

PENYEDIAAN DAN PENCIRIAN KARBON DIAKTIFKAN
DARIPADA HABUK GERGAJI KAYU CHENGAL,
TUALANG DAN MERANTI MERAH CERAH

oleh

TAN TEONG JIN

Tesis yang diserahkan untuk memenuhi
keperluan bagi Ijazah Doktor Falsafah

Julai 2005

Dekan
Institut Pengajian Siswazah
Universiti Sains Malaysia
11800 USM, Pulau Pinang

...IPS-19(a)

Pengisytiharan Calon/Declaration

Saya isytiharkan bahawa kandungan yang dibentangkan di dalam tesis ini adalah hasil kerja saya sendiri dan telah dijalankan di Universiti Sains Malaysia kecuali dimaklumkan sebaliknya.

I declare that the contents presented in this thesis are my own work which was done at Universiti Sains Malaysia unless stated otherwise. The thesis has not been previously submitted for any other degree.

Tandatangan Calon (*Signature of Candidate*)

Nama Calon (Name of Candidate)

.....

.....

No. Kad Pengenalan / No. Passport :
IC. No. / Passport No. :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tarikh (Date) :

Disaksikan oleh (*Witnessed by*) :

Tandatangan Saksi (*Signature of Witness*)

Nama Saksi (*Name of Witness*)

.....

.....

No. Kad Pengenalan / No. Passport :
IC. No. / Passport No. :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tarikh (Date) :

Untuk Kegunaan Institut Pengajian Siswazah

Pengesahan Penerimaan oleh IPS :	Nama Staf :	Tarikh :
---	--------------------	-----------------

DEDIKASI

Khasnya ditujukan kepada isteri dan keluarga saya yang tercinta yang sentiasa memberi sokongan serta dorongan yang merupakan sumber inspirasi dan semangat bagi saya untuk menjayakan tugas yang berat ini. Sememangnya, pengorbanan, sokongan serta dorongan mereka yang tidak ternilai itu merupakan suatu daya penggerak yang terpenting bagi saya untuk terus maju ke hadapan. Semoga mereka sentiasa diberkati oleh Tuhan dalam kehidupan seharian mereka dan semoga mereka sentiasa dalam keadaan yang sihat dan gembira.

Terima Kasih.

PENGHARGAAN

Terlebih dahulu saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan serta ribuan terima kasih kepada penyelia saya Professor Dr. Zakaria Mohd. Amin serta penyelia bersama saya Professor Madya Dr. Ahmad bin Md. Noor atas nasihat, panduan, dorongan serta tunjuk ajar yang diberikan kepada saya di sepanjang waktu saya menjalani penyelidikan ini. Ilmu pengetahuan serta pengalaman yang diperolehi daripada mereka merupakan sesuatu yang tidak ternilai dan amat berguna untuk kejayaan saya di masa hadapan. Di samping itu, kepimpinan serta kebijaksanaan mereka juga sentiasa menjadi teladan kepada saya.

Saya juga ingin mengambil kesempatan ini untuk mengucapkan ribuan terima kasih kepada pihak pengurusan dan semua kakitangan makmal di Pusat Pengajian Sains Kimia dan Pusat Pengajian Sains Kajihayat atas kerjasama dan bantuan mereka yang diberikan kepada saya.

Ucapan penghargaan juga ditujukan kepada majikan saya Century Chemical Works Sendirian Berhad kerana sudi membenarkan saya untuk mengguna kemudahan-kemudahan serta peralatan-peralatan di makmal syarikat dan juga kepada Mr. Tan See Thye, ketua pengarah Syarikat Hong Lim Timber Industries (Pg) Sdn. Bhd. kerana sudi membekalkan sampel-sampel habuk kayu untuk penyelidikan saya.

Semoga anda sekalian sentiasa diberkati oleh Tuhan. Sekian. Terima Kasih.

KANDUNGAN

	Halaman
DEDIKASI	ii
PENGHARGAAN	iii
SENARAI JADUAL	x
SENARAI RAJAH	xvi
SENARAI GAMBAR FOTO	xxi
SENARAI LAMPIRAN	xxii
ABSTRAK	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1 PENGENALAN	1
1.1 Sejarah perkembangan karbon diaktifkan	1
1.2 Zat penjerap - kayu	4
1.2.1 Abu	9
1.2.2 Ketumpatan kayu	10
1.2.3 Struktur kayu keras	10
1.2.4 Kayu Chengal (<i>Balanocarpus heimii</i>)	11
1.2.5 Kayu Tualang (<i>Koompassia excelsa</i>)	12
1.2.6 Kayu Meranti Merah Cerah (<i>Shorea spp.</i>)	14
1.2.7 Ketumpatan kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah	15

	Halaman
1.3 Penghasilan karbon diaktifkan	16
1.3.1 Proses pengkarbonan	16
1.3.2 Proses pengaktifan	18
1.3.2.1 Proses pengaktifan dengan karbon dioksida	21
1.3.2.2 Proses pengaktifan dengan stim	23
1.3.2.3 Proses pengaktifan dengan oksigen	25
1.3.2.4 Keseimbangan tenaga proses pengaktifan	26
1.4 Permukaan luar dan permukaan dalam	27
1.5 Pengkelasan jenis liang	27
1.6 Takrifan penjerapan	28
1.7 Penjerapan spesifik dan tak spesifik	28
1.8 Isoterma penjerapan	29
1.8.1 Konsep dan sejarah isoterma piawai	30
1.8.2 Nitrogen sebagai zat terjerap piawai	34
1.8.3 Pengkelasan jenis isoterma BET	34
1.8.3.1 Isoterma jenis I	35
1.8.3.2 Isoterma jenis II	36
1.8.3.3 Isoterma jenis III	36
1.8.3.4 Isoterma jenis IV	37
1.8.3.5 Isoterma jenis V	38
1.8.3.6 Isoterma jenis VI	39
1.8.4 Persamaan BET	39

	Halaman
1.8.4.1 Pemalar C bagi persamaan BET	41
1.8.5 Plot- t	42
1.8.6 Persamaan α_s	46
1.8.7 Persamaan Dubinin-Radushkevish (DR)	49
1.8.8 Plot Langmuir	52
1.9 Gelung Histeresis	53
1.9.1 Jenis-jenis histeresis	53
1.9.2 Kondensasi rerambut	55
1.10 Penjerapan dari larutan	57
1.11 Mikroskopi elektron pemancaran (TEM)	61
1.12 Masalah-masalah pengeluaran karbon diaktifkan	62
1.13 Objektif	63
2 BAHAN DAN METODOLOGI	64
2.1 Bahan	64
2.1.1 Bahan kimia	64
2.1.2 Alat-radas dan mesin	64
2.1.3 Sampel blok kayu dan habuk gergaji kayu	65
2.2 Penyediaan sampel	65
2.2.1 Sistem penamaan sampel	65
2.2.1.1 Sistem penamaan sampel mentah	66
2.2.1.2 Sistem penamaan sampel arang	66

	Halaman
2.2.1.3 Sistem penamaan sampel karbon diaktifkan	66
2.2.2 Pengayakan dan taburan saiz zarah	68
2.2.3 Pembahagian dan pengeringan sampel	68
2.2.3.1 Habuk gergaji kayu mentah tanpa rawatan kimia	68
2.2.3.2 Habuk gergaji kayu kering tanpa rawatan kimia	69
2.2.3.3 Habuk gergaji kayu kering dengan rawatan kimia	70
2.2.4 Rawatan kimia	71
2.2.4.1 Rawatan dengan larutan asid hidroklorik 10 M	71
2.2.4.2 Rawatan dengan larutan asid sulfurik 12 M	71
2.2.4.3 Rawatan dengan larutan natrium hidroksida 8 M	72
2.2.4.4 Rawatan dengan larutan asid hidrofluorik 11 M	72
2.2.4.5 Rawatan dengan larutan asid hidrofluorik 11 M dan larutan asid sulfurik 12 M	73
2.2.4.6 Rawatan dengan larutan natrium klorida 0.5 M	73
2.2.5 Proses pengkarbonan	73
2.2.6 Proses pengaktifan	75
2.3 Analisis sampel	76
2.3.1 Penentuan ketumpatan sampel kayu	76
2.3.2 Kandungan lembapan	77
2.3.3 Keterlarutan alkohol-benzena	77
2.3.4 Holoselulosa	78
2.3.5 α -selulosa	79
2.3.6 Penentuan kandungan lignin kayu	80

	Halaman	
2.3.7	Penentuan haba pembakaran dengan kalorimeter	81
2.3.8	Penentuan kandungan bahan mudah meruap	82
2.3.9	Penentuan kandungan abu	82
2.3.10	Penentuan kandungan karbon tetap	83
2.3.11	Nilai penjerapan iodin	83
2.3.12	Penyahwarna karamel	86
2.3.13	Penyediaan sampel untuk ujikaji FT-IR	88
2.3.14	Isoterma penjerapan nitrogen	88
2.3.15	Ujikaji mikroskopi elektron pemancaran (TEM)	89
2.3.16	Kromatografi gas-spektrometer jisim (GC/MS)	90
2.3.17	Analisis Thermogravimetri (TGA)	91
3	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	92
3.1	Analisis sampel	92
3.1.1	Ketumpatan blok kayu	92
3.1.2	Kandungan kimia sampel kayu	93
3.1.3	Kromatografi Gas-Spektrometer Jisim (GC/MS)	97
3.1.4	Analisis Thermogravimetri (TGA)	99
3.1.5	Haba pembakaran	104
3.1.6	Kandungan bahan mudah meruap, abu dan karbon tetap	106
3.1.7	Nilai penjerapan iodin dan penyahwarna karamel	110
3.1.8	Analisis spektrum FT-IR	113

	Halaman
3.2 Analisis sampel karbon diaktifkan tanpa rawatan kimia	117
3.2.1 Kesan peratus pembakaran ke atas nilai penjerapan iodin dan penyahwarnaan karamel	117
3.2.2 Kesan peratus pembakaran ke atas pembentukan liang	120
3.2.3 Kesan bahan mudah meruap ke atas nilai penjerapan iodin dan penyahwarnaan karamel	120
3.2.4 Isoterma penjerapan karbon diaktifkan tanpa rawatan kimia	123
3.2.5 Penentuan luas permukaan BET	129
3.2.6 Taburan liang serta kesan peratus pembakaran ke atas proses pembentukan liang	135
3.2.7 Ujikaji Mikroskopi Elektron Pemancaran (TEM)	147
3.2.8 Plot- t	150
3.2.9 Plot- α_s	157
3.2.10 Plot-DR	165
3.2.11 Plot-Langmuir	170
3.2.12 Plot-Hukum Gas	175
3.2.13 Penentuan isipadu mikroliang secara kaedah Kadar Penjerapan	198
4 KESIMPULAN	213
Cadangan untuk kajian lanjutan	219
Rujukan	221
Lampiran	234

SENARAI JADUAL

		Halaman
Jadual 1.1	Pengkelasan beberapa spesies kayu Malaysia	11
Jadual 1.2	Purata ketumpatan kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah	15
Jadual 2.1	Nama sampel arang tanpa rawatan kimia	66
Jadual 2.2	Nama sampel karbon diaktifkan tanpa rawatan kimia	67
Jadual 2.3	Nama sampel arang dan karbon diaktifkan dengan rawatan kimia	67
Jadual 3.1	Ketumpatan kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah	92
Jadual 3.2	Kandungan kimia bahan mudah meruap terlarutkan heksana	97
Jadual 3.3	Hasil keputusan analisis thermogravimetri	104
Jadual 3.4	Kandungan bahan mudah meruap, karbon tetap dan abu bagi arang dengan rawatan kimia serta arang kawalan tanpa rawatan	109
Jadual 3.5	Puncak penyerapan relatif kayu dan arang	115
Jadual 3.6	Luas permukaan spesifik BET dan isipadu mikroliang karbon diaktifkan Chengal	130
Jadual 3.7	Luas permukaan spesifik BET dan isipadu mikroliang karbon diaktifkan Tualang	131
Jadual 3.8	Luas permukaan spesifik BET dan isipadu mikroliang karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah	132
Jadual 3.9	Luas permukaan spesifik BET dan isipadu mikroliang karbon diaktifkan rawatan kimia	133
Jadual 3.10	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang, mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan Chengal dengan kaedah Plot- <i>t</i>	152
Jadual 3.11	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang, mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan Tualang dengan kaedah Plot- <i>t</i>	153

	Halaman	
Jadual 3.12	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang, mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah dengan kaedah Plot- t	153
Jadual 3.13	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang, mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan rawatan kimia dengan kaedah Plot- t	153
Jadual 3.14	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang dan mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan Chengal dengan kaedah Plot- α_s	161
Jadual 3.15	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang dan mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan Tualang dengan kaedah Plot- α_s	161
Jadual 3.16	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang dan mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah dengan kaedah Plot- α_s	162
Jadual 3.17	Luas permukaan luar, isipadu mikroliang dan mesoliang serta jumlah isipadu liang bagi karbon diaktifkan rawatan kimia dengan kaedah Plot- α_s	162
Jadual 3.18	Isipadu mikroliang Plot-DR bagi karbon diaktifkan siri Chengal	165
Jadual 3.19	Isipadu mikroliang Plot-DR bagi karbon diaktifkan siri Tualang	166
Jadual 3.20	Isipadu mikroliang Plot-DR bagi karbon diaktifkan siri Meranti Merah Cerah	166
Jadual 3.21	Isipadu mikroliang Plot-DR bagi karbon diaktifkan rawatan kimia	166
Jadual 3.22	Hasil keputusan Plot-Langmuir dan luas permukaan spesifik BET bagi karbon diaktifkan siri Chengal	171
Jadual 3.23	Hasil keputusan Plot-Langmuir dan luas permukaan spesifik BET bagi karbon diaktifkan siri Tualang	171
Jadual 3.24	Hasil keputusan Plot-Langmuir dan luas permukaan spesifik BET bagi karbon diaktifkan siri Meranti Merah Cerah	171
Jadual 3.25	Kecerunan Plot-Hukum Gas dan luas permukaan spesifik BET karbon diaktifkan Chengal	183
Jadual 3.26	Kecerunan Plot-Hukum Gas dan luas permukaan spesifik BET karbon diaktifkan Tualang	183

	Halaman	
Jadual 3.27	Kecerunan Plot-Hukum Gas dan luas permukaan spesifik BET karbon diaktifkan Meranti Merah CeraH	184
Jadual 3.28	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan Chengal	185
Jadual 3.29	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan Tualang	185
Jadual 3.30	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan Meranti Merah CeraH	186
Jadual 3.31	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan rawatan kimia	186
Jadual 3.32	Analisis varian bagi Plot- t	188
Jadual 3.33	Analisis varian bagi Plot- α_s	188
Jadual 3.34	Analisis varian bagi Plot-Hukum Gas	188
Jadual 3.35	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi Carbon AX21, Carbon M158H dan Carbon CECA CXV	189
Jadual 3.36	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi Carbon A, Carbon B, Carbon D dan Carbon E	191
Jadual 3.37	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi VAC, AAC dan BAC	192
Jadual 3.38	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi AC-0, AC-1, AC-6 dan AC-12	194
Jadual 3.39	Luas permukaan spesifik BET dan Plot-Hukum Gas bagi W1, W2 dan W3	194
Jadual 3.40	Isipadu monolapisan Plot-Hukum Gas dan Plot-Lanmuir bagi karbon diaktifkan Chengal	196
Jadual 3.41	Isipadu monolapisan Plot-Hukum Gas dan Plot-Lanmuir bagi karbon diaktifkan Tualang	196
Jadual 3.42	Isipadu monolapisan Plot-Hukum Gas dan Plot-Lanmuir bagi karbon diaktifkan Meranti Merah CeraH	196

	Halaman	
Jadual 3.43	Isipadu monolapisan Plot-Hukum Gas dan Plot-Lanmuir bagi karbon diaktifkan rawatan kimia	197
Jadual 3.44	Isipadu mikroliang kaedah BJH, Plot- t , Plot- α_s dan Plot-DR bagi karbon diaktifkan Chengal	199
Jadual 3.45	Isipadu mikroliang kaedah BJH, Plot- t , Plot- α_s dan Plot-DR bagi karbon diaktifkan Tualang	199
Jadual 3.46	Isipadu mikroliang kaedah BJH, Plot- t , Plot- α_s dan Plot-DR bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cera	199
Jadual 3.47	Isipadu mikroliang kaedah BJH, Plot- t , Plot- α_s dan Plot-DR bagi karbon diaktifkan rawatan kimia	200
Jadual 3.48	Isipadu mesoliang kaedah Plot- t dan Plot- α_s bagi karbon diaktifkan Chengal	201
Jadual 3.49	Isipadu mesoliang kaedah Plot- t dan Plot- α_s bagi karbon diaktifkan Tualang	201
Jadual 3.50	Isipadu mesoliang kaedah Plot- t dan Plot- α_s bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cera	201
Jadual 3.51	Isipadu mesoliang kaedah Plot- t dan Plot- α_s bagi karbon diaktifkan rawatan kimia	202
Jadual 3.52	Jumlah isipadu mikroliang dan mesoliang Plot- α_s dan Plot- t bagi karbon diaktifkan Chengal	202
Jadual 3.53	Jumlah isipadu mikroliang dan mesoliang Plot- α_s dan Plot- t bagi karbon diaktifkan Tualang	202
Jadual 3.54	Jumlah isipadu mikroliang dan mesoliang Plot- α_s dan Plot- t bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cera	203
Jadual 3.55	Jumlah isipadu mikroliang dan mesoliang Plot- α_s dan Plot- t bagi karbon diaktifkan rawatan kimia	203
Jadual 3.56	Isipadu mikroliang BJH dan Plot Kadar Penjerapan bagi karbon diaktifkan Chengal	209
Jadual 3.57	Isipadu mikroliang BJH dan Plot Kadar Penjerapan bagi karbon diaktifkan Tualang	210

		Halaman
Jadual 3.58	Isipadu mikroliang BJH dan Plot Kadar Penjerapan bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cera	210
Jadual 3.59	Isipadu mikroliang BJH dan Plot Kadar Penjerapan bagi karbon diaktifkan rawatan kimia	210

SENARAI RAJAH

		Halaman
Rajah 1.1	Struktur selulosa	5
Rajah 1.2	Struktur lignin Adler bagi kayu lembut	7
Rajah 1.3	Struktur utama galaktoglukomanan	8
Rajah 1.4	Enam jenis isoterma penjerapan BET	35
Rajah 1.5	Isoterma jenis I	36
Rajah 1.6	Isoterma jenis IV	38
Rajah 1.7	Isoterma jenis V	39
Rajah 1.8	Model penjerapan BET	40
Rajah 1.9	Plot- t bagi sampel yang tidak mematuhi keadaan Plot- t	46
Rajah 1.10	Kesan mesoliang ke atas isoterma penjerapan, Plot- t serta Plot- α_s	48
Rajah 1.11	Kesan mikroliang ke atas isoterma penjerapan, Plot- t serta Plot- α_s	49
Rajah 1.12	Contoh Plot-DR	51
Rajah 1.13	Lima jenis gelung histeresis de Boer	54
Rajah 1.14	Contoh gelung histeresis bagi isoterma jenis IV	55
Rajah 3.1	Komponen kimia kayu bagi kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah	95
Rajah 3.2	Spektrum kromatografi gas	99
Rajah 3.3	Lengkung TGA dan lengkung pembezaannya bagi pembakaran Chengal dalam oksigen	100
Rajah 3.4	Lengkung TGA dan lengkung pembezaannya bagi pembakaran Tualang dalam oksigen	100

	Halaman	
Rajah 3.5	Lengkung TGA dan lengkung pembezaannya bagi pembakaran Meranti Merah Cerah dalam oksigen	101
Rajah 3.6	Lengkung TGA dan lengkung pembezaannya bagi pembakaran Chengal dalam nitrogen	101
Rajah 3.7	Lengkung TGA dan lengkung pembezaannya bagi pembakaran Tualang dalam nitrogen	102
Rajah 3.8	Lengkung TGA dan lengkung pembezaannya bagi pembakaran Meranti Merah Cerah dalam nitrogen	102
Rajah 3.9	Hubungan haba pembakaran sampel kayu Chengal (Π), Tualang (∇), dan Meranti Merah Cerah (◆) dengan suhu pengkarbonan	105
Rajah 3.10	Hubungan bahan mudah meruap (◆), abu (⊗) dan karbon tetap (Π) bagi kayu Chengal dengan Suhu Pengkarbonan	107
Rajah 3.11	Hubungan bahan mudah meruap (◆), abu (⊗) dan karbon tetap (Π) bagi kayu Tualang dengan Suhu Pengkarbonan	107
Rajah 3.12	Hubungan bahan mudah meruap (◆), abu (⊗) dan karbon tetap (Π) bagi kayu Meranti Merah Cerah dengan Suhu Pengkarbonan	108
Rajah 3.13	Penyahwarnaan karamel bagi sampel kayu Chengal (Π), Tualang (⊗) dan Meranti Merah Cerah (◆) terhadap suhu pengkarbonan	111
Rajah 3.14	Nilai Penjerapan iodin bagi sampel kayu Chengal (Π), Tualang (⊗) dan Meranti Merah Cerah (◆) terhadap suhu pengkarbonan	112
Rajah 3.15	Spektrum FT-IR bagi sampel siri Chengal	114
Rajah 3.16	Spektrum FT-IR bagi sampel siri Tualang	114
Rajah 3.17	Spektrum FT-IR bagi sampel siri Meranti Merah Cerah	115
Rajah 3.18	Nilai penjerapan iodin (●) dan penyahwarnaan karamel (◆) karbon diaktifkan Chengal terhadap peratus pembakaran	118
Rajah 3.19	Nilai penjerapan iodin (●) dan penyahwarnaan karamel (◆) karbon diaktifkan Tualang terhadap peratus pembakaran	118

	Halaman	
Rajah 3.20	Nilai penjerapan iodin (●) dan penyahwarnaan karamel (◆) karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah terhadap peratus pembakaran	119
Rajah 3.21	Nilai penjerapan iodin (●) dan penyahwarnaan karamel (◆) terhadap bahan mudah meruap bagi kumpulan dengan peratus pembakaran 10-20%	121
Rajah 3.22	Nilai penjerapan iodin (●) dan penyahwarnaan karamel (◆) terhadap bahan mudah meruap bagi kumpulan dengan peratus pembakaran 30-40%	122
Rajah 3.23	Nilai penjerapan iodin (●) dan penyahwarnaan karamel (◆) terhadap bahan mudah meruap bagi kumpulan dengan peratus pembakaran 40-50%	123
Rajah 3.24	Isoterma penjerapan nitrogen pada 77 K bagi karbon diaktifkan Chengal	125
Rajah 3.25	Isoterma penjerapan nitrogen pada 77 K bagi karbon diaktifkan Tualang	126
Rajah 3.26	Isoterma penjerapan nitrogen pada 77 K bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah	127
Rajah 3.27	Perkaitan luas permukaan spesifik dengan peratus pembakaran bagi karbon diaktifkan Chengal (▲), Tualang (●) dan Meranti merah Cerah (◆)	132
Rajah 3.28	Plot isipadu liang penyaherapan bagi karbon diaktifkan Chengal	138
Rajah 3.29	Plot isipadu liang penyaherapan bagi karbon diaktifkan Tualang	140
Rajah 3.30	Plot isipadu liang penyaherapan bagi karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah	141
Rajah 3.31	Plot isipadu liang penyaherapan bagi karbon diaktifkan secara rawatan kimia	145
Rajah 3.32	TEM bagi CM ₄	148
Rajah 3.33	TEM bagi A ₄ M ₂	148
Rajah 3.34	TEM bagi A ₄ M ₃	148
Rajah 3.35	Lengkung- <i>t</i> rujukan piawai	151
Rajah 3.36	Plot- <i>t</i> bagi sampel karbon diaktifkan Chengal	154
Rajah 3.37	Plot- <i>t</i> bagi sampel karbon diaktifkan Tualang	154

	Halaman	
Rajah 3.38	Plot- t bagi sampel karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah	155
Rajah 3.39	Plot- t bagi sampel karbon diaktifkan secara rawatan kimia	156
Rajah 3.40	Lengkung- α_s rujukan piawai	158
Rajah 3.41	Plot- α_s bagi sampel karbon diaktifkan Chengal	163
Rajah 3.42	Plot- α_s bagi sampel karbon diaktifkan Tualang	163
Rajah 3.43	Plot- α_s bagi sampel karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah	164
Rajah 3.44	Plot- α_s bagi sampel karbon diaktifkan secara rawatan kimia	164
Rajah 3.45	Plot-DR bagi sampel karbon diaktifkan siri Chengal	168
Rajah 3.46	Plot-DR bagi sampel karbon diaktifkan siri Tualang	168
Rajah 3.47	Plot-DR bagi sampel karbon diaktifkan siri Meranti Merah Cerah	169
Rajah 3.48	Plot-DR bagi sampel karbon diaktifkan secara rawatan kimia	169
Rajah 3.49	Plot-Langmuir bagi sampel karbon diaktifkan siri Chengal	172
Rajah 3.50	Plot-Langmuir bagi sampel karbon diaktifkan siri Tualang	172
Rajah 3.51	Plot-Langmuir bagi sampel karbon diaktifkan Meranti Merah Cerah	173
Rajah 3.52	Plot-Langmuir bagi sampel karbon diaktifkan secara rawatan kimia	173
Rajah 3.53	Sebelum penjerapan zat terjerap	179
Rajah 3.54	Selepas penjerapan zat-zat terjerap	179
Rajah 3.55	Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan siri Chengal	181
Rajah 3.56	Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan siri Tualang	181
Rajah 3.57	Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan siri Meranti Merah Cerah	182
Rajah 3.58	Plot-Hukum Gas bagi sampel karbon diaktifkan secara rawatan kimia	182
Rajah 3.59	Perhubungan kecerunan Plot-Hukum Gas dengan luas permukaan spesifik BET bagi karbon diaktifkan Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah	184

	Halaman
Rajah 3.60	Perkaitan linear antara luas permukaan spesifik Plot- $t(\varphi)$, Plot- $\alpha_s(\square)$ dan Plot-Hukum Gas (\blacktriangle) dengan luas permukaan spesifik BET 187
Rajah 3.61	Plot-Hukum Gas bagi karbon diaktifkan Carbon AX21(φ), M158H (\square) dan CECA CXV (\blacktriangle). 190
Rajah 3.62	Plot-Hukum Gas bagi karbon diaktifkan Carbon A (φ), B (\square), D (\blacktriangle) dan E (\times) 191
Rajah 3.63	Plot-Hukum Gas bagi karbon diaktifkan VAC (φ), AAC (\square) dan BAC (\blacktriangle) 192
Rajah 3.64	Plot-Hukum Gas bagi karbon diaktifkan AC-0 (φ), AC-1 (\square), AC-6 (\blacktriangle) dan AC-12 A(\times) 193
Rajah 3.65	Plot-Hukum Gas bagi karbon diaktifkan W1(φ), W2 (\square) dan W3 (\blacktriangle) 195
Rajah 3.66	Kesan liang terhadap kadar penjerapan tanpa kehadiran mikroliang (----) dan dengan kehadiran mikroliang (—) 205
Rajah 3.67	Plot Kadar Penjerapan bagi sampel karbon diaktifkan siri Chengal 211
Rajah 3.68	Plot Kadar Penjerapan bagi sampel karbon diaktifkan siri Tualang 211
Rajah 3.69	Plot Kadar Penjerapan bagi sampel karbon diaktifkan siri Meranti Merah CeraH 212
Rajah 3.70	Plot Kadar Penjerapan bagi sampel karbon diaktifkan secara rawatan kimia 212

SENARAI GAMBAR FOTO

		Halaman
Gambar Foto 1.1	Tanur tanah bagi proses pengkarbonan	17
Gambar Foto 1.2	Relau pengaktifan kebendaliran berterusan	20
Gambar Foto 1.3	Tanur berputar bagi proses pengaktifan kimia	21
Gambar Foto 2.1	Relau pengkarbonan	74
Gambar Foto 2.2	Relau pengaktifan	75

SENARAI LAMPIRAN

	Halaman	
Lampiran 1	Data isoterma penjerapan BET pada 77K	234
Lampiran 2	Spektrum FT-IR	246
Lampiran 3	Spektrum GC-MS	266
Lampiran 4	A new perspective of specific surface areas and pores volume determination for activation carbon	276
Lampiran 5	Exploring the activation and pores formation process of different wood species	287

ABSTRAK

Kajian terperinci telah pun dijalankan ke atas sampel karbon diaktifkan yang disediakan daripada habuk gergaji kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah dengan menggunakan gas CO₂ sebagai agen pengaktifan. Keputusan menunjukkan bahawa proses penjanaan liang bergantung kepada jenis spesies kayu, ketumpatan kayu dan peratus pembakaran, tetapi tidak bergantung kepada peratus kandungan bahan mudah meruap serta suhu pengkarbonan. Pelbagai kaedah penentuan luas permukaan juga diperkenalkan, tetapi kaedah alternatif *Plot-Hukum Gas* yang disarankan didapati amat sesuai digunakan untuk penentuan luas permukaan spesifik serta isipadu monolapisan khasnya bagi sampel dengan Isoterma Jenis I. Kelebihan utama *Plot-Hukum Gas* ialah penentuan luas permukaan spesifik sampel adalah bebas daripada lengkung rujukan dan sampel piawai. Di samping itu, ia dapat memberikan nilai luas permukaan spesifik dan isipadu monolapisan secara serentak dengan kadar yang jauh lebih pantas dan kos yang lebih murah. Manakala kaedah alternatif *Plot-Kadar Penjerapan* pula sesuai digunakan untuk menghitung isipadu mikroliang sampel. Kelebihan utama kaedah ini ialah ia dapat memberikan nilai isipadu mikroliang secara terus tanpa melibatkan pengiraan matematik yang sulit. Dengan berdasarkan kepada kandungan abu yang rendah, kapasiti penjerapan serta keboleh-aktifan yang tinggi, kayu Meranti Merah Cerah amat sesuai digunakan sebagai bahan mentah untuk pengeluaran karbon diaktifkan. Karbon diaktifkan kayu Meranti Merah Cerah tanpa rawatan dengan peratus pembakaran 54.7% dan yang dirawat dengan larutan NaOH 8M masing-masing memberikan nilai luas permukaan spesifik BET yang paling tinggi sekali iaitu sebanyak 1272 m²/g dan 865 m²/g.

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ACTIVATED CARBON PREPARED
FROM WOOD DUST OF CHENGAL, TUALANG
AND MERANTI MERAH CERAH

ABSTRACT

Detailed analysis on activated carbon samples prepared from wood dust of Chengal, Tualang and Meranti Merah CERAH using gas CO₂ as activating agent showed that process of pores formation during activation depends on wood species, types of chemical treatment as well as burnt off percentage. However, it is independent from carbonization temperature and amount of volatile matter content of samples. The proposed alternative method of *Gas Law-Plot* is highly suitable to be used to determine specific surface area and monolayer volume, especially for samples with Type I Isotherm. This method is able to provide two very important information namely specific surface area as well as monolayer volume simultaneously, at faster rate and cheaper cost, without involving standard reference sample and curves. Whereas the proposed alternative method of *Adsorption Rate-Plot* can be used directly to determine the micropores volume without involving complicated mathematical calculations. Meranti Merah CERAH with its very low ash content, high ability to be activated and excellent adsorption capability shows distinctive potential as low cost raw material for commercial activated carbon. Samples without chemical treatment at burnt-off percentage of 54.7% and with chemical treatment of NaOH 8M solution exhibited highest adsorptive power with BET specific surface areas of 1272 m²/g and 865 m²/g respectively.

BAB 1

PENGENALAN

1.1 SEJARAH PERKEMBANGAN KARBON DIAKTIFKAN

Penggunaan karbon diaktifkan secara meluas bermula pada abad ke-17 susulan daripada penemuan daya penjerapannya yang amat menakjubkan. Pada tahun 1773 dan 1777, Scheele dan Fontana (Hassler, 1974) masing-masing secara berasingan telah melaporkan bahawa arang mempunyai keupayaan penjerapan yang tinggi untuk menjerap sejumlah besar kuantiti gas ataupun udara. Saluzzo (Flood, 1967) kemudiannya telah membuat kesimpulan bahawa jenis arang yang berbeza memiliki sifat penjerapan yang berlainan dan sesetengah gas lebih mudah dijerap berbanding dengan gas-gas yang lain.

Pada peringkat awalnya, karbon diaktifkan hanya digunakan secara komersial di dalam sektor industri penulenan serta penyahwarnaan minuman alkohol dan gula. Karbon diaktifkan jenis arang tulang ataupun *bone-char* yang disedia daripada proses pengkalsinan tulang telah banyak digunakan di bahagian Eropah. Permintaan topeng penapisan gas semasa perang dunia ke-2 turut mencetuskan minat ahli kimia tentang kajian karbon diaktifkan jenis butir, iaitu jenis karbon diaktifkan yang disedia daripada tempurung kelapa, kulit aprikot dan sebagainya (Hassler, 1974). Secara umumnya, karbon diaktifkan merupakan karbon berliang tinggi yang diproses daripada bahan-bahan organik. Istilah “diaktifkan” (Smíšek & Černý, 1970) merujuk kepada kebolehan bahan ini diguna sebagai zat penjerap tidak selektif.

Bahan mentah umum bagi pengeluaran karbon diaktifkan merupakan habuk gergaji kayu, arang, kok dan tempurung kelapa. Pemilihan jenis bahan mentah bergantung kepada penggunaan karbon diaktifkan. Secara umumnya, tempurung kelapa diguna untuk menghasilkan karbon diaktifkan bagi penggunaan di dalam fasa gas manakala arang dan habuk gergaji kayu pula biasanya diguna untuk menghasilkan karbon diaktifkan bagi tujuan penggunaan di dalam fasa yang terdiri daripada zat terjerap bersaiz molekul besar (Reupke & Duff, 1992). Selain daripada itu, fosil, antrasit, arang batu bitumen, lignit (Chan *et al.*, 1975) dan tempurung kelapa sawit (Srinivasakannan *et al.*, 2004) juga boleh diguna sebagai bahan mentah dalam proses penghasilan karbon diaktifkan. Normah *et al.* (1992) telah menunjukkan bahawa dengan menggunakan teknik relau kebendaliran pada skala makmal, hasil buangan sektor pertanian seperti tempurung kelapa dan kelapa sawit dapat ditukarkan menjadi karbon diaktifkan yang berkualiti tinggi. Rahman dan Saad (2003) pula menggunakan biji jambu batu (*Guava*) sebagai bahan mentah dan kajiannya telah berjaya menghasilkan karbon diaktifkan yang berdaya penjerapan sederhana.

Karbon diaktifkan biasanya dihasilkan di dalam dua bentuk fizik umum iaitu sebagai serbuk karbon diaktifkan dan sebagai butir karbon diaktifkan. Serbuk karbon diaktifkan biasanya diguna untuk fasa cecair manakala butir karbon diaktifkan pula sering diguna untuk fasa gas ataupun fasa cecair di mana penjanaan semula diperlukan (Reupke & Duff, 1992). Butir karbon diaktifkan biasanya mempunyai luas permukaan sebanyak 300-1000 m²/g untuk penjerapan fasa cecair dan lebih daripada 1000 m²/g untuk penggunaan fasa gas. Kepilihan yang tinggi untuk penjerapan gas dan wap organik ini bermakna karbon diaktifkan harus memiliki struktur mikroliang yang sangat tinggi (Reupke & Duff, 1992).

Kajian Ostrejko (Hassler, 1974; Smíšek & Černý, 1970) pada tahun 1900 dan 1901 telah berjaya menciptakan suatu teknologi moden bagi pengeluaran karbon diaktifkan secara

komersial. Pada penghujung tahun 1980, karbon diaktifkan telah mula digunakan di dalam teknologi gubahan tekanan bukan kriogenik untuk proses pemisahan udara. Pembangunan teknologi ini telah membawa kepada kaedah pengeluaran gas oksigen dan nitrogen yang jauh lebih mudah dengan kos pengeluaran yang lebih murah. Gas yang dihasilkan dengan teknologi ini amat sesuai digunakan dalam bidang di mana permintaan ketulenan gas tidak begitu ketat.

Pada tahun 1995, permintaan pasaran dunia terhadap karbon diaktifkan telah mencapai kira-kira 410,000 MT (Roskill, 1998). Permintaan yang semakin meningkat ini berpunca daripada dua faktor utama iaitu kesedaran pihak awam tentang kepentingan alam sekitar serta penguatkuasaan undang-undang tempatan terutamanya dari segi pengawalan sistem pembuangan air serta perlepasan gas ke udara. Rawatan air merupakan pasaran yang terpenting dan terbesar bagi karbon diaktifkan di mana ia dianggarkan meliputi kira-kira 20% daripada permintaan dunia. Kawalan pencemaran udara turut menjadi pasaran yang sangat penting terutamanya di negara-negara maju seperti Amerika Syarikat, Eropah dan Jepun. Karbon diaktifkan telah banyak digunakan dalam proses *Catacarb* untuk penulenan gas asli manakala dalam proses *Benfield*, karbon diaktifkan pula digunakan untuk merawat aliran gas lelasan petroleum dan untuk memisahkan perlepasan gas hidrogen sulfida daripada sistem pembedungan (Roskill, 1998).

Selain daripada itu, kawalan ke atas perlepasan gas daripada kenderaan (Roskill, 1998) dan penggunaannya dalam bidang pemulihan semula emas (Lenghaus & Solomon, 2002) turut mempertingkatkan lagi permintaan pasaran dunia terhadap karbon diaktifkan.

Di samping menghasilkan karbon diaktifkan, syarikat-syarikat besar seperti Norit, Calgon, Atochem, Chemviron, Grafham, Enviritol, Osaka Gas Chemical, Takeda Chemical, Minabe Chemical dan lain-lain lagi turut telah banyak memberi sumbangan dalam

penyelidikan dan pembangunan teknologi terkini bagi penghasilan karbon diaktifkan serta menerokai pasaran baru bagi penggunaan zat penjerap ini (Roskill, 1992). Sehingga ke masa kini, ratusan kajian telah pun dijalankan oleh ahli kimia serta pakar teknologi permukaan ke atas sifat-sifat karbon diaktifkan serta proses pengaktifannya.

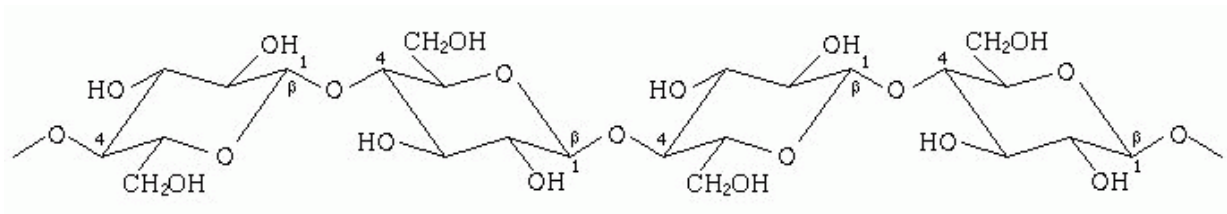
1.2 ZAT PENJERAP – KAYU

Secara umumnya, kayu komersial dapat dikelaskan kepada 2 kumpulan iaitu kayu keras dan kayu lembut. Pengkelasan ini bukan berdasarkan kepada kelembutan ataupun kekerasan relatif kayu berkenaan tetapi berdasarkan kepada ciri-ciri botanikal tumbuh-tumbuhan induk. Semua kayu yang dihasilkan oleh pokok berdaun lebar di mana biji benihnya terkandung di dalam kulit benih adalah dikelaskan sebagai kayu keras ataupun *Angiosperma*. Manakala kayu yang dihasilkan oleh pokok konifer di mana daunnya berbentuk jarum serta biji benihnya tidak terkandung di dalam kulit benih adalah dikelaskan sebagai kayu lembut ataupun *Gimnosperma* (Sjöström, 1993; Wan Daud, 1998). Walaupun pengkelasan ini adalah berdasarkan kepada rupa bentuk botanikal tumbuh-tumbuhan induk, ciri-ciri struktur bagi kedua-dua kumpulan ini memang berbeza di antara satu sama lain. Kayu lembut biasanya tumbuh di kawasan beriklim sederhana manakala kayu keras pula biasanya tumbuh di kawasan beriklim tropika atau semi-tropika (Menon, 1967). Di Semenanjung Malaysia terdapat kira-kira 2500 spesies pokok dan di antaranya, terdapat hanya 10 spesies kayu lembut. Namun, di antara 10 spesies kayu lembut ini, hanya satu spesies iaitu kayu Damar Minyak (*Agathis dammara*) yang wujud dalam kuantiti yang cukup banyak untuk tujuan komersial (Wong, 1979).

Selulosa merupakan struktur polisakarida utama di dalam tumbuh-tumbuhan (Percival, 1962). Lebih kurang 40~45% daripada jisim kering kayu terdiri daripada selulosa dan kebanyakannya tertumpu pada bahagian dinding sekunder sel di mana ia wujud sebagai

homopolisakarida linear yang terdiri daripada hanya unit-unit β -D-glukopiranososa yang dirangkai bersama oleh ikatan $1 \rightarrow 4$ -glikosida. Semua ikatan $1 \rightarrow 4$ -glikosida dalam selulosa adalah jenis β di mana oksigen C-1 menghala ke atas dalam Rajah Haworth (Rajah 1.1) (Sjöström, 1993; Bettelheim & March, 1995; Wan Daud, 1998).

Dengan menggunakan kaedah pemetilan, dapat ditunjukkan bahawa kumpulan hidroksil dalam selulosa adalah terletak di kedudukan 2,3 dan 6 β -D-glukopiranososa (Browning, 1981). Molekul selulosa berbentuk linear dan mempunyai kecenderungan yang kuat untuk membentuk ikatan hidrogen intramolekul dan juga antara molekul. Kumpulan molekul selulosa ini teragregat bersama dalam bentuk mikrofibril pada kawasan tersusun (berhablur) diselangi oleh kawasan yang kurang tersusun (beramorfus). Mikrofibril ini kemudiannya akan berkumpul bersama untuk membentuk fibril dan akhirnya menjadi gentian selulosa. Akibat daripada struktur bergentian dan ikatan hidrogen yang kuat ini, selulosa mempunyai kekuatan tegangan yang tinggi dan tidak larut di dalam kebanyakan pelarut (Sjöström, 1993; Wan Daud, 1998). Setiap makromolekul selulosa mungkin mengandungi kira-kira 300 sehingga ke 3000 unit β -D-glukopiranososa (Bettelheim & March, 1995).

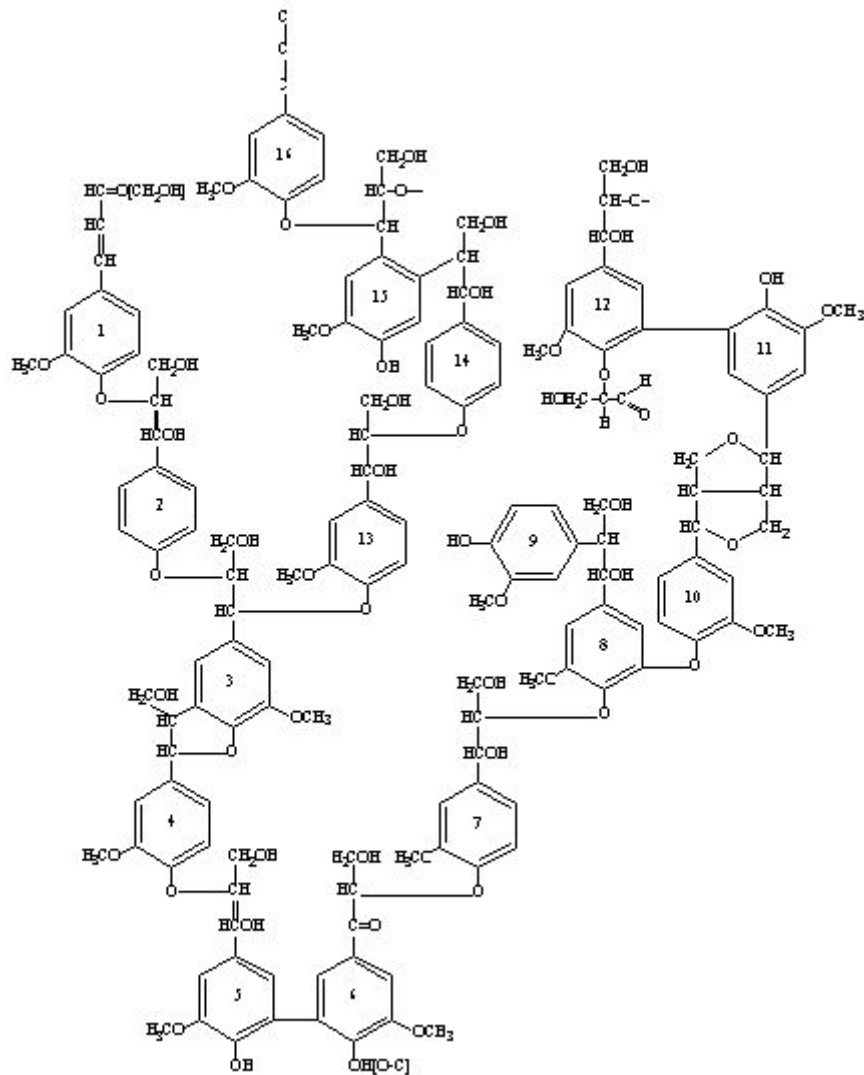


Rajah 1.1 : Struktur Selulosa (Percival, 1962)

Kebanyakan tisu tumbuhan mengandungi suatu bahan polimer beramorfus yang digelar sebagai lignin. Di dalam tisu kayu yang matang, kandungan lignin adalah kira-kira 18~38%. Lignin tumbuh-tumbuhan biasanya tertumpu pada ruangan di antara sel (lamela tengah) di mana ia diendapkan ketika proses pengligninan tisu tumbuh-tumbuhan sebagai produk akhir yang tidak berbalik bagi metabolisme tumbuh-tumbuhan. Ia tidak larut di dalam kebanyakan pelarut dan tidak dapat dihidrolisis kepada unit-unit monomer (Browning, 1981).

Secara umumnya, lignin merupakan polimer yang terdiri daripada unit-unit fenilpropana. Polimer lignin mengandungi kumpulan-kumpulan metoksil, fenolik hidroksil serta aldehid hujung pada rantai sisinya. Hanya sebilangan kecil daripada kumpulan fenolik hidroksil ini bebas, manakala kebanyakan daripadanya dimiliki oleh unit-unit fenilpropana jiran melalui ikatan. Pengesteran berlaku pada unit-unit siringil di dalam lignin kayu keras. Selain daripada kumpulan ini, kumpulan alkoholik hidroksil dan karbonil juga telah pun dimasukkan ke dalam polimer lignin melalui peringkat pendehidrogenan sewaktu proses pempolimeran (Sjöström, 1993; Wan Daud, 1998).

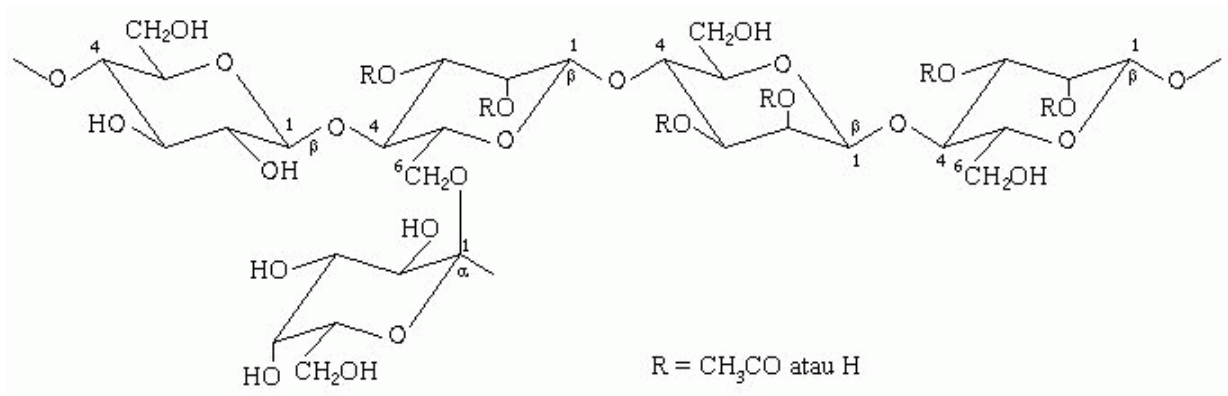
Di dalam spesies kayu yang tertentu, sebilangan kuantiti kumpulan alkoholik hidroksil telah diesterifikasikan dengan *p*-hidroksi asid benzoik atau *p*-hidroksi acid sinamik. Asid-asid ini seolah-olah mempunyai afiniti untuk membentuk ester dengan kumpulan γ -hidroksil pada rantai sisi lignin. Formula lignin Adler yang ditunjukkan dalam Rajah 1.2 mengandungi 16 unit fenilpropana dan ia hanya mewakili sebahagian kecil daripada makromolekul lignin (Sjöström, 1993; Wan Rosli Wan Daud, 1998).



Rajah 1.2 : Struktur lignin Adler bagi kayu lembut (Sjöström, 1993)

Secara umumnya, nama hemiselulosa merujuk kepada kumpulan karbohidrat yang terkandung di dalam dinding sel tumbuhan di mana ia bersekutu dengan lignin. Gabungan ini mengelilingi serat-serat selulosa dan wujud dalam fasa amorfus (Percival, 1962). Hemiselulosa tergolong dalam kumpulan polisakarida heterogen di mana pembentukannya berlaku menerusi laluan biosintesis yang agak berlainan daripada selulosa. Berbeza daripada selulosa yang merupakan homopolisakarida, hemiselulosa merupakan heteropolisakarida. Hemiselulosa secara relatif lebih mudah dihidroliskan oleh asid kepada komponen monomernya yang mengandungi D-glukosa, D-manosa, D-galaktosa, D-xilosa, L-arabinosa, dan sebilangan kecil

L-ramnosa serta D-asid glukuronik, 4-*o*-metil-D-asid glukuronik, dan asid D-galakturonik. Kebanyakan hemiselulosa mempunyai darjah pempolimeran hanya kira-kira 200 sahaja. Kandungan hemiselulosa bagi kayu kering biasanya terletak di antara 20~30%. Hemiselulosa utama di dalam kayu lembut adalah galaktoglukomanan. Kandungannya adalah kira-kira 20%. Rantai utama molekul galaktoglukomanan (Rajah 1.3) terdiri daripada unit-unit 1→4-terangkai β-D-glukopiranososa dan β-D-manopiranososa. Komponen utama hemiselulosa dalam kayu keras pula wujud sebagai *o*-asetil-4-*o*-metil-glukurono-β-D-xilan, atau glukuronosilan. Kandungan xilan berbeza dari 15 ke 30% bergantung kepada spesies kayu keras (Sjöström, 1993; Wan Rosli Wan Daud, 1998).



Rajah 1.3 : Struktur utama galaktoglukomanan (Sjöström, 1993)

Kebanyakan bahan ekstrakan di dalam kayu terdiri daripada bahan organik yang boleh larut di dalam pelarut neutral seperti eter, benzena, alkohol, aseton, gasolin, air ataupun stim. Apabila sesuatu bahan ekstrakan tidak dapat dipisah dengan menggunakan pelarut, penelitian serta pemeriksaan mikroskopik keratan rentas kayu mungkin dapat membuktikan kewujudan bahan tersebut misalnya kalsium oksalat dalam kayu. Bahan-bahan ekstrakan ini mungkin terdiri daripada hidrokarbon alifatik dan aromatik, terpena, asid-asid alifatik dan aromatik serta

garam-garamnya, alkohol, fenol, aldehid, keton dan kuinon, ester dan eter. Dalam spesies kayu yang tertentu, ia mungkin mengandung juga minyak pati, minyak tak meruap, asid resin, sterol, tanin, bahan pewarna, polisakarida terlarutkan air dan siklitol (Wise, 1952).

1.2.1 ABU

Abu merupakan sisa pembakaran bahan tak organik kayu. Hanya sebahagian daripada komponen abu dapat diekstrak dengan menggunakan air atau asid mineral manakala yang lain pula tidak larut langsung di dalam kedua-dua jenis pelarut tersebut. Brown telah melaporkan bahawa fibril dan trakeid semua jenis kayu yang diperiksa olehnya mengandungi rangka bersilika dan rangka itu hilang apabila kayu dirawat dengan asid hidroklorik (Wise, 1952).

Kandungan abu bagi sesuatu spesies kayu bergantung kepada kawasan. Pokok yang tumbuh di kawasan beriklim sederhana biasanya mengandungi abu di antara 0.2~1%. Secara umumnya, bahagian kulit pokok mengandungi kandungan abu yang lebih tinggi dan kandungan abu bagi kayu bermusim akan berubah dari suatu spesies ke spesies yang lain. Penyelidikan secara mendalam mengenai kandungan abu telah dilaporkan oleh Wehmer dan Czapek (Wise, 1952). Bahan tak organik yang biasanya wujud di dalam abu kayu merupakan kalsium, kalium dan magnesium manakala radikal asid yang biasanya hadir di dalam abu kayu pula merupakan karbonat, fosfat dan sulfat. Kadang-kala bahan tak organik seperti aluminium, ferum, mangan, natrium dan klorida juga wujud di dalam spesies kayu yang tertentu tetapi dalam kuantiti yang amat terhad. Selain daripada bahan tak organik itu, barium juga pernah dijumpai di dalam kayu *Dalbergia hypolenca* dan *Fagus sylvatica* manakala titanium pernah dilaporkan wujud di dalam kayu *Oak*. Kayu *Spruce* dilaporkan mengandungi plumbum, zink dan kuprum manakala kayu *Beech* pula dilaporkan mengandungi talium. Biasanya, lebih kurang 60% daripada abu kayu terdiri daripada oksida kalsium manakala 10~30% daripadanya

terdiri daripada oksida kalium. Kandungan berkalium biasanya wujud sebagai K_2CO_3 dan merupakan sumber baja yang penting bagi pokok. Kandungan magnesium dan ferum di dalam abu kayu masing-masing terletak di antara 5~10% dan 0.5~2% (Wise, 1952).

1.2.2 KETUMPATAN KAYU

Ketumpatan merupakan salah satu parameter terpenting yang dapat menentukan ciri fizik dan sifat mekanik sesuatu kayu. Ia ditakrifkan sebagai jumlah jisim per unit isipadu. Oleh kerana ketumpatan kayu amat bergantung kepada liangnya, parameter ini biasanya dihitung secara menggunakan jumlah berat keseluruhan iaitu berat kayu termasuk berat kandungan lembapannya. Di Amerika Syarikat, ketumpatan kayu sering ditentukan dengan membahagikan berat kering sesuatu kayu dengan isipadu kayu samada pada kandungan lembapan 0% ataupun 12% (Haygreen & Bowyer, 1989).

Medium penyesanan yang digunakan dalam penentuan isipadu bergantung kepada kehendak eksperimen dan ia mungkin merupakan air, benzena, heksana, helium, merkuri ataupun lain-lain jenis cecair. Breuil (Kollmann & CotJ, 1968) telah menggunakan merkuri sebagai medium penyesanan pada alat penentuan ketumpatan kayu yang direka oleh beliau.

1.2.3 STRUKTUR KAYU KERAS

Kayu keras dapat dibahagikan kepada tiga kategori utama iaitu kayu keras berat, kayu keras sederhana berat dan kayu keras ringan. Pengkelasan beberapa spesies kayu keras Malaysia ditunjukkan di dalam Jadual 1.1 (Asian Timber, 1998). Komponen umum yang biasa wujud di dalam kayu keras merupakan vesel, parenkima kayu atau tisu lembut, ruji atau ruji parenkima, fibril, floem, penyurih getah, jalur antara selulosa dan sebagainya (Menon, 1967).

Jadual 1.1 : Pengkelasan beberapa spesies kayu Malaysia (Asian Timber, 1998)

Kayu Keras Berat	Kayu Keras Sederhana Berat	Kayu Keras Ringan
Chengal	Keruing	Meranti Merah Gelap
Balau	Kempas	Meranti Merah Cera
Balau Merah	Kapur	Meranti Merah
Merbau	Mengkuang	Meranti Kuning
	Tualang	Meranti Putih
		Mersawa
		Nyatoh
		Sepetir
		Jelutong

1.2.4 KAYU CHENGAL (*BALANOCARPUS HEIMII*)

Chengal merupakan nama biasa Malaysia bagi pokok dan kayu *Balanocarpus heimii*. Pokok ini juga dikenali sebagai *Neobalanocarpus heimii* dan ia terletak di bawah kumpulan keluarga *Dipterocarpaceau*. Pokok chengal ini banyak ditemui di Semenanjung Malaysia terutama sekali di Negeri Pahang. Pokok ini dapat tumbuh dengan baik di bawah keadaan tanah dan topografi yang berlainan, dari kawasan tanah rata separuh paya sehingga ke kawasan bukit yang berketinggian 900 meter. Pokoknya juga dapat mencapai ketinggian yang amat menakjubkan dengan ukuran lilitan melebihi 3 meter. Nama tempatan lain bagi Chengal dikenali sebagai Penak (Lopez, 1983).

Kayu gubal Chengal amat mudah dikenali. Teras kayunya berwarna kuning kehijauan semasa baru ditebang dan bertukar menjadi warna perang selepas dibiarkan bagi tempoh masa yang tertentu. Permukaan planar kayu Chengal kelihatan berkilau dan sentiasa bercorak dengan jaluran kabur, manakala tekstilnya pula kelihatan sederhana halus dan sekata. Corak jaluran kayu Chengal biasanya saling mengunci di antara satu sama lain dan ini memberi kesukaran

untuk memotong merentasinya. Ketumpatan kering-udara kayu Chengal adalah kira-kira 0.928g/ml (Menon, 1967).

Kayu Chengal tidak mempunyai gelang pembesaran. Veselnya bersaiz sederhana dengan bilangan yang sederhana banyak dan biasanya wujud secara bersendirian ataupun secara berkumpulan dalam bilangan 2 hingga ke 4. Veselnya tertabur secara sekata tanpa menunjukkan sebarang corak penyusunan dan sentiasa diisi dengan tilos serta sering dilengkapi dengan liang-liang berbentuk ringkas. Sel parenkima kayu Chengal terdiri daripada jenis apotrakial serta paratrakial yang wujud di dalam bilangan yang amat banyak. Jenis apotrakial mengandungi jalur yang mempunyai ruang pemisahan serta ketebalan yang tidak menentu, dengan garisan bertangen yang rapat melanjut dari ruji ke ruji. Manakala sel parenkima paratrakial pula wujud di dalam bilangan yang amat sedikit dengan sempadannya yang sempit lagi tidak sempurna. Ruji kayu Chengal mempunyai saiz berjulat dari sederhana halus sehingga ke saiz sederhana dan boleh dilihat dengan mata kasar pada keratan melintang. Akan tetapi kewujudannya kurang nyata pada bahagian keratan jejarian. Di samping itu, saluran antara sel bagi kayu Chengal pula biasanya kelihatan lebih kecil daripada vesel pada pembentukan sepusat (Menon, 1967).

1.2.5 KAYU TUALANG (*KOOMPASSIA EXCELSA*)

Tualang merupakan nama biasa Malaysia bagi pokok dan kayu *Koompassia excelsa*. Pokok ini terletak di bawah kumpulan keluarga *Leguminosae*. Ia juga dikenali sebagai kayu Raja dan Tapang di Negeri Sarawak, Mengaris di Negeri Sabah, Yuan di Negara Thai dan Manggis di Negara Filipina. Pokok Tualang ini agak besar dan ketinggian maksima yang pernah tercatat di Semananjung Malaysia berukuran 81 meter dengan ukuran lilitan 8.5 meter.

Pokok ini banyak ditemui di kawasan lurah serta bahagian bawah lereng bukit di sekitar kawasan tengah dan utara Semenanjung Malaysia (Ser, 1984).

Kayu gubal Tualang amat senang dikenali dan ia berwarna putih kelabu. Teras kayunya berwarna perang kemerahan semasa baru ditebang dan bertukar menjadi warna perang gelap selepas dibiarkan bagi tempoh masa yang tertentu. Permukaan planarnya kelihatan kurang berkilau dengan corak jaluran pada pemandangan jejarian serta corak berupa bulu pada pandangan tangan. Lapisan tisu luar termasuk floem jenis sepusat biasanya hadir di dalam spesimen yang bersaiz besar. Tekstil kayu Tualang kelihatan kasar tetapi sekata. Corak jaluran kayu Tualang biasanya saling mengunci di antara satu sama lain dan ini memberi kesukaran untuk memotong merentasinya. Ketumpatan kering-udara kayu Tualang adalah di antara 0.800 ke 0.864g/ml (Menon, 1967).

Kayu Tualang tidak mempunyai gelang pembesaran. Veselnya bersaiz sederhana besar dengan bilangan yang agak sedikit dan biasanya wujud secara bersendirian ataupun berkumpul dalam bilangan 2 hingga ke 3, ataupun kadang-kala 4 dalam orientasi jejarian. Vesel ini mempunyai kecenderungan untuk menyusun pada garisan tangan. Tilos tidak hadir di dalam vesel manakala endapan merupakan perkara biasa. Sel parenkima kayu Tualang wujud dalam bilangan yang amat banyak dan dapat dilihat dengan mata kasar sebagai jaluran searah yang berupa ombak (paratrakial) ataupun kadang-kala dalam bentuk garisan berhujung sempit yang kurang berupa ombak. Ruji kayu Tualang mempunyai saiz yang sederhana halus dan kurang jelas apabila dilihat dengan mata kasar akibat daripada kekurangan kontras dari segi warna latar belakang kumpulan fibril dan ia juga kurang ketara pada bahagian permukaan jejarian. Saluran antara sel tidak wujud di dalam kayu Tualang (Menon, 1967).

1.2.6 KAYU MERANTI MERAH CERAH (*SHOREA SPP.*)

Pokok Meranti Merah Cerah terletak di bawah kumpulan keluarga *Dipterocarpaceae* dan kayunya banyak digunakan secara komersial di Semenanjung Malaysia. Sehingga ke masa kini, hanya 12 daripada 59 spesies Meranti Merah yang telah dikenalpasti dikategorikan sebagai Meranti Merah Cerah (Choo & Lim, 1983). Meranti Merah Cerah juga dikenali sebagai Perawan, Meranti Bunga dan Alan Bunga di Sarawak; Lanan di Kalimantan; Red Seraya dan Seraya Merah di Sabah; *Almon* dan *Mayapis* di Filipina. Sistem penamaan ini bergantung kepada spesiesnya (Lincoln, 1986).

Kayu gubal Meranti Merah Cerah mempunyai warna yang lebih cerah dan ia kelihatan berbeza daripada teras kayunya yang berwarna merah cerah atau perang jambu. Permukaan planarnya kelihatan berkilau dengan corak jaluran serta bintik-bintik yang agak menarik lagi halus pada pemandangan jejarian. Namun, tekstilnya kelihatan agak kasar walaupun sekata. Jaluran kayu Meranti Merah Cerah biasanya saling mengunci di antara satu sama lain dan berupa ombak. Kayunya agak lembut ataupun sederhana keras dan agak mudah apabila dipotong merentasinya. Ketumpatan kering-udara kayu Meranti Merah Cerah adalah kira-kira 0.544g/ml (Menon, 1967).

Kayu Meranti Merah Cerah tidak mempunyai gelang pembesaran. Veselnya bersaiz sederhana besar dan biasanya berbilang agak sedikit dan wujud secara bersendirian ataupun berkumpulan dengan bilangan sehingga ke 4 dalam pasangan jejarian. Walaupun taburannya terserakan tetapi ia mempunyai kecenderungan untuk menyusun pada garisan membujur yang pendek. Tilosnya hadir di dalam vesel tetapi dalam kuantiti yang tidak begitu banyak, manakala endapannya tidak wujud sama sekali. Sel parenkima kayu Meranti Merah Cerah terdiri daripada 2 jenis iaitu jenis apotrakial serta paratrakial. Jenis paratrakial biasanya tidak sempurna dan mempunyai vasisentrik yang sempit dengan bentuk *aliform* ataupun susunan

searah tempatan. Jenis apotrakial pula biasanya mempunyai jaluran beruang besar yang tidak menentu. Jaluran ini menutupi saluran resin dan wujud sebagai barisan terserakan di mana ia mungkin membentuk garisan pendek dan sempit di antara ruji (Menon, 1967).

Ruji kayu Meranti Merah Cerah bersaiz sederhana dan boleh dilihat dengan mata kasar pada pemandangan melintang dan agak ketara apabila dilihat pada pemandangan jejarian. Saluran antara sel bagi kayu Meranti Merah Cerah wujud dalam siri sepusat dan kelihatan agak ketara apabila dilihat dengan mata kasar pada kedua-dua keratan melintang dan membujur. Salurannya sering dipenuhi oleh resin yang berwarna putih (Menon, 1967).

1.2.7 KETUMPATAN KAYU CHENGAL, TUALANG DAN MERANTI MERAH CERAH

Purata ketumpatan kering udara bagi kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah ditunjukkan dalam Jadual 1.2 :

Jadual 1.2 : Purata Ketumpatan kayu Chengal, Tualang dan Meranti Merah Cerah
(^φ Lopez, 1983; ^ψ Ser, 1984 & ^ζ Choo & Lim, 1983)

Kayu	Purata Ketumpatan Kering Udara, kg/m ³	Rujukan
Chengal	915 – 980	^φ
Tualang	880	^ψ
Meranti Merah Cerah	545	^ζ

1.3 PENGHASILAN KARBON DIAKTIFKAN

1.3.1 PROSES PENGKARBONAN

Proses pengkarbonan merupakan suatu proses pirolisis yang dikenakan ke atas bahan berkarbon untuk menguraikannya kepada unsur asas karbon apabila bahan berkarbon tersebut dipanas dalam keadaan tanpa kehadiran udara iaitu pembakaran tidak lengkap. Kawalan kehadiran udara amat penting dan ia bertujuan untuk mengelakkannya daripada pembakaran berlebihan demi menjamin hasil pengeluaran proses pengkarbonan. Pembakaran yang tidak terkawal akan menyebabkan bahan berkarbon terbakar menjadi abu (FAO, 1987).

Pada peringkat awal proses pengkarbonan, pembakaran kayu biasanya dilakukan sebagai sumber bekalan tenaga bagi tujuan pengeringan dan seterusnya untuk mempertingkatkan suhu bahan berkarbon tersebut (Dryden, 1973). Pada suhu di antara 270~290°C, proses pengkarbonan secara spontan bertukar daripada proses endotermik kepada proses eksotermik (Smith, 1959). Ketika itu, sumber tenaga luar tidak lagi diperlukan sekiranya tiada kehilangan tenaga dari relau pengkarbonan. Sewaktu proses pengkarbonan ini, kebanyakan unsur bukan karbon akan terlebih dahulu dibebaskan dalam bentuk gas bersama dengan gas lain seperti hidrogen dan oksigen. Pembebasan gas ini adalah disebabkan oleh penguraian pirolisis bahan berkarbon tersebut. Pembakaran ke atas gas tersebut menjadi sumber tenaga utama untuk proses pengkarbonan yang seterusnya (FAO, 1987).

Atom bagi unsur karbon yang terbebas sewaktu proses pengkarbonan akan terkumpul untuk membentuk habluran yang dikenali sebagai habluran grafitik asas. Akibat daripada saling penyusunan habluran yang tidak tetap ini, celahan bebas kekal wujud di antaranya. Namun, celahan ini sering menjadi terisi dan tersumbat akibat daripada pengendapan dan penguraian zat bertar ataupun oleh karbon amorfus. Maka dengan ini, hasil arang hanya memiliki kapasiti penyerapan yang amat kecil sahaja (FAO, 1987). Ismadji *et al.* (2004) telah melaporkan bahawa arang yang disediakan daripada proses pirolisis bervakum akan menghasilkan karbon diaktifkan yang mempunyai luas permukaan serta isipadu liang yang

lebih tinggi jika dibandingkan dengan arang yang disediakan daripada proses pirolisis pada keadaan atmosfera.

Pelbagai kaedah pengkarbonan telah pun digunakan secara komersial. Cara ini termasuk tanur tanah, tanur sementara, tanur berputar dan relau pengkarbonan. Tanur tanah (Gambar Foto 1.1) merupakan suatu cara yang agak primitif dan ia telah diamalkan sejak dari zaman dahulu (Davidson *et al.*, 1968). Namun, kaedah ini masih lagi diamalkan di negara-negara kurang maju. Akibat daripada proses penghutan di kawasan pedalaman, tanur boleh diangkut turut diperkenalkan (Hoi *et al.*, 1985). Di Malaysia Barat, terdapat kira-kira 10 buah tanur tanah pengkarbonan masih lagi beroperasi. Namun, bilangannya kian menyusut akibat daripada kekurangan bahan mentah dan cara pengendaliannya yang agak primitif itu (Smíšek & Černý, 1970).



Gambar Foto 1.1 : Tanur tanah bagi proses pengkarbonan

1.3.2 PROSES PENAKTIFAN

Hasil arang yang diperolehi daripada proses pengkarbonan pada asalnya mempunyai luas permukaan dan daya penyerapan yang amat rendah. Demi mempertingkatkan lagi luas

permukaannya, proses pengaktifan harus dijalankan ke atas bahan tersebut. Proses pengaktifan ditakrifkan sebagai suatu proses yang dapat menukarkan suatu bahan berliang sedikit serta berpermukaan rendah kepada suatu bahan yang berliang banyak dengan luas permukaan yang jauh lebih besar (Jankowska *et al.*, 1991).

Secara umumnya, karbon diaktifkan dapat disediakan melalui dua kaedah utama. Kaedah pertama dikenali sebagai Proses Pengaktifan Kimia. Cara ini menghasilkan karbon diaktifkan dalam satu langkah sahaja di mana bahan berkarbon terlebih dahulu dirawat dengan agen pengaktifan yang dapat mempengaruhi langkah pirolisis serta menghindari pembentukan tar sewaktu proses pengaktifan. Contoh agen pengaktifan umum bagi kaedah ini adalah zink klorida (Hu *et al.*, 2003) dan asid fosforik (Hendawy, 2003). Okada *et al.* (2003) telah menjalankan kajian pengaktifan ke atas hasil buangan surat khabar dengan menggunakan siri karbonat K_2CO_3 , Rb_2CO_3 , Cs_2CO_3 , Li_2CO_3 , Na_2CO_3 dan hidroksida NaOH. Hasil kajiannya menunjukkan bahawa luas permukaan spesifik yang terjana bergantung kepada agen pengaktifan dan keadaan pengaktifan di mana perbezaan luas permukaan spesifik didapati mempunyai perkaitan dengan jejari ionik agen pengaktifan. Wu *et al.* (2005) telah melaporkan bahawa pengaktifan dengan agen pengaktifan KOH dapat menghasilkan karbon diaktifkan yang memiliki kira-kira 33-49% kandungan mesoliang. Kesan pembentukan mesoliang ini didapati menyokong laporan kajian Hu *et al.* (2003). Pengaktifan ke atas campuran bahan berkarbon dengan agen pengaktifan ini sering-kali dijalankan dengan menggunakan tanur berputar pada suhu kira-kira 700°C (Roskill, 1990).

Kaedah kedua dikenali sebagai Proses Pengaktifan Fizik di mana bahan berkarbon terlebih dahulu dipengkarbonankan menerusi proses pengkarbonan dan disusuli oleh proses pengaktifan. Cara ini menghasilkan karbon diaktifkan dalam dua langkah yang berasingan. Contoh agen pengaktifan bagi kaedah ini merupakan gas, udara dan stim (Smíšek & Černý,

1970; Wu *et al.*, 2005). Pengaktifan ke atas hasil arang berlaku dalam 2 peringkat utama. Peringkat pertama melibatkan pembakaran kira-kira 10% karbon amorfus kerana karbon amorfus mempunyai kecenderungan untuk terbakar terlebih dahulu dan akibat daripada pembakarannya, liang yang tersumbat di antara habluran karbon tersusun akan terbuka dan menjadi bebas. Peringkat kedua melibatkan pembakaran karbon tersusun asas dan akibat daripada pembakaran ini, lebih banyak liang akan terbentuk dan ini menghasilkan suatu hasil yang berliang banyak serta berluas permukaan besar (Smišek & Černý, 1970).

Akan tetapi, kedua-dua proses ini kadang-kala boleh digabungkan untuk tujuan penghasilan karbon diaktifkan yang lebih berkesan. Sebagai contohnya, proses kimia boleh dilakukan melalui proses pengaktifan dengan stim untuk memperbanyakkan lagi bilangan liang besar (Smišek & Černý, 1970).

Selain daripada ini, rawatan kimia ke atas bahan mentah berkarbon turut diamalkan oleh sesetengah pengeluar karbon diaktifkan dengan tujuan yang tertentu. Mohd. Zobir *et al.* (2001) telah melaporkan bahawa bagi zat penjerap kaolin-karbon dengan rawatan asid sulfurik, jumlah luas permukaannya akan meningkat manakala luas permukaan mikroliangnya pula akan menyusut. Park *et al.* (2004) pula melaporkan bahawa gentian karbon diaktifkan dengan rawatan asid nitrik mempunyai luas permukaan spesifik yang kurang sebabkan oleh kesan pelebaran mikroliang hasil daripada tindakan asid tersebut

Hasil daripada proses pengkarbonan sahaja biasanya memberi suatu bahan yang kurang aktif di mana permukaan spesifiknya cuma berada di dalam lingkungan beberapa m^2/g sahaja. Proses pengaktifan kemudiannya akan memberikan suatu hasil aktif yang berliang tinggi. Peningkatan luas permukaan spesifik yang ketara ini secara langsung mengakibatkan peningkatan daya penjerapan yang agak menakjubkan. Namun, taburan serta isipadu bagi

setiap julat saiz liang amat peka kepada keadaan proses pirolisis peringkat awal dan langkah pengaktifan. Maka dengan menggunakan teknik-teknik yang khas, adalah mungkin untuk menghasilkan karbon diaktifkan yang berliang serta berpermukaan tinggi (Ruthven, 1984). Pelbagai teknologi serta kaedah penghasilan karbon diaktifkan secara komersial telah pun diamalkan oleh pengeluar karbon diaktifkan. Secara umumnya, kaedah-kaedah ini termasuk Relau Pengaktifan Kebendaliran Berterusan (Gambar Foto 1.2), Tanur Pengaktifan, Relau Bertingkat-tingkat, Relau Cerucuk, Tanur Berputar (Gambar Foto 1.3) dan lain-lain lagi (Yehaskel, 1978).



Gambar Foto 1.2 : Relau pengaktifan kebendaliran berterusan



Gambar Foto 1.3 : Tanur berputar bagi proses pengaktifan kimia

Pengeluar serbuk karbon diaktifkan yang terbesar di Asia Tenggara iaitu Syarikat Century Chemical Works Sendirian Berhad terletak di Seberang Prai, Malaysia. Kilang tersebut menggunakan teknologi Relau Pengaktifan Kebendaliran Berterusan. Di dalam projek ini, proses pengaktifan yang digunakan merupakan kaedah pengaktifan fizik dengan agen pengaktifan gas karbon dioksida (Zakaria, 1993; Duber *et al.*, 2002).

1.3.2.1 PROSES PENGAKTIFAN DENGAN KARBON DIOKSIDA

Bagi proses pengaktifan yang menggunakan agen pengaktifan gas CO₂ (Smíšek & Černý, 1970), kadar gasifikasi proses pengaktifan, v , adalah seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 1.1 di mana p_{CO_2} dan p_{CO} merupakan tekanan separa CO₂ dan CO manakala k_1 , k_2 dan k_3 masing-masing merupakan pemalar kadar yang ditentukan secara empirik.

$$v = \frac{k_1 p_{CO_2}}{1 + k_2 p_{CO} + k_3 p_{CO_2}} \quad (1.1)$$

Kadar tindak balas bagi proses ini boleh direncat oleh kehadiran gas CO serta H₂. Mekanisme tindak balas yang terlibat dapat ditunjukkan oleh 2 varian yang asas :

Bagi varian A :



Bagi varian B :



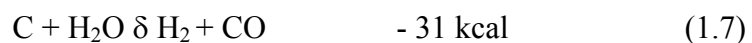
Perbezaan asas di antara kedua-dua skema ini adalah berlandaskan kepada kesan perencatan gas CO. Secara umumnya, kadar tindak balas bergantung kepada bilangan tapak aktif bebas. Bagi varian A, Persamaan 1.2 dianggap sebagai suatu tindak balas tidak berbalik dan kesan perencatan oleh CO adalah disebabkan oleh halangan serta liputannya pada tapak aktif (Smíšek & Černý, 1970).

Manakala bagi varian B pula, Persamaan 1.5 dianggap sebagai suatu tindak balas berbalik dan kesan akibat daripada CO adalah berpunca daripada sesaran keseimbangan mengikut tindak balas Persamaan 1.5 sedangkan tindak balas bagi Persamaan 1.6 dianggap amat perlahan (Smíšek & Černý, 1970). Daripada Persamaan 1.1, apabila hasil CO sangat rendah sehingga $k_2 p_{CO} \ll 1$, kinetik tindak balas boleh jadi bertertib satu ataupun sifar bergantung kepada kepekatan CO₂, $k_3 p_{CO_2}$, di mana ia boleh jadi sangat kurang ataupun sangat lebih daripada nilai satu (Ergun & Mentser, 1996).

Proses pengaktifan dengan menggunakan gas CO₂ memerlukan suhu yang tinggi iaitu kira-kira 850~1100°C kerana ia melibatkan tindak balas yang kurang berhaba jika dibandingkan dengan tindak balas dengan menggunakan agen pengaktifan stim (Smíšek & Černý, 1970). Hu *et al.*(2003) telah melaporkan bahawa pengaktifan kimia yang dilakukan ke atas bahan lignoselulosa rawatan ZnCl₂ dengan agen pengaktifan gas CO₂ dapat memperbaiki kandungan mesoliang.

1.3.2.2 PROSES PENGAKTIFAN DENGAN STIM

Bagi proses pengaktifan yang menggunakan agen pengaktifan H₂O (Smíšek & Černý, 1970), tindak balas asas di antara karbon dengan wap air merupakan suatu tindak balas endotermik dan persamaan stoikiometriknya adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Persamaan 1.7. Tindak balas ini direncatkan oleh kehadiran gas H₂ manakala kehadiran gas CO pula mempunyai kesan yang tidak ketara langsung dan dianggap boleh diabaikan :



Kadar gasifikasi di antara karbon dengan campuran H₂O dan H₂ adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Persamaan 1.8 di mana $p_{\text{H}_2\text{O}}$ dan p_{H_2} merupakan tekanan separa wap air dan hidrogen manakala k_1 , k_2 dan k_3 masing-masing merupakan pemalar kadar empirik (Smíšek & Černý, 1970) :

$$v = \frac{k_1 p_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + k_2 p_{\text{H}_2} + k_3 p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1.8)$$

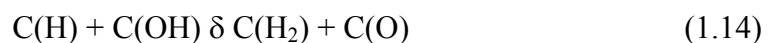
Tindak balas di antara karbon dengan stim boleh dianggap sebagai mengikuti Persamaan 1.9 ke 1.11 :



Kesan perencatan gas hidrogen adalah berpunca daripada liputan molekulnya pada tapak aktif penyerapan seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 1.12.



Long dan Sykes (Smíšek & Černý, 1970) telah membuat anggapan bahawa langkah pertama bagi tindak balas pengaktifan yang menggunakan agen pengaktifan stim melibatkan penceraian molekul air yang terjerap pada permukaan karbon mengikuti skema yang ditunjukkan dalam Persamaan 1.13 ke 1.14 :



Molekul gas H_2 dan O_2 akan terjerap secara bersebelahan pada tapak aktif dan penyerapan ini meliputi lebih kurang 2% daripada luas permukaan. Tindak balas di antara karbon dengan wap air (Persamaan 1.15) diiringi oleh tindak balas sekunder di antara wap air dengan gas yang terbentuk dan tindak balas ini dimangkinkan oleh permukaan karbon.