merupakan bahan mentah yang paling sesuai digunakan untuk kajian ini berdasarkan kajian yang dijalankan oleh Satish & Lief (2002). Ini disokong oleh kajian Ramamurthy & Harikrishnan (2005) yang telah menggunakan agregat ringan dari abu bahan api terhancur dalam kajian kesan pengikat ke atas agregat ringan jenis ini. Abu bahan api terhancur juga telah terbukti membantu meningkatkan kekuatan mampatan konkrit berbanding dengan simen Portland biasa berdasarkan kajian yang dijalankan oleh Chindaprasirt *et al* (2005). Menurut kajian Vilches *et al* (2005), abu api terhancur mempunyai ciri-ciri penebat

kebakaran yang baik dan sesuai digunakan untuk industri pembinaan. Peningkatan jumlah abu bahan api terhancur hasil daripada pembakaran arang batu untuk sumber elektrik di Malaysia turut menjadi faktor penggunaan abu bahan api terhancur untuk penyelidikan ini. Ini seterusnya akan menyumbang kepada pengurangan pencemaran air dan udara dan memberi nilai tambah kepada sisa buangan industri.

Selain daripada abu bahan api terhancur, bahan-bahan lain seperti debu kuari, lempung tanah liat dan juga abu sekam padi digunakan untuk membantu menghasilkan agregat ringan dari abu bahan api terhancur yang sesuai digunakan dalam industri pembinaan. Debu kuari bertindak sebagai pengisi dan mengurangkan suhu pensinteran. Abu sekam padi digunakan untuk menghasilkan rongga hasil dari tindakbalas karbon pada suhu 700°C (Owen & Newman, 2003). Lempung tanah liat pula bertindak sebagai pengikat agregat anum semasa proses penyediaan agregat.

1.5 Skop Kajian

Skop kajian ini ialah untuk menghasilkan agregat ringan yang menepati Piawaian British BS 3797, Bahagian 2 (1990) spesifikasi agregat ringan untuk konkrit dan boleh digunakan untuk menghasilkan konkrit ringan kegunaan struktur daripada bahan tempatan seperti abu bahan api terhancur, debu kuari, tanah liat lempung dan abu sekam padi. Agregat ringan yang dihasilkan perlu mempunyai ketumpatan pukal kering kurang dari 1200 kg/m³ (Owen & Newman, 2003). Kekuatan mampatan konkrit agregat ringan yang dihasilkan menggunakan agregat ringan kajian perlu melebihi 25 N/mm² pada hari ke 28 usia konkrit.

1.6 Objektif Kajian

Secara ringkasnya, objektif kajian ini adalah seperti berikut:

- a) Mengkaji dan mengenal pasti bahan-bahan mentah tempatan yang boleh digunakan untuk menghasilkan agregat ringan.
- b) Mengenalpasti komposisi campuran bahan mentah dan teknik penghasilan agregat ringan.
- c) Mengkaji ciri-ciri agregat ringan yang dihasilkan dari segi fizikal, kimia dan mikrostruktur. Ini juga melibatkan perbandingan dengan piawaian-piawaian yang ada seperti piawaian British.

Kajian ini turut meliputi ujian awal agregat ringan yang telah dihasilkan dengan campuran konkrit. Ujian awal ini dibuat untuk menilai kesesuaian agregat ringan untuk kegunaan struktur dengan kajian tertumpu kepada kekuatan dan ketumpatan konkrit yang telah dihasilkan. Kajian mikrostruktur digunakan untuk membuktikan ikatan di antara agregat ringan yang dihasilkan dengan mortar simen di dalam konkrit. Ini seterusnya menyokong kesesuaiannya digunakan dalam penghasilan konkrit ringan untuk kegunaan struktur. Konkrit ringan yang dihasilkan dari agregat ringan ini adalah untuk tujuan struktur seperti asas bangunan, tiang, rasuk, cerucuk dan sebagainya.

Hasil keputusan dari kajian ini dijangkakan dapat memberikan maklumat lanjut untuk meramal dan mengawal penghasilan agregat ringan dengan menggunakan bahan tempatan untuk penghasilan konkrit ringan kegunaan struktur di Malaysia.

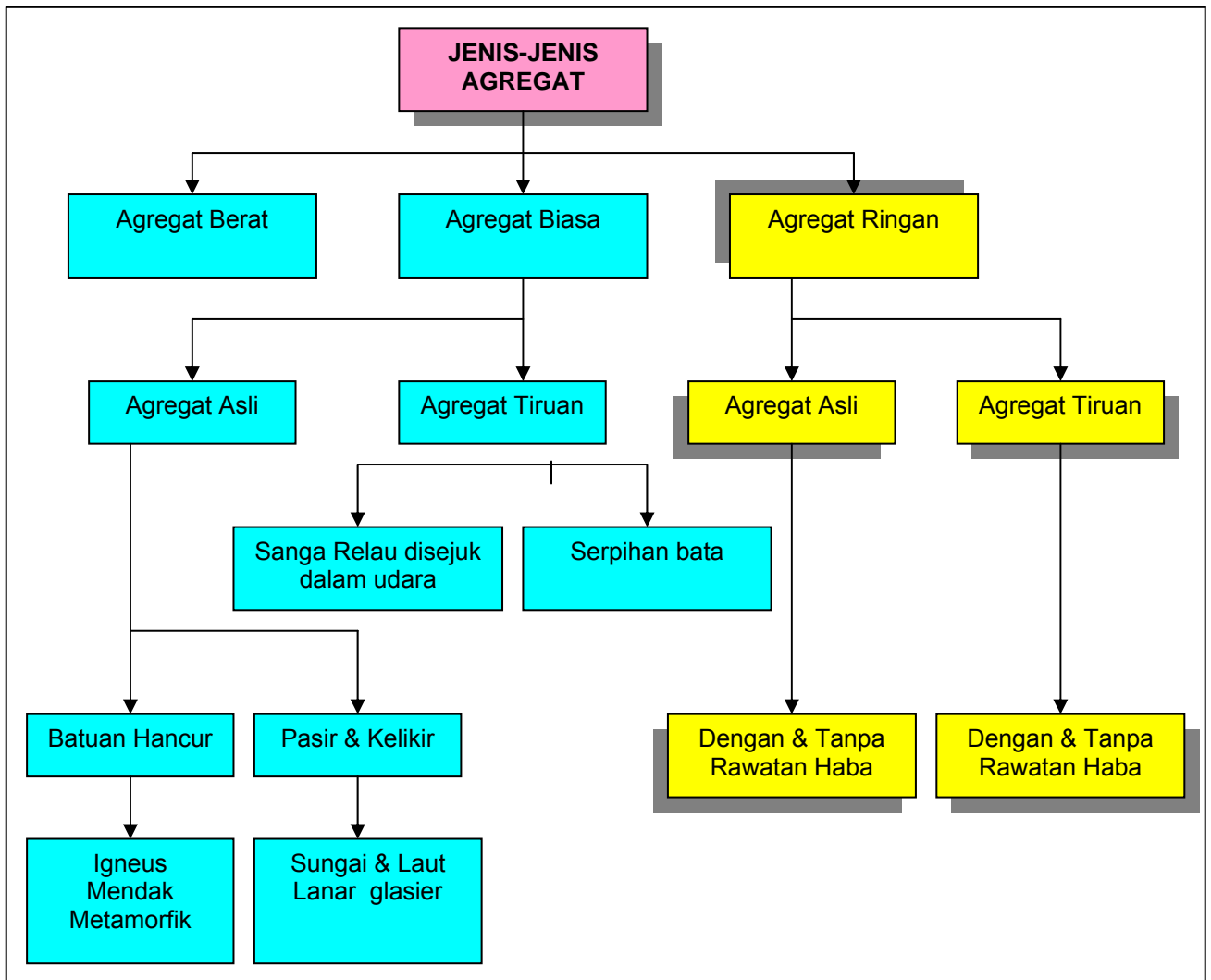
BAB 2 KAJIAN MAKLUMAT

2.1 Pengenalan

Sejarah penggunaan agregat ringan telah bermula pada zaman pra-roman lagi di mana penggunaan batuan porous hasil daripada letupan gunung berapi digunakan sebagai bahan binaan. Namun begitu, penggunaannya adalah terhad kerana bergantung kepada aktiviti gunung berapi. Pada awal abad ke 20, penyelidikan penghasilan agregat ringan daripada jermang relau bagas telah dimulakan di Eropah, di mana agregat ringan yang diproses mula digunakan secara komersial pada tahun 1935 (Owen, 1993). Ia dihasilkan daripada jermang relau bagas (*blastfurnace slag*) di United Kingdom. Ini telah mendorong kepada penghasilan Piawaian British BS 877 (1973) sebagai panduan kepada penggunaan agregat ringan. Piawaian British yang terkini yang membenarkan penggunaan agregat ringan di dalam konkrit adalah Piawaian British, BS 8110, Bahagian 1 (1997) konkrit kegunaan struktur. Terdapat satu bahagian di dalam piawaian ini yang memberi pertimbangan agar agregat ringan digunakan untuk menghasilkan konkrit ringan untuk kegunaan struktur.

2.2 Jenis-jenis Agregat Ringan.

Jenis-jenis agregat yang biasa digunakan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.1.



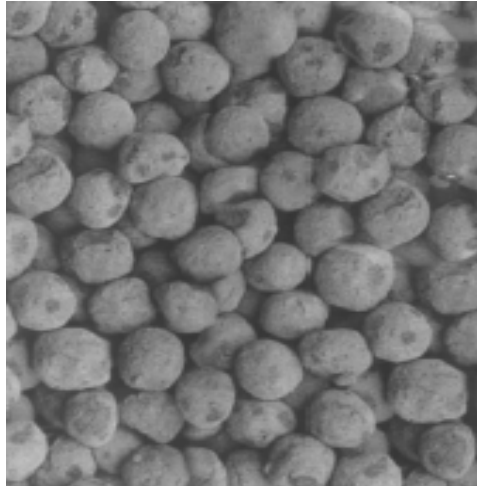
Rajah 2.1 : Jenis-Jenis Agregat (sumber : RILEM 1976)

Agregat ringan terhasil dalam dua bentuk samaada semula jadi atau pun dihasilkan oleh manusia menerusi proses tertentu. Sumber bahan mentah utama yang biasa digunakan untuk penghasilan agregat ringan adalah bahan volkanik dari sisa gunung berapi. Agregat ringan tiruan pula dihasilkan melalui proses rawatan haba dan tanpa rawatan haba (Satish & Leif, 2002). Agregat ringan tiruan boleh dihasil dari tiga kelas bahan mentah yang berikut :

- Sumber asli seperti tanah liat terkembang, tanah liat, syal, slat
- Produk industri seperti kaca dan polimer
- Sisa buangan industri seperti abu bahan api terhancur, sanga berbusa, sanga terkembang

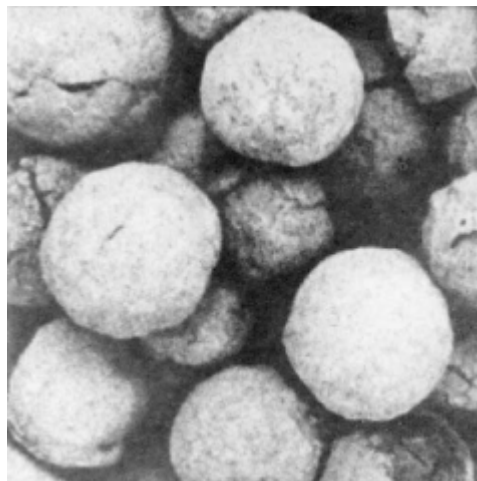
Jenama agregat ringan yang terkenal yang dihasilkan dengan menggunakan tanah liat terkembang adalah seperti Leca dan Liapor (FIP Manual, 1983). Stephen John Hynde dari Kansas, Missouri telah mengkomersialkan agregat ringan yang dihasilkan dari syal terkembang yang diberi nama "Haydite" pada tahun 1920 (Andrew & William, 1978). Pada tahun 1941 terdapat lapan loji pengeluar agregat ringan jenis Haydite di Amerika Syarikat dan Kanada dan ini terus meningkat kepada lima puluh lima loji pada tahun 1955 (Spitzner, 1995).

Penghasilan agregat ringan dari sisa buangan industri mula digunakan secara meluas pada tahun 1970 kerana ia boleh menghasilkan agregat ringan berkekuatan tinggi dan sesuai untuk kegunaan struktur (Wainwright & Boni, 1983). Lytag yang dihasilkan dari abu bahan api terhancur mampu mencapai kekuatan konkrit sehingga mencapai gred 60 pada umur 28 hari. Pada tahun 1994, terdapat beberapa loji pengeluar agregat ringan telah ditutup kerana faktor persekitaran dan juga politik. Contohnya jenama Leca yang diperbuat dari tanah liat terpaksa dihentikan pengeluarannya bagi melindungi industri tanah liat di Britain (Satish & Leif, 2002). Rajah 2.2 menunjukkan bentuk agregat ringan yang dihasilkan dari abu bahan api terhancur (Verma *et al*, 1998).



Rajah 2.2 : Agregat ringan dari abu bahan api terhancur (Verma *et al*,1998).

Russia telah menggunakan agregat ringan mulai tahun 1930 apabila Prof. Kostyrko memulakan penyelidikan mengenai agregat ringan. Jenama yang dikeluarkan adalah Keramsit yang dihasilkan dari tanah liat terkembang dan sehingga tahun 1980 terdapat 300 loji pengeluaran agregat ringan di Russia dengan kapasiti pengeluaran 30 juta m³ setahun (Spitzner, 1995). Rajah 2.3 menunjukkan agregat ringan yang dihasilkan dari tanah liat terkembang yang dihasilkan di Ukraine dengan menggunakan jenama Azerit (Pioro & Pioro, 2004).



Rajah 2.3 : Agregat ringan Azerit (Pioro, 2004)

Agregat ringan dikelaskan berdasarkan perbezaan dalam proses penghasilan agregat. Terdapat agregat daripada sumber geologi yang sama tetapi dikelaskan dalam bahagian berlainan kerana proses penghasilannya berbeza (Spratt, 1974). Berdasarkan pengelasan RILEM (1976) mengenai agregat ringan, terdapat 5 kelas agregat ringan. Secara ringkasnya ia dikelaskan seperti Jadual 2.1.

Jadual 2.1 : Pengelasan agregat ringan (RILEM, 1976)

Proses	Jenis
Bahan semulajadi	'Pumice' 'Diatomite'
Bahan semulajadi diproses	Tanah liat terkembang (<i>expanded clay</i>) Perlit terkembang (<i>expanded perlite</i>) Syal terkembang (<i>expanded shale</i>) Batuan loh terkembang (<i>expanded slate</i>) 'Exfoliated vermiculite'
Sisa buangan tidak diproses	Klinker relau (<i>furnace clinker</i>) Abu dasar relau (<i>furnace bottom ash</i>)
Sisa buangan diproses	Sanga relau bagas berbusa (<i>foamed blastfurnace slag</i>) Abu bahan api terhancur tersinter (<i>sintered pulverized fuel ash</i>)
Bahan organik	Partikel kayu (<i>wood particles</i>) Partikel plastik (<i>plastic particles</i>)

Pada tahun 1941, Syarikat "Tunnel Portland Cement" telah mengkaji penggunaan lempung tanah liat untuk penghasilan agregat ringan di London. Walau bagaimanapun, ia hanya dikeluarkan secara komersial pada tahun 1959 dengan nama Leca (*Lightweight Expanded Clay Aggregate*) (Spratt 1974).

Di Amerika Syarikat, kajian mengenai agregat ringan telah bermula pada tahun 1913 selepas penemuan lempung tanah liat yang mengembang selepas dipanaskan. Penemuan ini telah mendorong kepada penghasilan agregat jenis 'Hydate' pada 1917 di Kansas City, Missouri. Agregat jenis ini telah digunakan untuk pembinaan kapal tentera laut USS Selma pada tahun 1919 (Owen, 1993).

Peningkatan penggunaan arang batu untuk penjanaan elektrik telah mendorong kepada penyelidikan dijalankan ke atas abu bahan api terhancur sebagai agregat ringan yang diproses. Kajian telah mula dijalankan pada tahun 1955 di loji janakuasa Battersea, England tetapi proses tersebut tidak berjaya. Kajian lanjut telah dijalankan oleh Pusat Penyelidikan Bangunan (*Building Research Station*) dan "*John Laing Construction Ltd*" di loji Janakuasa Northfleet pada tahun 1961. Kajian ini telah berjaya menghasilkan agregat ringan dari abu bahan api terhancur secara pensinteran dan ia telah dihasilkan secara komersial dengan nama Lytag. Agregat ringan dari abu bahan api terhancur mula diklasifikasikan sebagai agregat ringan dalam Piawaian British pada tahun 1963 dan 1964 di bawah BS 3681 dan BS 3797 (Spratt 1974). Terdapat beberapa negara di dunia yang menggunakan abu bahan api terhancur untuk menghasilkan agregat ringan iaitu, Bulgaria, China, Colombia, German, Italy, Japan, Holland, United Kingdom, Amerika Syarikat dan Russia. Agregat-agregat ini digunakan untuk tujuan pembinaan dan penghasilan konkrit ringan untuk konkrit pra tegasan (Gokhan & Ata, 2000).

Kod Amalan CP 114 (kegunaan konkrit tetulang struktur dalam bangunan) yang dikeluarkan pada 1957 tidak mengklasifikasikan dengan jelas tentang penggunaan agregat ringan untuk penghasilan konkrit kegunaan struktur. Kod Amalan 116 (kegunaan konkrit struktur pratuang) yang dikeluarkan pada tahun 1965 mula

menerangkan dengan lebih spesifik agregat-agregat ringan yang boleh digunakan untuk struktur konkrit. Hanya pada tahun 1972, Kod Amalan CP 110 (kegunaan konkrit struktur) telah dikeluarkan dan menjelaskan dengan lebih terperinci tentang penggunaan agregat ringan. Kod ini telah membenarkan penggunaan agregat ringan yang menepati Piawaian British BS 3797, (1990), spesifikasi agregat ringan untuk konkrit untuk penghasilan struktur konkrit.

Menurut Spratt (1974), penggunaan agregat ringan untuk kerja-kerja konkrit di United Kingdom pada tahun 1974 adalah sebanyak 4 juta meter padu (m^3). Manakala penggunaan agregat konvensional pada tahun yang sama untuk tujuan konkrit adalah sebanyak 67 juta meter padu (m^3). Penggunaan agregat ringan pada ketika itu hanya 6% dari agregat biasa dan penggunaan agregat ringan dalam industri pembinaan dijangka akan terus meningkat. Rajah 2.4 menunjukkan bangunan komersial BMW yang telah menggunakan agregat ringan dalam pembinaannya milik syarikat pengeluar kenderaan BMW yang di bina di Jerman.



Rajah 2.4 : Bangunan BMW di Jerman dibina dengan menggunakan agregat ringan pada bahagian strukturnya.

2.3 Faktor Yang Mempengaruhi Penghasilan Agregat Ringan

Terdapat beberapa faktor utama yang perlu diberi perhatian dalam proses penghasilan agregat ringan. Antara faktor-faktor yang mempengaruhi penghasilan agregat ringan adalah seperti berikut :

- 1) Faktor yang paling utama adalah ketumpatan pukal agregat ringan yang dihasilkan. Untuk menghasilkan agregat yang ringan, rongga-rongga perlu dihasilkan pada struktur dalamnya. Pada asasnya, struktur yang berongga adalah lebih ringan dari struktur yang padat. Berdasarkan manual FIP (1983), agregat ringan yang dihasilkan dari abu bahan api terhancur boleh mencapai ketumpatan pukal sehingga 770 kg/m^3 . Kajian ini perlu memastikan agregat ringan yang dihasilkan bukan sahaja mempunyai rongga malahan mempunyai kekuatan yang setanding dengan agregat biasa. Selain dari itu, sifat-sifat lain seperti kadar penyerapan air oleh agregat adalah penting kerana penghasilan konkrit memerlukan air dalam proses penghasilannya. Sekiranya kadar penyerapan air oleh agregat ringan adalah tinggi, ia akan mempengaruhi tindakbalas kimia air dan simen semasa penghasilan konkrit.
- 2) Faktor kedua adalah komposisi bahan mentah yang sesuai. Setiap bahan mentah yang digunakan mempunyai ciri-ciri yang tersendiri yang menyumbang kepada penghasilan agregat yang baik. Komposisi kimia bahan mentah yang digunakan perlu diketahui untuk memastikan tidak berlaku tindakbalas yang tidak diperlukan semasa proses pensinteran. Bahan mentah yang mempunyai kandungan silika (SiO_2) yang tinggi dipilih kerana silika mempunyai suhu lebur yang tinggi iaitu $1710 \text{ }^\circ\text{C}$ (Worrall, 1975). Silika mempunyai kekuatan yang tinggi di mana ujian kekerasan pada skala MOR untuk silika biasanya mencapai 50 MPa dan kekuatan mampatan sekitar 1.1 GPa (Callister, 2003). Ciri-ciri

kekuatan yang terdapat pada silika akan membantu menghasilkan agregat yang kuat. Selain dari itu, fasa kuartza dalam silika mempunyai ketumpatan sebanyak 2.65 g/cm^3 pada suhu bilik. Apabila suhu yang tinggi dikenakan, fasa ini akan berubah kepada fasa kristobelit pada suhu $1470 \text{ }^\circ\text{C}$. Ketumpatan silika pada fasa kristobelit berkurang kepada 2.30 g/cm^3 (Worrall, 1975). Oleh demikian, kemungkinan menghasilkan agregat yang ringan boleh diperolehi dengan bahan mentah yang mempunyai komposisi silika yang tinggi. Berdasarkan beberapa kajian, abu bahan api terhancur mempunyai pelbagai ciri yang sesuai digunakan dalam industri pembinaan seperti bata penebat kebakaran (Viches *et al*, 2005), bahan gentian simen (Chindaprasirt *et al*, 2005) dan penghasilan agregat ringan (Satish & Lief, 2002).

- 3) Agen yang membantu pembentukan liang-liang poros di dalam agregat. Secara asasnya, untuk menjadikan sesuatu bahan itu ringan, pembentukan liang-liang di dalamnya adalah penting. Terdapat beberapa faktor yang perlu diberi perhatian dalam penggunaan abu bahan api terhancur untuk penghasilan agregat ringan. Berdasar kajian Verma *et al* (1998), kandungan karbon yang rendah dalam abu bahan api terhancur akan menjejaskan penghasilan agregat ringan yang baik. Ini adalah kerana kandungan karbon akan terurai balas pada suhu $600 \text{ }^\circ\text{C}$ dan membebaskan gas karbon dioksida yang memangkin kepada pembentukan liang-liang (FIP Manual, 1983). Perkara ini perlu diberi perhatian kerana abu bahan api terhancur merupakan hasil daripada pembakaran arang batu dan pada kebiasaanya pembakaran yang sempurna akan menghasilkan abu bahan api terhancur yang mempunyai kandungan karbon yang rendah. Karbon boleh ditambah atau digantikan dengan bahan mentah lain yang boleh memangkin

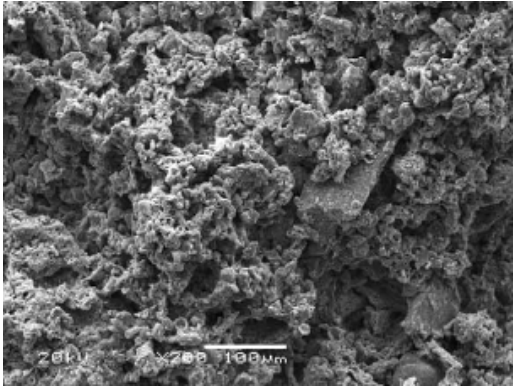
keliangan seperti abu sekam padi. Kadar keliangan yang besar dan terlalu banyak dalam agregat ringan pula akan menjejaskan kekuatan agregat.

- 4) Proses pensinteran adalah faktor penting dalam menghasilkan agregat ringan berkekuatan tinggi. Proses pensinteran membawa maksud gabungan ikatan partikel pada suhu yang tinggi pada tahap di bawah suhu lebur. Hasil dari proses pensinteran akan meningkatkan kekuatan, ketumpatan dan keseragaman bahan yang disinter (Randall, 1997). Proses penghasilan agregat ringan untuk kegunaan struktur seperti jenama Lytag biasanya menggunakan proses pensinteran dalam penghasilannya (Owen & Newman, 2003). Jadual 2.2 menunjukkan kesan umum yang berlaku apabila proses pensinteran dilakukan.

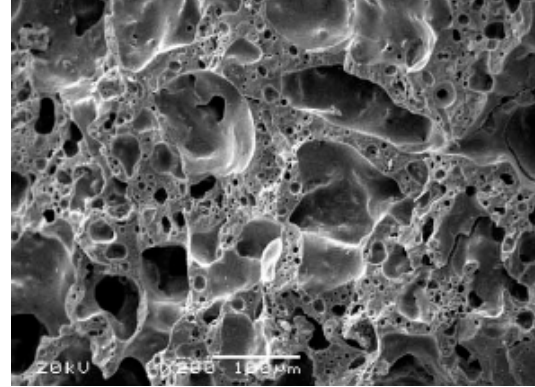
Jadual 2.2 : Kesan proses pensinteran (Worall, 1975).

Parameter proses pensinteran	Perubahan
Peningkatan masa pensinteran.	Tumbuhbesaran ira, kurang produktiviti, kos meningkat.
Peningkatan suhu pensinteran.	Ketumpatan tinggi, keliangan membesar, kos tinggi, tumbuhbesaran ira, meningkatkan kekuatan.

Kesan proses pensinteran ke atas agregat ringan boleh dilihat daripada analisa mikrostruktur agregat ringan. Kajian Cheeseman & Viridi (2005) sebagaimana dalam Rajah 2.5 menunjukkan peningkatan suhu pensinteran mempengaruhi saiz dan bilangan liang yang dihasilkan dalam agregat ringan.



Suhu pensinteran 1020 °C



Suhu pensinteran 1070 °C

Rajah 2.5 : Mikrostruktur agregat ringan pada suhu pensinteran yang berbeza (Cheeseman & Virdi, 2005)

Oleh itu, dalam usaha untuk menghasilkan agregat yang ringan, kuat dan boleh digunakan untuk tujuan struktur, adalah penting untuk mendapatkan ketumpatan pukal agregat yang sesuai dengan mengawal pembentukan liang-liang poros dalam agregat. Ini boleh dihasilkan melalui pemilihan komposisi campuran bahan mentah dan suhu pensinteran yang sesuai.

2.4 Ciri-Ciri Agregat Ringan.

Secara amnya agregat ringan mempunyai beberapa ciri yang berbeza dengan agregat biasa. Ciri-ciri agregat ringan ini penting dalam rekabentuk struktur sesebuah binaan kerana setiap ciri ini memberi kesan ke atas sifat struktur serta kekuatan struktur. Misalnya, ketumpatan pukal yang rendah akan memberi kesan positif di dalam mengurangkan beban mati ke atas struktur, sekaligus dapat dilakukan satu rekabentuk struktur yang ekonomi dari segi saiz dan bahan yang perlu digunakan (Zhang & Gjorv, 1990).

2.4.1 Bentuk, Saiz dan Permukaan Agregat Ringan.

Saiz, bentuk dan keadaan permukaan agregat mempengaruhi ciri konkrit basah. Apabila menggunakan agregat berbentuk bulat serta mempunyai permukaan yang licin, kandungan mortar yang diperlukan adalah rendah berbanding dengan agregat yang bersudut . Penggunaan agregat bersudut ataupun agregat yang dihancurkan akan menyebabkan terdapat lompong atau lubang terbuka yang terlindung semasa konkrit dimampatkan (Dhir *et al*, 1984). Oleh yang demikian, kandungan mortar yang tinggi diperlukan kerana mortar tersebut akan memenuhi lompong-lompong terbuka pada agregat tersebut (Harikrishnan & Ramamurthy, 2005). Penggunaan mortar yang banyak akan meningkatkan ketumpatan konkrit kerana ketumpatan mortar yang mengandungi simen, pasir dan air adalah lebih tinggi berbanding dengan agregat ringan. Oleh yang demikian bentuk yang bulat adalah lebih baik dari bentuk bersudut. Walaubagaimana pun dari segi kekuatan mampatan, agregat yang bersudut mempunyai kekuatan mampatan lebih tinggi berbanding daripada bentuk bulat (FIP Manual, 1983).

Selain daripada itu, penggunaan agregat terhancur akan memerlukan kandungan air yang lebih tinggi untuk campuran konkrit. Maka ini memerlukan kandungan simen yang lebih tinggi untuk menghasilkan kekuatan mortar yang sama jika dibandingkan dengan penggunaan agregat yang mempunyai liang yang tertutup (Ramamurthy & Harikrishnan, 2006). Struktur liang dan saiz agregat mempunyai pengaruh kepada kekuatan agregat dan juga konkrit agregat ringan. Struktur liang juga mempengaruhi kadar serapan air (Blanco *et al*, 2000).

2.4.2 Ketumpatan Partikel Agregat.

Ketumpatan agregat adalah nisbah di antara berat suatu kuantiti agregat dengan isipadu kuantiti agregat tersebut. Isipadu agregat ini termasuk liang-liang di dalam agregat tetapi tidak termasuk ruang di antara agregat (BS 812 Bahagian 2, 1995). Ketumpatan agregat pada amnya bergantung kepada kandungan liang-liang di dalam agregat. Kandungan liang-liang dalam agregat ringan boleh ditentukan melalui Persamaan 2.1:

$$V_c = \frac{\rho_{\text{spec}} - \rho_{\text{part}}}{\rho_{\text{spec}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.1}$$

di mana :

V_c adalah keliangan sebenar

ρ_{spec} adalah ketumpatan serbuk (SG)

ρ_{part} adalah ketumpatan agregat.

Keliangan atau keporosan yang terdapat dalam bahan pepejal mempunyai kesan yang besar ke atas sifat-sifat bahan tersebut. Ia mempunyai kesan ke atas sifat-sifat mekanik kelakuan bahan seperti kekuatan, sifat terma dan juga sifat kimia. Kaedah yang digunakan untuk menentukan ketumpatan dan keliangan ini adalah berdasarkan prinsip Archimedes dan ia boleh diaplikasikan kepada semua jenis pepejal.

Keliangan boleh dikelaskan kepada dua jenis iaitu keliangan terbuka (ketara) dan keliangan tertutup. Liang yang terbuka adalah liang yang terdapat pada permukaan pepejal dan mempengaruhi ketelapan. Liang yang tertutup pula adalah liang yang terdapat di bahagian dalam sampel dan tidak sampai ke permukaan sampel.

2.4.3 Ketumpatan Pukal (*bulk density*)

Ketumpatan agregat ringan lebih rendah berbanding ketumpatan agregat biasa iaitu kurang daripada 1600 kg/m^3 (Andrew & William, 1978), berdasarkan struktur agregat yang berpetak-petak serta berongga. Terdapat beberapa perkara yang turut mempengaruhi ketumpatan pukal agregat ringan iaitu kandungan air, kaedah pemadatan agregat dan saiz agregat.

Ketumpatan pukal agregat adalah nisbah di antara berat suatu kuantiti agregat berbanding jumlah isipadu yang dipenuhi oleh kuantiti tersebut. Isipadu ini merangkumi ruang-ruang di antara agregat termasuk liang di dalam agregat itu tersendiri. Ruang-ruang ini bergantung kepada saiz, bentuk agregat dan cara pembungkusan agregat sama ada simpanan pukal atau tidak dipadatkan. Ia juga bergantung kepada kandungan kelembapan agregat kerana berat agregat yang basah semestinya lebih tinggi daripada agregat yang kering. Secara amnya dengan agregat kering, ketumpatan pukal adalah separuh daripada ketumpatan partikel agregat (BS EN 1097, Bahagian 5, 1999).

Cara penentuan ketumpatan pukal agregat kering atau basah adalah dengan menuangkan agregat ke dalam satu bekas yang diketahui isipadunya secara graviti. Berat agregat yang memenuhi bekas tersebut akan ditimbang dan dibahagikan dengan isipadu bekas yang telah diketahui. Prosedur penentuan ketumpatan pukal ini adalah berdasarkan Piawaian British, BS 3681 Bahagian 2. Oleh kerana ketumpatan pukal adalah pencirian sifat yang paling mudah dikenal pasti, maka ia sering digunakan untuk mengawal keseragaman pengeluaran agregat. Jadual 2.3 menunjukkan ketumpatan pukal agregat ringan yang berlainan jenis.

Jadual 2.3: Jadual ketumpatan pukal agregat ringan (FIP Manual, 1983).

Agregat	Pengkelasan	Ketumpatan Pukal (kg/m ³)
Tanah liat terkembang (Aglite)	Halus	960
	Sederhana	700
	Kasar	590
Tanah liat terkembang (Leca)	Halus	640
	Sederhana	370
	Kasar	320
Abu bahan api terhancur tersinter (Lytag)	Halus	960
	Sederhana	830
	Kasar	770
Sanga berbusa	Halus	920
	Kasar	666

Secara keseluruhannya, agregat halus mempunyai nilai ketumpatan pukal yang lebih tinggi berbanding dengan agregat bersaiz sederhana dan kasar. Ini menunjukkan bahawa agregat ringan mempunyai kandungan udara yang telah diperangkap di dalamnya. Saiz agregat yang besar mempunyai kandungan udara yang lebih banyak di dalam agregat tersebut berbanding dengan agregat bersaiz kecil. Oleh itu nilai ketumpatan bagi agregat ringan bersaiz kasar lebih kecil berbanding dengan agregat bersaiz halus (BS 3681, Bahagian 2). Agregat Leca, mempunyai ketumpatan pukal lebih rendah berbanding dengan agregat Aglite. Ini kerana sifat dalaman Leca yang mempunyai indung madu atau ruang poros yang lebih tinggi berbanding dengan agregat Aglite (Satish & Leif, 2002).

2.4.4 Penyerapan Air.

Biasanya kadar serapan air ditunjukkan sebagai peratus daripada isipadu atau berat agregat. Tatacara untuk menentukan penyerapan air adalah dengan memasukkan