

**KESAN FAKTOR-FAKTOR PEMULPAAN KRAFT KE ATAS
SIFAT-SIFAT PULPA DAN KERTAS *ACACIA MANGIUM*
BERPANDUKAN KAEDAH RESPON PERMUKAAN**

Oleh

MAZLAN BIN IBRAHIM

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

April 2002

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang maha pemurah lagi maha mengasihani. Alhamdulillah, syukur kepada Allah kerana memberikan pengarang kekuatan dan keazaman untuk menyiapkan penyelidikan ini.

Pengarang mengucapkan sepenuh penghargaan kepada penyelia utamanya, Prof. Madya Dr. Wan Rosli Bin Wan Daud dan penyelia bersama, Dr. Rushdan Bin Ibrahim yang telah banyak memberikan panduan, dorongan, kritikan membina, cadangan dan nasihat kepada beliau sepanjang penyelidikan ini.

Semasa menjalankan penyelidikan ini, pengarang mengucapkan berbilang-banyak terima kasih kepada Encik Azhar, Puan Hasni, Encik Maarof, Encik Zamhari, Encik Azizan, Encik Abu Mangsor dan Encik Idris kerana memberikan segala bantuan dan kerjasama yang padu sama ada di dalam atau di luar makmal. Kepada Encik Khairul, Encik Luqman, Encik Mohd Jani dan Cik Leh Cheu Peng, segala pertolongan, persahabatan dan kemesraan yang dihulurkan amat dihargai. Kerjasama dan kemudahan yang disediakan oleh FRIM turut disanjung.

Terima kasih kepada Pusat Pengajian Teknologi Industri dan Institut Pengajian Siswazah di atas segala kemudahan dan peralatan yang disediakan. Pengarang turut mengucapkan jutaan terima kasih kepada Universiti Sains Malaysia yang telah menjadi penaja sepanjang tempoh pengajian peringkat ijazah lanjutan ini.

Pengarang turut berkongsi “kemanisan” hasil penyelidikan ini bersama kedua ibubapa; Hj. Ibrahim Bin Hj. Muhamad dan Hjh. Mazinah Bt. Hj. Ismail serta isteri tercinta; Zahanim Bt. Hj. Zakaria dan anak-anak beliau yang disayangi; Nadhrah, Muhammad Affan dan Muhammad Haziq. Kehadiran mereka adalah pelengkap kehidupan hambaMu. Amin.

KANDUNGAN

PENGHARGAAN	ii
KANDUNGAN	iii
SENARAI RAJAH	vi
SENARAI JADUAL	xiii
SINGKATAN DAN SIMBOL	xiv
ISTILAH	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
1.0 PENGENALAN	1
1.1 Perkaitan Antara Kayu dan Kertas	1
1.2 Justifikasi	2
1.3 Objektif Penyelidikan	5
2.0 TINJAUAN LITERATUR	6
2.1 Status Industri Kertas Di Malaysia	6
2.2 Kertas, Pulpa Dan Gentian	7
2.3 Kayu	9
2.3.1 Kayu lembut	11
2.3.2 Kayu keras	12
2.4 Sel-Sel Gentian Kayu	12
2.4.1 Trakeid	16
2.4.2 Fiber	17
2.4.3 Salur	17
2.4.4 Parenkima	18
2.5 Kimia Kayu	19
2.5.1 Selulosa	19
2.5.2 Hemiselulosa	20
2.5.2.1 <i>Xilan</i>	24
2.5.2.2 <i>Manan</i>	27
2.5.3 Lignin	27
2.5.4 Ekstraktif	31
2.5.5 Kompleks Lignin-Karbohidrat	31
2.6 Ultra Struktur Gentian Kayu	33
2.7 Spesis <i>Acacia mangium</i>	42
2.7.1 Taburan Semulajadi Dan Ekologi	43
2.7.2 Morfologi	46
2.7.3 Sifat-Sifat Fizikal Dan Kimia <i>Acacia mangium</i>	46

2.7.4	Perkembangan Penanaman <i>Acacia mangium</i> Di Malaysia	51
2.7.5	Kegunaan <i>Acacia mangium</i>	52
2.8	Pemulpaan	53
2.8.1	Pemulpaan Kimia	53
2.8.1.1	<i>Pemulpaan Soda</i>	55
2.8.1.2	<i>Pemulpaan Kraft / Sulfat</i>	56
2.8.1.3	<i>Pemulpaan Sulfit</i>	61
2.8.2	Pemulpaan Mekanik	63
2.8.2.1	<i>Pemulpaan Kayu-Kisar Batu</i>	64
2.8.2.2	<i>Pemulpaan Penghalus Mekanik</i>	67
2.8.3	Pemulpaan Campuran	69
2.8.3.1	<i>Pemulpaan Semi-Kimia Sulfit Neutral</i>	69
2.8.3.2	<i>Pemulpaan Kimia-Mekanik</i>	71
2.8.3.3	<i>Pemulpaan Kimia-Termo-Mekanik</i>	71
2.9	Rekabentuk Eksperimen	71
2.10	Kaedah Respon Permukaan (<i>Response Surface Methodology</i>)	72
2.10.1	Pengenalan Asas Kaedah Respon Permukaan	73
2.10.2	Penggunaan Dan Analisis RSM	77
2.10.2.1	<i>Eksperimen Penskrinan</i>	80
2.10.2.2	<i>Kaedah Pendakian Tercuram</i>	84
2.10.2.3	<i>Pengoptimuman</i>	84
3.0	EKSPERIMEN	92
3.1	Penyediaan Sampel Kayu <i>Acacia mangium</i>	92
3.2	Penghasilan Dan Penskrinan Serpih	92
3.3	Bahan Kimia	99
3.4	Pemulpaan Kraft / Sulfat	100
3.4.1	Penghadaman Serpih	100
3.4.2	Penyepaian Serpih	104
3.4.3	Penskrinan Pulpa	107
3.5	Pemukulan	107
3.5.1	Penyepaian Pulpa	109
3.5.2	Pemukulan Pulpa	109
3.6	Pembuatan Kertas Makmal	111
3.6.1	Penyediaan Stok Pulpa	111
3.6.1.1	<i>Pulpa Terpukul</i>	111
3.6.1.2	<i>Pulpa Tidak Terpukul</i>	112
3.6.2	Penentuan Konsistensi	112
3.6.3	Pembuatan Kertas	113
3.7	Nombor Kappa	116
3.8	Kelikatan Pulpa	117
3.9	Pengujian Sifat-Sifat Kertas	119
3.9.1	Kegraman	119
3.9.2	Ketebalan	120
3.9.3	Pemotongan Kertas	120
3.9.4	Kekuatan Tensil	123
3.9.5	Kekuatan Pecahan	123
3.9.6	Kekuatan Koyakan	124

4.0	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	126
4.1	Sifat-Sifat Pulpa Kraft <i>Acacia mangium</i>	126
4.1.1	Analisis Data Sifat-Sifat Pulpa	128
4.1.1.1	<i>Analisis ANOVA</i>	128
4.1.1.2	<i>Diagnosis Plot Residu Student Sifat-Sifat Pulpa</i>	132
4.1.2	Kesan Faktor-Faktor Pemulpaan Ke Atas Sifat-Sifat Pulpa	136
4.1.2.1	<i>Kesan Ke Atas Hasil Keseluruhan</i>	136
4.1.2.2	<i>Kesan Ke Atas Hasil Penskrinan</i>	148
4.1.2.3	<i>Kesan Ke Atas Nombor Kappa</i>	175
4.1.2.4	<i>Perkaitan Antara Sifat-Sifat Pulpa</i>	185
4.1.2.5	<i>Pengoptimuman Hasil Penskrinan Dan Nombor Kappa</i>	194
4.2	Sifat-Sifat Kertas <i>Acacia mangium</i>	196
4.2.1	Analisis Data Sifat-Sifat Kertas	198
4.2.2	Kesan Faktor-Faktor Pemulpaan Ke Atas Sifat-Sifat Kertas	201
4.2.2.1	<i>Kesan Ke Atas Indeks Tensil</i>	201
4.2.2.2	<i>Kesan Ke Atas Indeks Pecahan</i>	213
4.2.2.3	<i>Kesan Ke Atas Indeks Koyakan</i>	222
4.2.2.4	<i>Pengoptimuman Indeks Tensil, Indeks Pecahan Dan Indeks Koyakan</i>	232
4.3	Perhubungan Sesama Sifat-Sifat Pulpa Dan Kertas <i>Acacia mangium</i>	233
4.3.1	Pengoptimuman Sifat-Sifat Pulpa Dan Kertas	240
4.4	Kesan Pemukulan Ke Atas Sifat-Sifat Kertas	242
5.0	KESIMPULAN DAN CADANGAN	263
5.1	Kesimpulan	263
5.2	Cadangan	270
RUJUKAN		271
LAMPIRAN		282
Lampiran A		282
Lampiran B		283
Lampiran C		284
Lampiran D		285
Lampiran E		288
Lampiran F		291
Lampiran G		294
Lampiran H		295
Lampiran I		296
Lampiran J		297
Lampiran K		300
Lampiran L		303

SENARAI RAJAH

Rajah 2.1	Ilustrasi keratan rentas batang pokok berkayu.	10
Rajah 2.2	Struktur anatomi kayu lembut.	13
Rajah 2.3	Struktur anatomi kayu keras.	14
Rajah 2.4	Struktur sel-sel gentian kayu: (A) Trakeid - (1) Pembesaran dari kawasan yang bertanda, (2) Trakeid kayu awal (bukan mengikut skala) dan (3) Trakeid kayu akhir (bukan mengikut skala). (B) Fiber - (4) Fiber trakeid (diperbesarkan) dan (5) Fiber librofon (diperbesarkan). (C) Salur. (D) Parenkima.	15
Rajah 2.5	Struktur gula β -D-Glukosa dan rantai selulosa dengan unit ulangan selubiosa.	21
Rajah 2.6	Ikatan-H intermolekul dan intramolekul bagi dua rantai selulosa yang bersebelahan.	22
Rajah 2.7	Struktur unit-unit gula hemiselulosa.	23
Rajah 2.8	Sebahagian susunan rantai O-acetil-4-O-metilglukuronoxilan (kayu keras).	25
Rajah 2.9	Sebahagian susunan rantai arabino-4-O-metilglukuronoxilan (kayu lembut).	26
Rajah 2.10	Struktur rantai O-acetil-4-O-galaktoglukomanan (kayu lembut) ...	28
Rajah 2.11	Struktur unit-unit asas lignin.	29
Rajah 2.12	Model struktur makromolekul lignin.	30
Rajah 2.13	Jenis-jenis ikatan lignin-karbohidrat yang dicadangkan.	32
Rajah 2.14	Ilustrasi susunan rantai-rantai selulosa yang menunjukkan kawasan amorfus dan kristal.	34
Rajah 2.15	Ilustrasi asas pembinaan gentian.	35
Rajah 2.16	Ilustrasi umum lapisan-lapisan dinding gentian.	37
Rajah 2.17	Susunan lapisan-lapisan dinding gentian menerusi mikroskop elektron.	38
Rajah 2.18	Ilustrasi orientasi mikrofibril-mikrofibril dalam lapisan dinding gentian.	39
Rajah 2.19	Plot mikrodensiometer menunjukkan perubahan kandungan lignin apabila merentasi kawasan yang bertanda dot pada dinding gentian	40
Rajah 2.20	Ilustrasi ketebalan relatif lapisan dinding gentian.	41
Rajah 2.21	Taburan <i>A. mangium</i> secara semulajadi.	44

Rajah 2.22	Bentuk daun <i>A. mangium</i>	47
Rajah 2.23	Pokok <i>A. mangium</i> di kawasan Byram, Nibong Tebal.	48
Rajah 2.24	Perbezaan warna kayu gubal dan teras <i>A. mangium</i>	50
Rajah 2.25	Carta aliran pemulpaan kraft.	58
Rajah 2.26	Plot sulfiditi menunjukkan hubungan antara alkali efektif dan alkali aktif.	60
Rajah 2.27	Carta aliran pemulpaan sulfit.	62
Rajah 2.28	Jenis-jenis pengisar untuk pemulpaan kayu-kisar batu.	65
Rajah 2.29	Komponen-komponen utama dalam pengisar.	66
Rajah 2.30	Disk peringkat pertama pemulpaan penghalus.	68
Rajah 2.31	Disk peringkat kedua pemulpaan penghalus.	70
Rajah 2.32	Model peringkat pertama.	75
Rajah 2.33	Model peringkat pertama berserta interaksi.	76
Rajah 2.34	Model peringkat kedua.	78
Rajah 2.35	Gambaran penggunaan RSM untuk mencapai tahap optimum sesuatu proses.	79
Rajah 2.36	Gambaran geometri rekabentuk faktorial 2^2	81
Rajah 2.37	Gambaran geometri rekabentuk faktorial 2^3	82
Rajah 2.38	Plot separuh normal.	83
Rajah 2.39	Gambaran kaedah pendakian tercuram untuk menghampiri titik optimum.	85
Rajah 2.40	Kedudukan titik-titik eksperimen CCD untuk $k = 2$	87
Rajah 2.41	Kedudukan titik-titik eksperimen CCD untuk $k = 3$	88
Rajah 2.42	Plot kebarangkalian normal melawan residu Student.	89
Rajah 2.43	Plot residu Student melawan jangkaan.	90
Rajah 2.44	Plot residu Student melawan nombor eksperimen.	91
Rajah 3.1	Ilustrasi pemotongan pokok <i>A. mangium</i>	93
Rajah 3.2	Ilustrasi pemisahan kulit daripada kayu bergergaji.	94
Rajah 3.3	Alat penyerpih kayu	95
Rajah 3.4	Alat penskrinan serpih.	97
Rajah 3.5	Stok serpih yang sedia digunakan untuk pemulpaan.	98
Rajah 3.6	Carta aliran pemulpaan kraft di dalam makmal.	102
Rajah 3.7	Alat Penghadam serpih.	103
Rajah 3.8	Alat penyepai serpih lembut.	105
Rajah 3.9	Alat penyukat kandungan lembapan.	106

Rajah 3.10	Alat penskrin pulpa.	108
Rajah 3.11	Alat penyepai pulpa.	110
Rajah 3.12	Mesin kertas separuh automatik.	115
Rajah 3.13	Alat pengukur ketebalan.	121
Rajah 3.14	Ilustrasi pemotongan kertas makmal.	122
Rajah 3.15	Alat pengujian kekuatan koyakan.	125
Rajah 4.1	Plot kebarangkalian normal melawan residu Student hasil keseluruhan.	133
Rajah 4.2	Plot residu Student melawan jangkaan hasil keseluruhan.	134
Rajah 4.3	Plot residu Student melawan nombor eksperimen hasil keseluruhan.	135
Rajah 4.4	Plot usikan hasil keseluruhan.	137
Rajah 4.5	Plot respon permukaan hasil keseluruhan dengan faktor AA dan T sebagai paksi. Aras faktor S ditetapkan pada 20.0% dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	139
Rajah 4.6	Plot respon permukaan hasil keseluruhan dengan faktor AA dan T sebagai paksi. Aras faktor S ditetapkan pada 25.0% dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	140
Rajah 4.7	Plot respon permukaan hasil keseluruhan dengan faktor AA dan T sebagai paksi. Aras faktor S ditetapkan pada 30.0% dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	141
Rajah 4.8	Plot respon permukaan hasil keseluruhan dengan faktor S dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 15.5% dan aras faktor T pada 165, 170 dan 175°C.	144
Rajah 4.9	Plot respon permukaan hasil keseluruhan dengan faktor S dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 18.0% dan aras faktor T pada 165, 170 dan 175°C.	145
Rajah 4.10	Plot respon permukaan hasil keseluruhan dengan faktor S dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 20.5% dan aras faktor T pada 165, 170 dan 175°C.	146
Rajah 4.11	Plot usikan hasil penskrinan.	149
Rajah 4.12	Plot respon permukaan hasil penskrinan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 165°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	150
Rajah 4.13	Plot respon permukaan hasil penskrinan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 170°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	151
Rajah 4.14	Plot respon permukaan hasil penskrinan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 175°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	152

Rajah 4.15	Plot respon permukaan hasil penskrinan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 15.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	155
Rajah 4.16	Plot respon permukaan hasil penskrinan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 18.0% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	156
Rajah 4.17	Plot respon permukaan hasil penskrinan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 20.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	157
Rajah 4.18	Mekanisma pemutusan beralkali ikatan α -aril eter pada unit lignin fenolik semasa pendeligninan.	158
Rajah 4.19	Mekanisma pemutusan sulfidolitik ikatan β -aril eter semasa pendeligninan.	160
Rajah 4.20	Mekanisma pemutusan ikatan β -aril eter pada unit lignin bukan fenolik semasa pendeligninan.	161
Rajah 4.21	Tapak pemutusan ikatan C-C yang mungkin berlaku semasa pendeligninan.	163
Rajah 4.22	Tindak balas pengupasan karbohidrat.	165
Rajah 4.23	Pemutusan rantai karbohidrat akibat hidrolisis alkali.	166
Rajah 4.24	Tindak balas penamatan dalam degradasi karbohidrat.	168
Rajah 4.25	Kepilihan pendeligninan pemulpaan kraft, sulfit dan sulfit neutral.	170
Rajah 4.26	Plot usikan nombor Kappa.	176
Rajah 4.27	Plot respon permukaan nombor Kappa dengan faktor AA dan T sebagai paksi. Aras faktor S ditetapkan pada 20.0% dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	177
Rajah 4.28	Plot respon permukaan nombor Kappa dengan faktor AA dan T sebagai paksi. Aras faktor S ditetapkan pada 25.0% dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	178
Rajah 4.29	Plot respon permukaan nombor Kappa dengan faktor AA dan T sebagai paksi. Aras faktor S ditetapkan pada 30.0% dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	179
Rajah 4.30	Plot respon permukaan nombor Kappa dengan faktor S dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 15.5% dan aras faktor T pada 165, 170 dan 175°C.	181
Rajah 4.31	Plot respon permukaan nombor Kappa dengan faktor S dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 18.0% dan aras faktor T pada 165, 170 dan 175°C.	182
Rajah 4.32	Plot respon permukaan nombor Kappa dengan faktor S dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 20.5% dan aras faktor T pada 165, 170 dan 175°C.	183

Rajah 4.33	Plot kelikatan intrinsik melawan nombor Kappa bagi pemulpaan kraft.	186
Rajah 4.34	Perkaitan antara sifat-sifat pulpa kraft <i>A. mangium</i> berasaskan nombor Kappa.	187
Rajah 4.35	Pulpa yang dihasilkan pada keterukan tinggi (kod pemulpaan 1,1,1,1) dengan kombinasi aras faktor pemulpaan AA, S, T dan t masing-masing pada 20.5%, 30.0%, 175°C dan 135 minit.	189
Rajah 4.36	Pulpa yang dihasilkan pada keterukan rendah (kod pemulpaan -1,-1,-1,-1) dengan kombinasi aras faktor pemulpaan AA, S, T dan t masing-masing pada 15.5%, 20.0%, 165°C dan 105 minit.	191
Rajah 4.37	Kedudukan kombinasi aras faktor pemulpaan berasaskan kepada nilai nombor Kappa. Nombor-nombor dalam kurungan merupakan kod-kod pemulpaan yang boleh dirujuk kepada Jadual 4.1.	192
Rajah 4.38	Plot usikan indeks tensil.	202
Rajah 4.39	Plot usikan indeks pecahan.	203
Rajah 4.40	Plot usikan indeks koyakan.	204
Rajah 4.41	Plot respon permukaan indeks tensil dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 165°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	205
Rajah 4.42	Plot respon permukaan indeks tensil dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 170°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	206
Rajah 4.43	Plot respon permukaan indeks tensil dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 175°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	207
Rajah 4.44	Plot respon permukaan indeks tensil dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 15.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	210
Rajah 4.45	Plot respon permukaan indeks tensil dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 18.0% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	211
Rajah 4.46	Plot respon permukaan indeks tensil dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 20.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	212
Rajah 4.47	Plot respon permukaan indeks pecahan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 165°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	214
Rajah 4.48	Plot respon permukaan indeks pecahan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 170°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	215

Rajah 4.49	Plot respon permukaan indeks pecahan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 175°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	216
Rajah 4.50	Plot respon permukaan indeks pecahan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 15.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	218
Rajah 4.51	Plot respon permukaan indeks pecahan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 18.0% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	219
Rajah 4.52	Plot respon permukaan indeks pecahan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 20.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	220
Rajah 4.53	Plot respon permukaan indeks koyakan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 165°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	223
Rajah 4.54	Plot respon permukaan indeks koyakan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 170°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	224
Rajah 4.55	Plot respon permukaan indeks koyakan dengan faktor AA dan S sebagai paksi. Aras faktor T ditetapkan pada 175°C dan aras faktor t pada 105, 120 dan 135 minit.	225
Rajah 4.56	Plot respon permukaan indeks koyakan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 15.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	228
Rajah 4.57	Plot respon permukaan indeks koyakan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 18.0% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	229
Rajah 4.58	Plot respon permukaan indeks koyakan dengan faktor T dan t sebagai paksi. Aras faktor AA ditetapkan pada 20.5% dan aras faktor S pada 20.0, 25.0 dan 30.0%.	230
Rajah 4.59	Hubungan antara sifat-sifat pulpa dan kertas berasaskan kepada nombor Kappa.	235
Rajah 4.60	Plot indeks pecahan dan koyakan melawan indeks tensil untuk semua kombinasi aras faktor pemulpaan.	237
Rajah 4.61	Perubahan sifat-sifat kertas sepanjang julat hasil keseluruhan.	239
Rajah 4.62	Kesan pemukulan ke atas ketumpatan kertas.	244
Rajah 4.63	Hubungan antara kelikatan pulpa dengan nombor Kappa bagi tiga jenis pulpa yang dihasilkan pada tiga keterukan yang berbeza (tahap pemukulan 0 pusingan).	246
Rajah 4.64	Kesan pemukulan ke atas indeks tensil.	247

Rajah 4.65	Peningkatan peratus indeks tensil ketiga-tiga jenis pulpa pada setiap tahap pemukulan (berbanding indeks tensil pulpa tidak terpukul masing-masing.	250
Rajah 4.66	Kesan pemukulan ke atas indeks pecahan.	252
Rajah 4.67	Peningkatan peratus indeks pecahan ketiga-tiga jenis pulpa pada setiap tahap pemukulan (berbanding indeks pecahan pulpa tidak terpukul masing-masing.	254
Rajah 4.68	Kesan pemukulan ke atas indeks koyakan.	256
Rajah 4.69	Peningkatan peratus indeks koyakan ketiga-tiga jenis pulpa pada setiap tahap pemukulan (berbanding indeks koyakan pulpa tidak terpukul masing-masing.	257
Rajah 4.70	Kesan pemukulan ke atas indeks koyakan dan tensil.	260

SENARAI JADUAL

Jadual 2.1	Senarai kilang-kilang kertas di Malaysia sehingga tahun 2001.	8
Jadual 2.2	Fungsi sel-sel gentian kayu.	16
Jadual 2.3	Purata peratusan komposisi kimia di dalam kayu lembut dan kayu keras.	19
Jadual 2.4	Nama-nama tempatan spesis <i>A. mangium</i>	43
Jadual 2.5	Purata suhu dan hujan di kawasan semulajadi <i>A. mangium</i>	45
Jadual 2.6	Morfologi gentian <i>A. mangium</i>	49
Jadual 2.7	Purata komposisi kimia <i>A. mangium</i>	51
Jadual 2.8	Senarai jenis dan nama pemulpaan.	54
Jadual 2.9	Istilah-istilah utama pemulpaan kraft.	59
Jadual 3.1	Senarai kombinasi aras faktor pemulpaan kraft <i>A. mangium</i> berasaskan program CCD.	101
Jadual 4.1	Sifat-sifat pulpa bagi pemulpaan kraft <i>A. mangium</i>	127
Jadual 4.2	Analisis ANOVA sifat-sifat pulpa kraft <i>A. mangium</i>	129
Jadual 4.3	Kombinasi aras faktor pemulpaan pada titik maksimum dan minimum hasil keseluruhan bagi lapisan respon permukaan yang teratas.	142
Jadual 4.4	Kombinasi aras faktor pemulpaan pada titik maksimum dan minimum hasil penskrinan bagi lapisan respon permukaan yang teratas.	153
Jadual 4.5	Sifat-sifat pulpa yang dirujuk daripada penyelidik-penyelidik awal.	174
Jadual 4.6	Kombinasi aras faktor pemulpaan pada titik maksimum dan minimum nombor Kappa bagi lapisan respon permukaan yang terbawah.	180
Jadual 4.7	Pengoptimuman hasil penskrinan dan nombor Kappa.	194
Jadual 4.8	Pengoptimuman hasil penskrinan dalam julat nombor Kappa tertentu.	195
Jadual 4.9	Sifat-sifat kertas kraft <i>A. mangium</i>	197
Jadual 4.10	Analisis ANOVA sifat-sifat kertas kraft <i>A. mangium</i>	199
Jadual 4.11	Kombinasi aras faktor pemulpaan pada titik maksimum dan minimum indeks tensil bagi lapisan respon permukaan yang teratas.	208
Jadual 4.12	Kombinasi aras faktor pemulpaan pada titik maksimum dan minimum indeks pecahan bagi lapisan respon permukaan yang teratas.	221
Jadual 4.13	Kombinasi aras faktor pemulpaan pada titik maksimum dan minimum indeks koyakan bagi lapisan respon permukaan yang teratas.	226
Jadual 4.14	Pengoptimuman sifat-sifat kertas.	233
Jadual 4.15	Pengoptimuman sifat-sifat pulpa dan kertas.	241

SINGKATAN DAN SIMBOL

cm	sentimeter
mm	milimeter
μm	mikrometer
cm^2	sentimeter persegi
m^2	meter persegi
ml	mililiter
l	liter
g	gram
'	kaki
"	inci
%	peratus
$^{\circ}\text{C}$	darjah Celcius
RH	relatif humiditi
lk.	lebih kurang
>	lebih besar daripada
<	lebih kurang daripada
AA	alkali aktif
S	sulfiditi
T	suhu pemulpaan
t	masa pemulpaan
min.	minit
FRIM	Institut Penyelidikan Perhutanan Malaysia (Forest Research Institute of Malaysia)
L:W	nisbah berat larutan kepada kayu
dbh	diameter pada aras dada (<i>diameter breast height</i>)
lwn.	lawan
α	alfa
β	beta
N.m/g	Newton meter per gram
$\text{kPa.m}^2/\text{g}$	kiloPascal meter persegi per gram
$\text{mN.m}^2/\text{g}$	miliNewton meter persegi per gram

ISTILAH

analisis varians	analysis of variance, ANOVA
residu Student	Studentized residual
kaedah respon permukaan	response surface methodology, RSM
model berjujuk hasil tambah kuasa dua	sequential model sums of squares, SMSS
ujian ketidaksesuaian	lack of fits tests, LOF
statistik ringkasan model	model summary statistics, MSS
kebarangkalian F yang besar	probability of a larger F, Prob F
jangkaan residu hasil tambah kuasa dua	predicted residual sums of squares, PRESS
koefisien korelasi berganda	multiple correlation coefficient, R^2
plot usikan	perturbation plot
keterukan	severity
kepilihan pendeligninan	delignification selectivity
kumpulan hujung penurun	reducing end-group
darjah pempolimeran	degree of polymerization, DP
pendeligninan lanjutan	extended delignification
dilaminasi	delamination

ABSTRAK

Kesan faktor-faktor pemulpaan kraft ke atas sifat-sifat pulpa dan kertas daripada *Acacia mangium* telah dikaji dengan menggunakan kaedah respon permukaan berasaskan rekabentuk komposit berpusat. Alkali aktif (AA), sulfiditi (S), suhu pemulpaan (T) dan masa pemulpaan (t) merupakan faktor-faktor pemulpaan yang dikaji, dengan julat masing-masing di antara 15.5 - 20.5%, 20.0 - 30.0%, 165 - 175°C dan 105 - 135 minit. Keputusan sifat-sifat pulpa yang terdiri daripada hasil keseluruhan, hasil penskrinan dan nombor Kappa masing-masing didapati berada dalam julat 41.83 - 51.76%, 36.09 - 44.72% dan 11.3 - 47.6. Manakala sifat-sifat kertasnya seperti indeks tensil, indeks pecahan dan indeks koyakan pula, masing-masing ber julat 27.48 - 49.09 N.m/g, 3.50 - 5.10 kPa.m²/g dan 0.92 - 1.92 mN.m²/g. Keberkesanan keempat-empat faktor pemulpaan ke atas pemulpaan kraft *Acacia mangium* dapat difahami dengan lebih mudah berdasarkan model regresi yang diperolehi. Melalui pertalian matematik tersebut, pemulpaan yang optimum dijangkakan berlaku apabila faktor-faktor alkali aktif, sulfiditi, suhu pemulpaan dan masa pemulpaan masing-masing diselaraskan pada aras 18.8%, 24.8%, 165°C dan 135 minit. Penggunaan kombinasi aras faktor pemulpaan yang sederhana ini didapati boleh menghasilkan 46.42% hasil keseluruhan, 43.67% hasil penskrinan, 20.0 nilai nombor Kappa, 48.53 N.m/g indek tensil, 1.88 kPa.m²/g indeks pecahan dan 4.88 mN.m²/g indeks koyakan. Kajian kesan pemukulan ke atas pulpa didapati boleh meningkatkan indeks tensil, pecahan dan koyakan kertas.

ABSTRACT

THE EFFECT OF KRAFT PULPING FACTORS ON PULP AND PAPER PROPERTIES OF *ACACIA MANGIUM* USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Response surface methodology based on the central composite design was applied to determine the effect of kraft pulping factors on the properties of pulp and paper made from *Acacia mangium*. The independent variables investigated, with their respective range, were active alkali (AA), 15.5 - 20.5%, sulfidity (S), 20 - 30%, pulping temperature (T), 165 - 175°C and pulping time (t), 105 - 135 minutes. The results obtained for pulp properties as determined by total yield, screened yield and Kappa number were 41.83 - 51.76%, 36.09 - 44.72% and 11.3 - 47.6 respectively, whilst the paper properties as evaluated by tensile, burst and tear indices were 27.48 - 49.09 N.m/g, 3.5 - 5.1 kPa.m²/g and 0.92 - 1.92 mN.m²/g respectively. A second order polynomial regression model, using the four independent factors, was found to be appropriate for describing the kraft pulping of *Acacia mangium*. The optimum pulping conditions as determined from this derived mathematical relationships, were estimated at an active alkali of 18.8%, a sulfidity of 24.8%, a pulping temperature of 165°C and a pulping time of 135 minutes, which can be categorized as moderate pulping severity. The resulting pulp and paper has the following properties: total yield, 46.42%; screened yield, 43.67%; Kappa number, 20.0; tensile index, 48.53 N.m/g; burst index, 1.88 kPa.m²/g and tear index, 4.88 mN.m²/g. In addition, the effect of beating on paper properties were also studied and the results showed that the respective tensile, burst and tear indices increase with its intensity.

1.0 PENGENALAN

1.1 Perkaitan Antara Kayu Dan Kertas

Kayu dan kertas merupakan dua struktur atau objek yang lazimnya mempunyai perbezaan yang amat ketara sama ada dari segi rupa atau kegunaan. Kayu merupakan anugerah semulajadi yang diberikan Allah dalam bentuk pokok yang terdiri daripada berbagai-bagai spesis dan hidup berselerakan melitupi permukaan dunia ini. Bersandarkan kepada akal dan ilmu yang diberikanNya, manusia mula mencipta teknologi untuk mengubah sumber semulajadi tersebut menjadi objek yang berbagai-bagai bentuk untuk memenuhi keperluan masing-masing. Pada mulanya, kayu hanya digunakan dalam bentuk seadanya sebagai sumber bahan api, struktur binaan dan senjata. Selari dengan peredaran zaman, longgokan-longgokan kayu telah bertukar menjadi helaian kertas, tisu, bod dan pembungkus.

Kertas dihasilkan daripada jalinan gentian-gentian yang terikat antara satu sama lain oleh ikatan hidrogen (ikatan-H). Sebelum terhasilnya kertas, gumpalan-gumpalan gentian ini dikenali sebagai pulpa. Terdapat dua jenis pulpa yang digunakan di dalam industri kertas iaitu pulpa dara dan pulpa sekunder. Pulpa dara diperolehi daripada proses pemulpaan yang melibatkan pemisahan gentian tumbuhan secara mekanikal, kimia atau gabungan di antara kedua-duanya. Hanya sebahagian kecil sahaja yang melibatkan penggunaan tumbuhan tidak berkayu seperti jerami, buluh, esparto, jut dan hampas tebu. Pulpa sekunder atau pulpa terulang pula dihasilkan daripada kertas-kertas terbuang dan dikitar semula seperti surat khabar lama, majalah dan kotak.

Hampir keseluruhan kilang-kilang kertas di Malaysia menggunakan pulpa sekunder atau dicampurkan dengan pulpa dara yang diimport dalam menjalankan aktiviti mereka. Kebanyakannya menggunakan lk. 95% pulpa sekunder sebagai sumber utama pulpa mereka. Hanya sebuah kilang kertas sahaja di Malaysia yang membuat kertas menggunakan 100% pulpa dara yang dihasilkan sendiri daripada kayu-kayan tropika. Kilang tersebut ialah Sabah Forest Industries Sdn. Bhd. atau lebih dikenali sebagai SFI. Manakala Kimberly Clark Products (M) Sdn. Bhd. yang terletak di Johor menggunakan 80% pulpa dara yang diimport (Asia Paper Markets, 2001).

1.2 Justifikasi

Penggunaan dan pengeluaran kertas serta bod kertas di Malaysia pada tahun 1999 masing-masing sebanyak 2.371 dan 1.019 juta tan metrik. Pada tahun 2000 pula, penggunaannya telah menurun sedikit kepada 2.157 juta tan metrik tetapi pengeluarannya telah melonjak kepada 1.326 juta tan metrik (Asia Paper Markets, 2001). Penurunan penggunaan kertas dan bod kertas pada tahun 2000 mungkin disebabkan kesan kegawatan ekonomi yang melanda rantau Asia. Namun, nilai tersebut dijangka akan meningkat kembali apabila kegawatan ekonomi dapat ditangani. Berdasarkan kepada perangkaan di atas, hampir separuh penggunaan kertas dan bod kertas di Malaysia masih perlu diimport. Secara tidak langsung, banyak wang telah disalurkan ke luar negara untuk memenuhi permintaan pasaran kertas dan bod kertas.

Salah satu cara yang boleh dilakukan untuk mengurangkan kebergantungan import kertas ialah membuka lebih banyak kilang kertas di dalam negara. Adalah lebih baik jika kilang berkenaan dapat menghasilkan pulpa dan menggunakan bahan mentah yang terdapat di dalam negara seperti yang telah dilakukan oleh SFI. Pembukaan kilang

pulpa dan kertas yang baru akan dapat menjana ekonomi negara melalui peluang-peluang pekerjaan di kilang tersebut dan sektor-sektor yang berkait dengannya seperti pengangkutan, penyelidikan, pembalakan dan pembangunan kawasan sekitarnya.

Kebelakangan ini terdapat kecenderungan menggunakan kayu spesis ladang sebagai sumber menghasilkan pulpa. Ini kerana kayu spesis ladang boleh dituai (ditebang) dalam jangka masa yang pendek dan pengeluarannya juga boleh dirancang mengikut keperluan. Oleh itu, bekalan kayu bagi penghasilan pulpa akan lebih terjamin.

Antara kayu spesis ladang yang berpotensi adalah *Acacia mangium*. Ia difikirkan sesuai untuk diketengahkan kerana dapat tumbuh dengan senang dan cepat membesar. Malaysia dilihat tidak mempunyai masalah untuk membuka ladang-ladang kayu *A. mangium* kerana kerajaan telah memberikan sokongan yang padu melalui Program Pampasan Ladang Hutan (*Compensatory Forest Plantation Programme*, CFPP) yang telah bermula pada tahun 1982 (Thang, 1992).

Penyelidikan yang teliti perlu dijalankan untuk mengkaji kesesuaiannya sebagai bahan mentah untuk penghasilan pulpa dan kertas di Malaysia. Kajian kesesuaiannya boleh merangkumi pelbagai bidang seperti pengurusan ladang, genetik, tumbesaran, pemulpaan dan kualiti kertas. Hasil daripada beberapa penyelidikan yang lalu pernah menyimpulkan bahawa gentian *A. mangium* berpotensi dijadikan sebagai sumber bahan mentah untuk menghasilkan kertas (Alloysius, 1989; Balodis dan Clark, 1998; Law dan Wan Rosli, 1998; Logan dan Balodis, 1982; Rushdan, 1990; Udarbe, 1987). Berdasarkan kepada perkembangan industri kertas di Malaysia yang dijangka akan terus berkembang, pembukaan sebuah lagi kilang integrasi pulpa dan kertas pada masa hadapan mungkin akan berlaku. Begitu juga dengan potensi kayu *A. mangium* untuk digunakan sebagai bahan mentah utama.

Selain daripada bahan mentah, pemilihan proses pemulpaan yang sesuai perlu diambil kira. Proses pemulpaan kimia yang paling popular digunakan di seluruh dunia sehingga kini ialah pemulpaan kraft. Pemulpaan kraft menjadi pilihan dalam industri pemulpaan kerana ia dapat menghasilkan pulpa yang bergentian kuat. Selain daripada itu, ia juga sesuai digunakan untuk semua jenis kayu dan lebihan bahan kimia aktifnya boleh dikitar semula. Terdapat pelbagai faktor yang mempengaruhi pemulpaan kraft. Antaranya ialah spesis bahan mentah, saiz serpih, komposisi bahan kimia, suhu pemulpaan dan masa pemulpaan (Smook, 1992).

Faktor penting yang boleh dikawal semasa pemulpaan kraft ialah alkali aktif (AA), sulfiditi (S), suhu pemulpaan (T) dan masa pemulpaan (t). Perubahan dalam aras faktor-faktor berkenaan akan memberi kesan terhadap sifat-sifat pulpa seperti hasil keseluruhan, hasil penskrinan dan nombor Kappa. Sifat-sifat kertas seperti indeks tensil, indeks pecahan dan indeks koyakan juga akan dipengaruhi oleh perubahan aras faktor-faktor pemulpaan di atas.

Setiap hasil penyelidikan akan menjadi lebih bermakna jika data yang diperolehi dianalisis secara statistik. Menyedari akan hakikat ini, Kaedah respon permukaan (*Response surface methodology*) atau lebih dikenali sebagai RSM telah digunakan sebagai alat (*tool*) untuk membantu penyelidikan ini. Bantuan yang dimaksudkan ini merangkumi rekabentuk eksperimen, analisis data, pemilihan model dan pengoptimuman.

1.3 Objektif Penyelidikan

Tujuan penyelidikan ini adalah untuk mengkaji kesan faktor-faktor pemulpaan kraft ke atas sifat-sifat pulpa dan kertas yang dihasilkan daripada spesies *Acacia mangium*. Faktor-faktor pemulpaan kraft yang dipilih ialah alkali aktif (AA), sulfiditi (S), suhu pemulpaan (T) dan masa pemulpaan (t). Kesan utama yang dikaji ke atas sifat-sifat pulpa ialah hasil keseluruhan, hasil penskrinan dan nombor Kappa. Manakala untuk sifat-sifat kertas pula, kesan utama yang dikaji ialah indeks tensil, indeks pecahan dan indeks koyakan. Tujuan penyelidikan ini boleh dicapai menerusi objektif-objektif khusus seperti berikut:

- i. Membina model sifat-sifat pulpa dan kertas berasaskan faktor-faktor pemulpaan kraft *A. mangium* menggunakan Kaedah respon permukaan (*Response surface methodology*, RSM).
- ii. Mengkaji kesan faktor-faktor pemulpaan ke atas sifat-sifat pulpa kraft *A. mangium* dan merumuskan kombinasi aras faktor pemulpaan yang sesuai untuk setiap sifat pulpa.
- iii. Mengkaji kesan faktor-faktor pemulpaan ke atas sifat-sifat kertas kraft *A. mangium* dan merumuskan kombinasi aras faktor pemulpaan yang sesuai untuk setiap sifat kertas.
- iv. Mencari kombinasi aras faktor pemulpaan yang optimum untuk mendapatkan sifat-sifat pulpa dan kertas kraft *A. mangium* yang optimum dengan bantuan RSM.
- v. Mengkaji kesan pemukulan ke atas sifat-sifat kertas kraft *A. mangium*.

2.0 TINJAUAN LITERATUR

2.1 Status Industri Kertas Di Malaysia

Secara sedar atau tidak sedar, manusia tidak boleh mengelak daripada menggunakan kertas atau produk kertas di dalam menjalani kehidupan seharian. Pada peringkat awal, kertas dihasilkan untuk tujuan penulisan dan lukisan. Namun, perubahan masa dan teknologi turut memperkembangkan kegunaannya. Kini, penggunaan kertas atau produk berasaskan kertas digunakan secara meluas di dalam urusan seharian manusia. Contohnya dalam bidang percetakan, hiasan dalaman, kesihatan, pembungkusan dan produk berstruktur.

Walaupun menghadapi saingan daripada produk yang dihasilkan daripada sintesis polimer seperti plastik dan peningkatan penggunaan media elektronik, penggunaan kertas dan produk kertas dijangka terus meningkat dengan penghasilan produk baru yang khusus untuk digunakan selari dengan perkembangan teknologi semasa. Dengan peningkatan kesedaran orang ramai terhadap konsep kitar semula dan *biodegradable*, kertas dan produk kertas akan terus menjadi pilihan kerana sifatnya yang mesra alam.

Menurut Peel (1959), pada tahun 1891, satu cadangan membuka sebuah kilang pulpa telah diutarakan. Sultan Johor pada masa itu telah bersetuju menyerahkan konsesi memotong lalang dan buluh untuk tujuan tersebut. Walaupun cadangan itu tidak menjadi kenyataan, ia merupakan titik mula industri kertas di Malaysia. Susulan daripada itu, banyak bahan-bahan mentah tempatan telah di bawa ke Britain untuk kajian kesesuaiannya sebagai pulpa dan kertas. Kewujudan sebuah kilang kertas yang pertama di Malaysia telah dicatatkan pada tahun 1964 (Peh *et al.*, 1986).

Penggunaan kertas di Malaysia adalah tinggi berbanding dengan pengeluarannya. Statistik tahun 1993 menunjukkan penggunaan kertas perkapita Malaysia ialah 35.57 kg, manakala penggunaan kertas perkapita pada tahun 2000 telah meningkat ke 98 kg (Asia Paper Markets, 2001). Kajian oleh Lai (1994) mencatatkan jumlah kilang kertas yang beroperasi di seluruh Malaysia sehingga tahun 1994 ialah 19 buah sahaja. Pada tahun 2001, jumlahnya telah bertambah menjadi 21 buah (Asia Paper Markets, 2001). Senarai nama kilang-kilang tersebut dinyatakan dalam Jadual 2.1.

2.2 Kertas, Pulpa Dan Gentian

Perkataan “kertas” yang digunakan di dalam Bahasa Malaysia adalah berasal dari perkataan Arab “qirtas” (Azami, 1978). Manakala dalam Bahasa Inggeris, perkataan “paper” adalah berasal dari perkataan Latin “papyrus”. Ianya merujuk kepada kepingan papirus yang berasal dari tumbuhan *Cyperus papyrus*. Kepingan papirus ini telah digunakan semenjak tamadun Mesir sebagai media penulisan dan penyampaian maklumat kira-kira 3 000 tahun sebelum masihi (Microsoft Corporation, 1996).

Kertas didefinisikan sebagai helaian yang terhasil daripada jalinan gentian-gentian yang terikat di antara satu sama lain di atas permukaan skrin halus selepas penyingkiran air. Teknologi industri kertas terkini memasukkan juga bahan-bahan aditif lain sebagai tambahan (Smook, 1992).

Pulpa ialah bahan bergentian yang digunakan untuk menghasilkan kertas. Pulpa dihasilkan melalui proses pemulpaan daripada bahan berkayu atau tidak berkayu secara kimia, mekanik, termal atau gabungan diantaranya (Smook, 1992). Lazimnya, pulpa dihasilkan daripada tumbuhan berkayu iaitu merangkumi 94% penggunaan pulpa dara di dunia (Cathrie dan Guest, 1991).

Jadual 2.1 Senarai kilang-kilang kertas di Malaysia sehingga tahun 2001. (Lai, 1994; Asia Paper Markets, 2001).

Bil.	Syarikat	Tempat	Jenis produk kertas	Pengeluaran tahunan (tm)
1 *	Cita Peauchoon Paper Mills S/B	Sg. Petani, Kedah	Kraft, medium gelugor, cipbod, jos	22 000
2 *	Genting Sanyen Industrial Paper S/B	Banting, Selangor	Kraft, medium gelugor	250 000
3 *	Muda Paper S/B	Kajang, Selangor	Kraft, medium gelugor	99 000
4 *	Nibong Tebal Paper Mills S/B	Nibong Tebal, Pulau Pinang	Tisu	12 000
5 *	North Malaya Mills S/B	Simpang Empat, Pulau Pinang	Kraft, medium gelugor, surat khabar, cetak	46 000
6 *	Pascorp Paper Industries S/B	Bentong, Pahang	Medium gelugor	50 000
7 *	Pembuatan Kertas (Perak) S/B	Chemor, Perak	Tisu, poster, pembalut	3 000
8 *	Sabah Forest Industries S/B	Sipitang, Sabah	Kraft, cetakan, bod kotak, tulis	165 000
9 *	Kimberly Clark Products (M) S/B	Kluang, Johor	Tisu, tuala dapur, napkin	36 000
10 *	See Hua Mills S/B	Kota Semarahan, Sarawak	Surat khabar, tisu, napkin	4 000
11 *	Taiping Paper Mills S/B	Taiping, Perak	Tisu	2 400
12 *	Theen Seng Paper Mfg S/B	Rasa, Selangor	Jos, kraft, manila, pembalut, tisu	7 500
13 *	Trio Paper Mills S/B	Simpang Empat, Pulau Pinang	Tisu, jos	6 000
14 *	Union Paper Industries S/B	Sg. Ara, Pulau Pinang	Tisu, jos, pembalut, kadbod	6 400
15 *	Union Paper Industries S/B	Bentong, Pahang	Tisu, jos, pembalut, kadbod	3 600
16 *	Yeong Chaur Shing Industry S/B	Mukim Krubang, Melaka	Tisu, poster, pembalut	3 600
17 *	Johnmewah Maju S./B	Johor	Kraft, medium gelugor, cipbod, jos	14 000
18 *	Hai Ming Paper Mills S/B	Kuching, Sarawak	-	-
19 *	Malaysia Newsprint Industries	Temerloh, Pahang	Surat khabar	250 000
20 #	United Paper Board S/B	Selangor	-	-
21 #	Lo Kok Paper S/B	Melaka	-	-

* Data daripada Lai

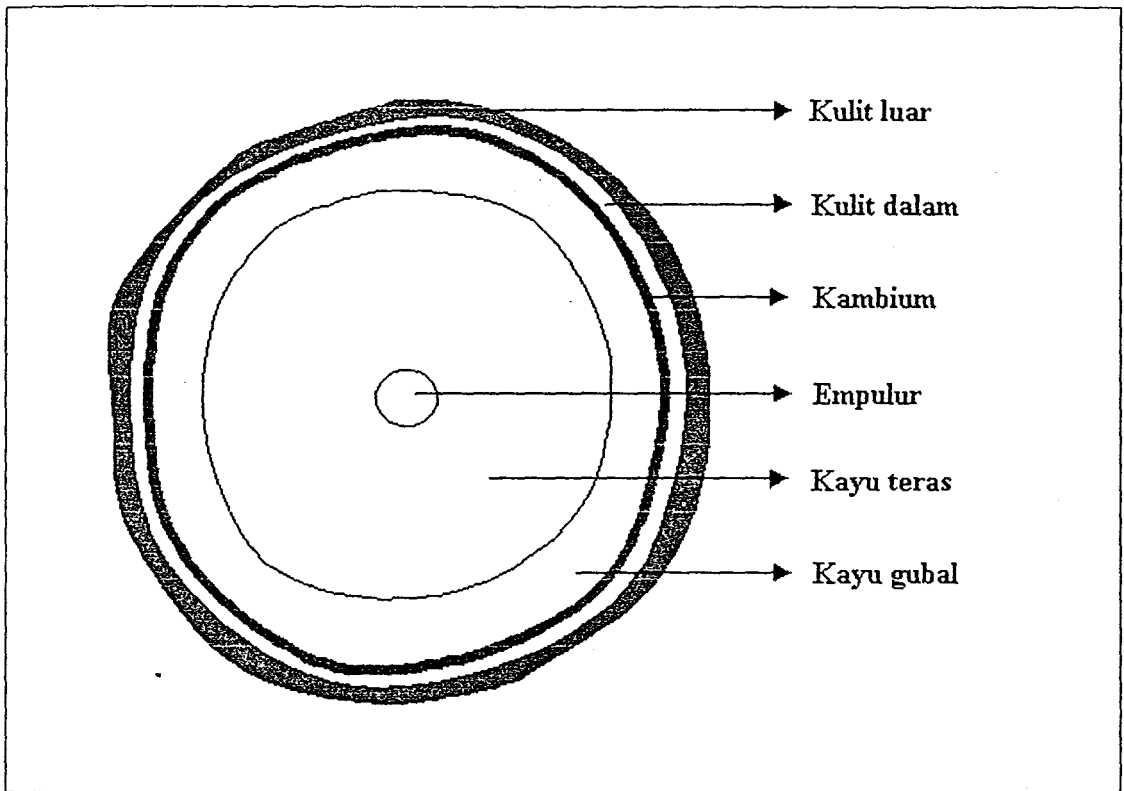
Data tambahan daripada Asia Paper Markets

Manakala gentian ialah sel tumbuhan berselulosa yang berbentuk tirus dan panjang (Dewan Bahasa Dan Pustaka, 1990). Gentian merupakan elemen yang terpenting dalam pembuatan kertas. Sifat-sifat fizikal seperti lebar, ketebalan dinding dan panjang gentian adalah kriteria asas dalam menentukan kesesuaian sesuatu gentian untuk digunakan dalam industri kertas.

2.3 Kayu

Kayu merupakan bahan bergentian yang terdapat pada batang, dahan dan akar tumbuhan berkayu. Rajah 2.1 menunjukkan ilustrasi keratan rentas batang pokok berkayu yang terdiri daripada kulit di bahagian paling luar, diikuti oleh kayu dan empulur. Kulit terbahagi kepada dua iaitu kulit dalam dan kulit luar. Kulit dalam merupakan sel-sel floem yang dihasilkan oleh kambium. Sel-sel ini berfungsi sebagai laluan makanan dan menghalang lembapan daripada keluar. Apabila sel-sel baru terbentuk, sel-sel terdahulu di dalam kulit dalam tertolak ke arah luar, berhenti berfungsi dan mati. Sel-sel mati tersebut seterusnya membentuk kulit luar. Kulit luar akan merekah dan luruh dengan meningkatnya umur pokok.

Selain daripada kulit, kambium juga bertanggungjawab membentuk bahagian kayu. Kambium menghasilkan sel-sel hidup yang dikenali sebagai xilem di bahagian kayu. Seterusnya sel-sel tersebut mula membentuk dimensi tertentu dan berfungsi sebagai pengangkut air dan mineral, stor penyimpanan makanan atau penyokong mekanikal. Apabila usia pokok bertambah, lapisan sel-sel baru terhasil berhampiran kambium dan menambahkan diameter pokok. Sel-sel lama dalam kayu gubal mula mati dan terbentuklah lapisan kayu teras. Oleh itu, kayu teras terdiri daripada sel-sel yang tidak aktif tetapi memberi kekuatan mekanikal kepada pokok. Selalunya kayu teras berwarna lebih gelap daripada kayu gubal kerana pertambahan bahan ekstraktif.



Rajah 2.1 Ilustrasi keratan rentas batang pokok berkayu.

Empulur merupakan tisu lembut parenkima yang terletak di tengah-tengah batang pokok. Jika dilihat dari pandangan keratan rentas batang pokok, empulur kayu keras terdiri daripada berbagai-bagai bentuk (bulat, segitiga, bintang dan bujur), warna dan struktur (padu, poros dan berlubang). Manakala empulur kayu lembut pula adalah seragam (Alvin De, 1964; Harlow dan Harrar, 1958).

Selalunya kayu diperhatikan dari tiga sudut permukaan yang berlainan. Permukaan-permukaan tersebut ialah rentas, jejari dan tangen. Perbezaan yang ketara dapat dilihat di antara ketiga-tiga permukaan tersebut dengan mata kasar. Melalui permukaan-permukaan tersebut juga, identiti sesuatu spesis dapat dikenal pasti berdasarkan sifat anatominya (selalunya dengan bantuan kanta atau mikroskop).

Secara amnya, kayu telah dikelaskan kepada dua jenis iaitu kayu lembut dan kayu keras. Walaupun begitu, nama-nama ini hanyalah sebagai satu pengkelasan sahaja dan bukan berkaitan dengan nilai kekerasan sebenar sesuatu kayu. Ada antara kayu lembut yang lebih keras daripada kayu keras dan sebaliknya. Terdapat antara 600 - 1 200 spesis kayu lembut dan 12 000 spesis kayu keras di dunia. Tumbesaran pokok berkayu di kawasan iklim sederhana begitu aktif pada musim bunga dan panas tetapi terbantut pada musim luruh dan sejuk. Tumbesaran di kawasan tropika pula, berlaku sepanjang tahun (Desch, 1981).

2.3.1 Kayu Lembut

Kayu lembut merupakan kayu yang berasal daripada pokok yang secara botaninya merupakan tumbuhan *gymnospermae* atau konifer yang majoritinya berbentuk kon. Selalunya ia berdaun tirus dan berdaun sepanjang tahun. Contohnya kayu pain dan sprus yang boleh diperolehi di kawasan beriklim sederhana. Manakala damar minyak dan podo pula adalah kayu lembut yang boleh didapati di kawasan

tropika seperti Malaysia. Struktur lazim anatomi kayu lembut dapat diperhatikan dalam Rajah 2.2. Gantian atau sel-sel utama dalam kayu lembut ialah trakeid dan parenkima.

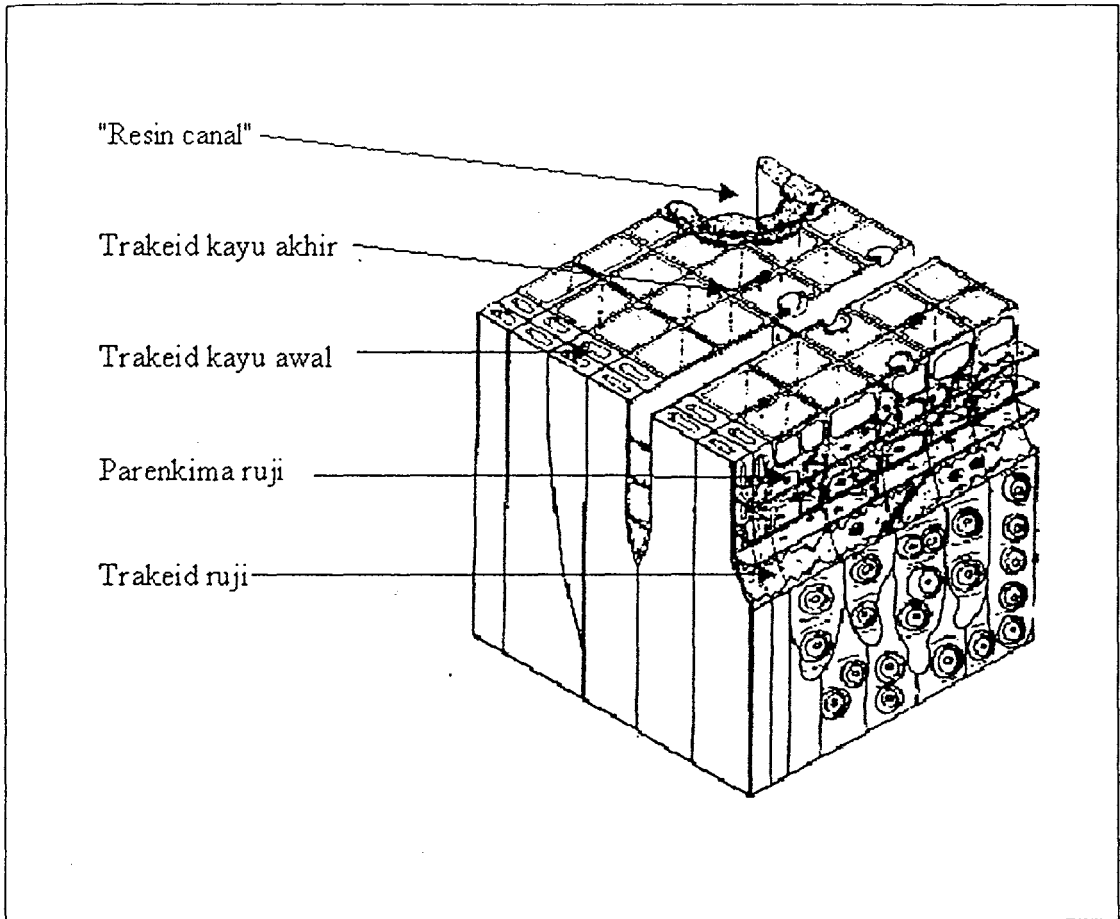
2.3.2 Kayu Keras

Kayu keras pula berasal daripada pokok yang secara botaninya merupakan tumbuhan *angiospermae* yang berbentuk rendang. Selalunya berdaun lebar dan gugur pada musim luruh dan sejuk. Contoh kayu keras di kawasan yang beriklim sederhana ialah kayu poplar dan ok. Kayu meranti dan kempas pula merupakan contoh yang terdapat di Malaysia. Kayu keras mempunyai struktur anatomi yang lebih kompleks daripada kayu lembut (Rajah 2.3). Gantian atau sel-sel utama dalam kayu keras ialah fiber, salur dan parenkima.

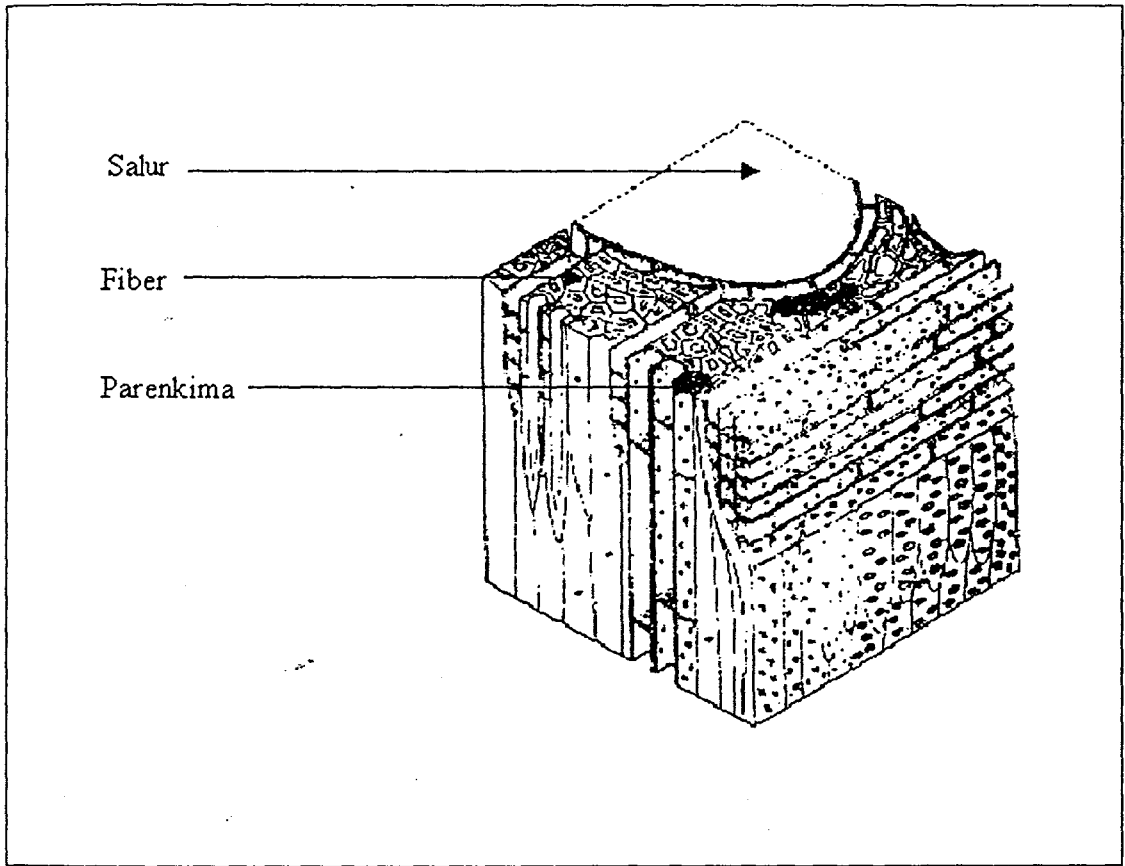
2.4 Sel-Sel Gantian Kayu

Gantian dalam penghasilan pulpa dan kertas adalah merujuk kepada semua jenis sel-sel kayu (kayu lembut atau kayu keras) seperti trakeid, fiber, salur dan parenkima (Tsoumis, 1991). Struktur fizikal dan kimia sel-sel gantian kayu akan dibincangkan dengan lebih mendalam kemudian.

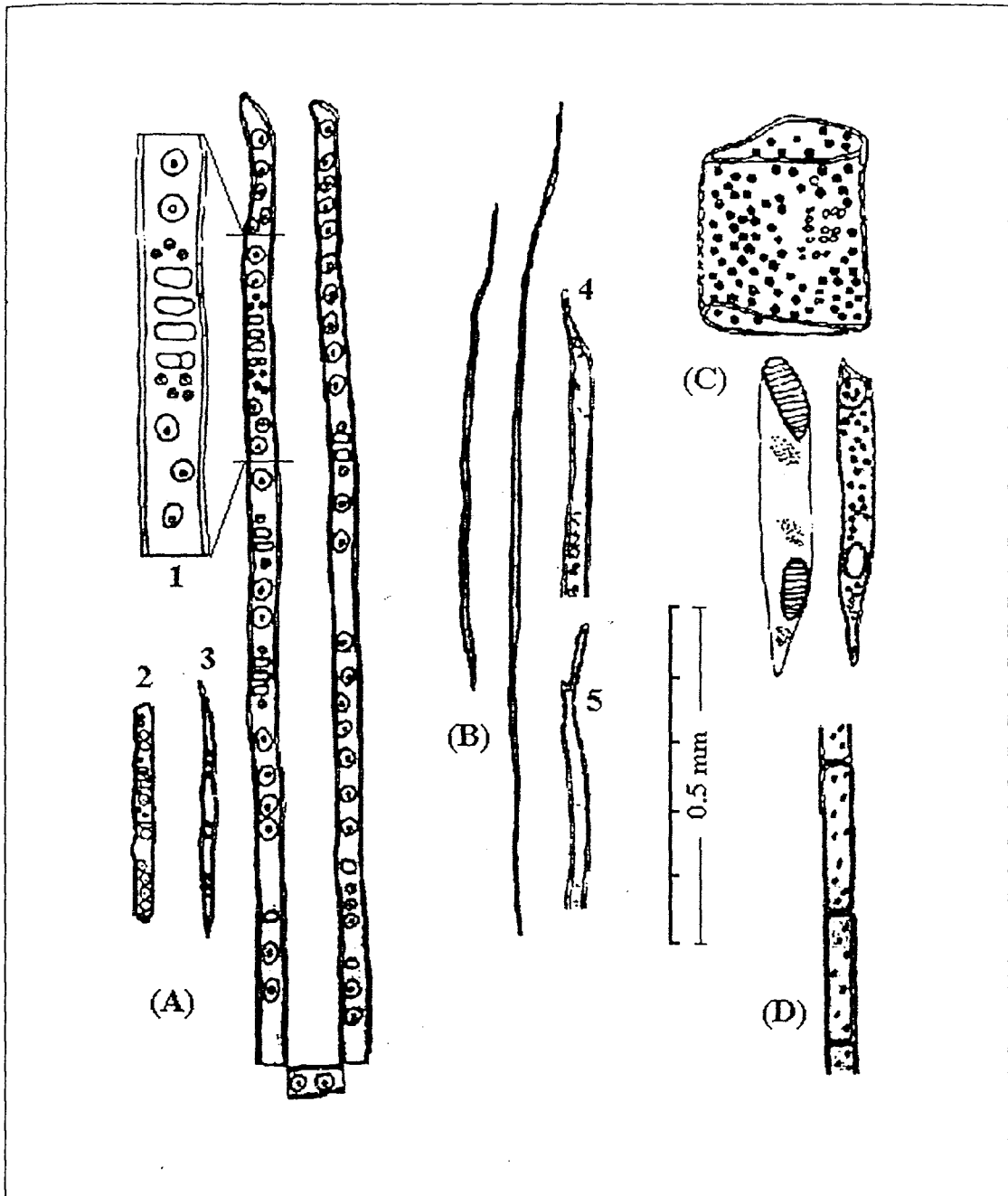
Bentuk dan susunan sel-sel gantian adalah berbeza-beza dan bergantung kepada kedudukannya di bahagian tertentu di dalam pokok. Terdapat empat jenis sel gantian utama yang kerap ditemui dalam kayu lembut dan keras iaitu trakeid, fiber, salur dan parenkima seperti yang dapat dilihat dalam Rajah 2.4. Semua sel-sel tersebut mempunyai lubang-lubang kecil yang dinamakan pit di dinding sel masing-masing. Jenis dan fungsi sel-sel berkenaan disenaraikan di dalam Jadual 2.2.



Rajah 2.2 Struktur anatomi kayu lembut (Smook, 1992).



Rajah 2.3 Struktur anatomi kayu keras (Smook, 1992).



Rajah 2.4 Struktur sel-sel gentian kayu (Tsoumis, 1991):

- (A) Trakeid - (1) Pembesaran dari kawasan yang bertanda, (2) Trakeid kayu awal (bukan mengikut skala) dan (3) Trakeid kayu akhir (bukan mengikut skala).
- (B) Fiber - (4) Fiber trakeid (diperbesarkan) dan (5) Fiber librofom (diperbesarkan).
- (C) Salur.
- (D) Parenkima.

Jadual 2.2 Fungsi sel-sel gentian kayu (Desh, 1981).

Pengkelasan kayu	Fungsi sel gentian		
	Penyokong	Pengangkut	Penyimpan (Stor)
Kayu lembut	Trakeid kayu awal	Trakeid kayu akhir Trakeid ruji	Parenkima Parenkima ruji
Kayu keras	Fiber trakeid Fiber librofom	Salur Salur trakeid	Parenkima Parenkima ruji

2.4.1 Trakeid

Lazimnya, sel trakeid hanya terdapat dalam kayu lembut sahaja. Kewujudannya dalam kayu keras hanya terdapat dalam beberapa spesis sahaja dan dikaitkan dengan elemen peralihan salur atau fiber. Kebanyakan sel trakeid berada dalam kedudukan menegak (trakeid kayu awal dan akhir) dan mewakili 90% daripada isipadu kayu lembut. Sel trakeid yang berkedudukan melintang pula dipanggil trakeid ruji. Secara lazimnya, trakeid adalah panjang, berongga dan berhujung tumpul serta tertutup (Rajah 2.4(A)). Purata panjang dan diameter trakeid adalah di antara 3 - 5 mm dan 15 - 80 μm (Panshin dan De Zeew, 1980).

Trakeid boleh berfungsi sebagai pengangkut (trakeid kayu awal dan ruji) dan penyokong (trakeid kayu akhir). Istilah trakeid kayu awal dan akhir merujuk kepada kedudukannya pada gelang tumbesaran. Trakeid kayu awal terbentuk di awal musim tumbesaran dengan bentuk antara bulat dan bersegi-segi (seakan-akan segiempat), ukuran lumen yang besar dan berdinding nipis. Apabila musim tumbesaran berubah ke akhir musim, sel yang dihasilkan berlumen kecil, berdinding tebal serta pit yang lebih

kecil dan sedikit berbanding dengan trakeid kayu awal. Trakeid ini dikenali sebagai trakeid kayu akhir dan saiznya adalah 10% lebih panjang daripada trakeid kayu awal (Spurr dan Hyvärinen, 1954; Dinwoodie, 1961).

Sejenis lagi sel trakeid ialah trakeid ruji. Jika trakeid awal dan akhir berada dalam kedudukan menegak, trakeid ruji pula berada dalam kedudukan melintang (bersudut tepat dengan trakeid kayu awal dan akhir, dan mengarah ke empulur). Trakeid ruji adalah lebih pendek dan ukuran panjangnya antara 0.1 - 0.2 mm.

2.4.2 Fiber

Sel fiber hanya terdapat di dalam kayu keras sahaja. Fungsi utamanya adalah sebagai penyokong untuk memberikan kekuatan mekanikal kepada pokok. Saiz sel fiber lebih pendek, halus dan hujungnya yang tertutup juga lebih tirus berbanding dengan sel trakeid (Rajah 2.4(B)). Purata panjang dan diameternya ialah antara 1 - 2 mm dan 0.1 - 0.5 μm (Panshin dan De Zeew, 1980). Peratusan isipadu fiber di dalam kayu keras adalah melebihi 50% (Gottwald, 1972).

Sel-sel fiber dikategorikan kepada dua jenis iaitu fiber trakeid dan librofom. Perbezaan ketara kedua-dua fiber tersebut berdasarkan kewujudan pit yang berlainan pada dindingnya. Fiber trakeid mempunyai pit sempadan, manakala fiber librofom mempunyai pit mudah. Fiber librofom juga lebih pendek, berlumen kecil dan boleh juga berfungsi sebagai pengangkut.

2.4.3 Salur

Seperti fiber, sel sel salur hanya terdapat dalam kayu keras sahaja. Fungsi utama salur ialah sebagai pengangkut. Ia berbentuk silinder dengan ukuran panjang antara

0.2 - 1.3 mm dan diameternya antara 5 - 500 μm (Panshin dan De Zeew, 1980). Hujung sel salur adalah terbuka dengan potongan lurus atau menyerong (Rajah 2.4(C)).

Di bahagian kayu teras, salur sudah tidak berfungsi sebagai pengangkut lagi. Fungsinya telah berubah sebagai stor dan dipenuhi oleh tailos (Esau, 1965). Tailos mengandungi protoplasma sel parenkima mati, resin, kanji, gam, kristal dan lain-lain. Kewujudan tailos juga boleh disebabkan oleh jangkitan virus dan kulat (Koran dan Côté, 1965).

2.4.4 Parenkima

Saiz sel-sel parenkima adalah lebih kecil berbanding dengan sel-sel yang telah dibincangkan sebelum ini atau bersamaan dengan saiz sel trakeid ruji (Rajah 2.4(D)). Purata panjangnya ialah antara 0.1 - 0.22 mm dan lebarnya pula antara 0.01 - 0.05 mm (Nyren dan Back, 1960; Panshin dan De Zeew, 1980). Fungsi utama sel parenkima adalah sebagai stor.

Sel parenkima banyak kelihatan dalam bentuk parenkima ruji. Kewujudan parenkima menegak di dalam kayu lembut boleh dikatakan tidak ada langsung atau amat sedikit. Kewujudan parenkima menegak dalam kayu keras adalah lebih jelas terutamanya berdekatan dengan salur atau "resin canal".

Bagi kayu keras, keseluruhan sel-sel melintang merupakan sel-sel parenkima ruji. Bagi kayu lembut, sel-sel melintang terdiri daripada campuran trakeid dan parenkima ruji. Kandungan parenkima ruji dalam kayu keras dan lembut masing-masing antara 5 - 30% dan 5 - 10% daripada keseluruhan isipadu kayu (Myer, 1922; Panshin dan De Zeew, 1980).

2.5 Kimia Kayu

Struktur kimia kayu boleh dibahagikan kepada empat komponen yang utama iaitu selulosa, hemiselulosa, lignin dan ekstraktif. Tiga komponen yang pertama bagi tumbuhan berkayu mempunyai berat molekul yang tinggi dan menyumbang kepada peratusan yang besar di dalam komposisi kimianya. Manakala ekstraktif hanya terdiri daripada molekul-molekul yang mempunyai berat molekul yang rendah dan peratusannya juga amat kecil. Peratusan am komposisi kimia di dalam tumbuhan berkayu disenaraikan di dalam Jadual 2.3.

Jadual 2.3 Purata peratusan komposisi kimia di dalam kayu lembut dan kayu keras (Thomas, 1977).

Komposisi kimia	Purata peratusan berat komposisi kimia, %	
	Kayu lembut	Kayu keras
Selulosa	42 ± 2	45 ± 2
Hemiselulosa	27 ± 2	30 ± 5
Lignin	28 ± 3	20 ± 4
Ekstraktif	3 ± 2	5 ± 3

2.5.1 Selulosa

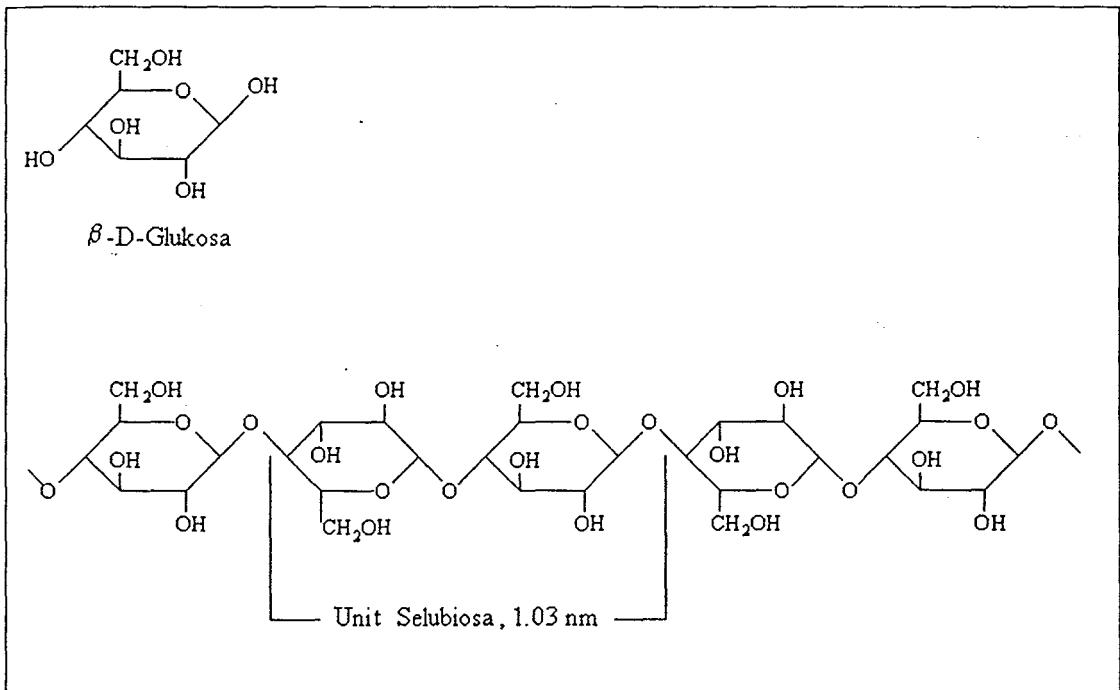
Kandungan selulosa dalam kayu biasanya di antara 40 - 47 % dan ia merupakan komponen yang paling utama dalam kayu. Selulosa merupakan struktur rantai homopolimer linear yang terhasil daripada gabungan unit-unit anhidroglukosa (β -D-glukosa) yang mempunyai formula molekul $C_6H_{12}O_6$. Penyambungan dua unit

gula berlaku di antara kumpulan hidroksil (kumpulan-OH) pada karbon 1 (C1) dengan kumpulan hidroksil pada karbon 4 (C4) unit gula bersebelahan dan menyingkirkan satu molekul air. Ikatan tersebut dikenali sebagai ikatan β -(1 \rightarrow 4) glikosidik. Walaupun begitu, unit ulangan dalam rantai selulosa adalah selubiosa yang terdiri daripada gabungan 2 unit anhidroglukosa sepanjang 1.03 nm (Rajah 2.5).

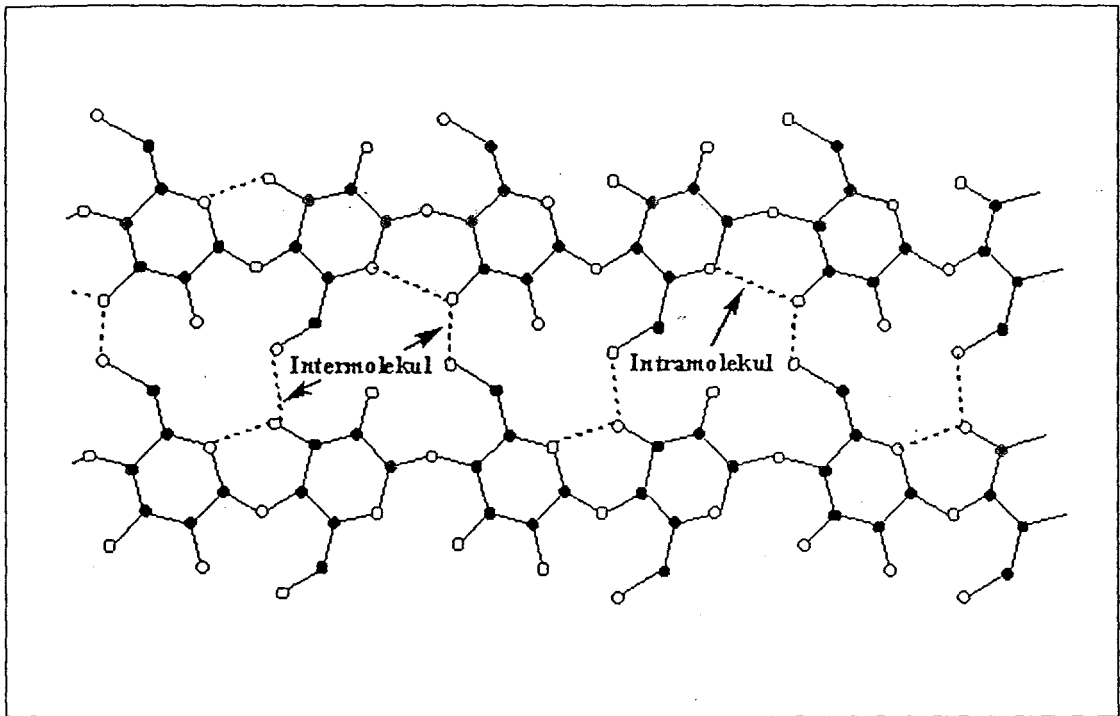
Darjah pemolimeran (DP) untuk selulosa tumbuhan berada dalam julat 7 000 - 15 000. Panjang rantai selulosa yang mempunyai DP 14 000 ialah 7.2 μ m (Fengel dan Wegener, 1989). Selulosa berkebolehan membentuk struktur molekul besar yang stabil seperti gentian kerana kewujudan kumpulan-OH. Kumpulan-OH tersebut berkeupayaan membentuk ikatan hidrogen (ikatan-H) di antara rantai-rantai selulosa bersebelahan (intermolekul) dan antara unit-unit gula dalam rantai selulosa yang sama (intramolekul) seperti yang dipaparkan dalam Rajah 2.6. Ikatan-H ini amat penting dalam bidang kertas kerana kekuatan ikatan antara gentian berkait rapat dengan sifat-sifat kertas.

2.5.2 Hemiselulosa

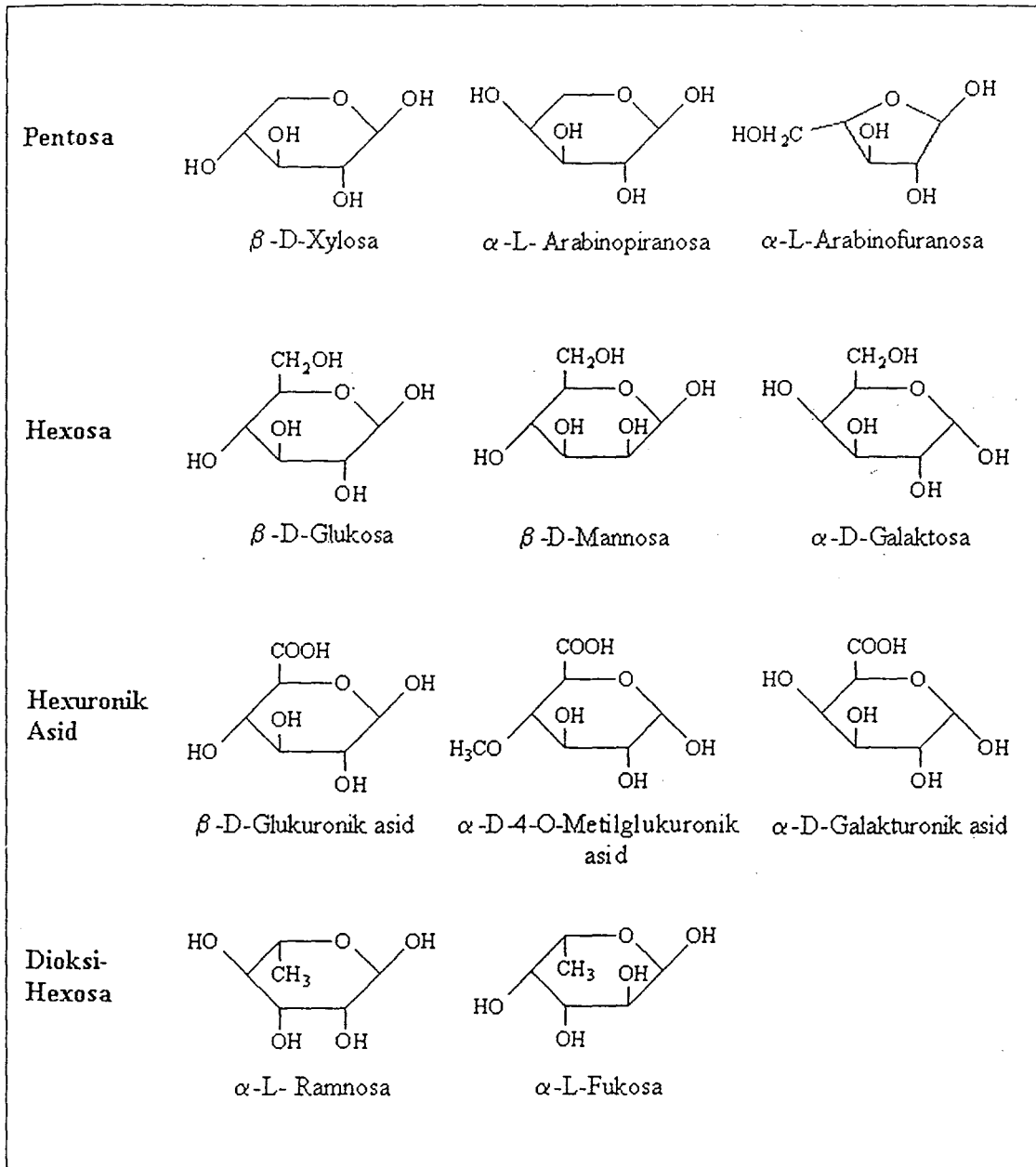
Seperti selulosa, hemiselulosa juga merupakan karbohidrat tetapi terhasil daripada campuran unit-unit gula yang mempunyai lima dan enam gelang (Rajah 2.7). Hemiselulosa mewakili antara 25 - 40% daripada berat kayu. Rantai-rantai hemiselulosa adalah lebih pendek daripada selulosa serta bercabang dan wujud dalam bentuk amorfus. Berdasarkan kepada urutan unit-unit gula yang tertentu sepanjang rantai utamanya, hemiselulosa boleh dikelaskan kepada beberapa jenis seperti xilan, manan, glukon, galaktan dan pektin. Xilan dan manan merupakan bentuk hemiselulosa yang paling banyak dan kerap didapati di dalam kayu.



Rajah 2.5 Struktur gula β -D-Glukosa dan rantai selulosa dengan unit ulangan selubiosa (Fengel dan Wegener, 1989).



Rajah 2.6 Ikatan-H intermolekul dan intramolekul bagi dua rantai selulosa yang bersebelahan (Fengel dan Wegener, 1989).



Rajah 2.7 Struktur unit-unit gula hemiselulosa (Fengel dan Wegener, 1989).

2.5.2.1 Xilan

Rantai xilan terdiri daripada deretan unit-unit xilosa (homopolimer) dengan ikatan β -(1 \rightarrow 4)-glikosidik dengan penambahan sisi unit 4-O-metilglukuronik asid dengan ikatan α -(1 \rightarrow 2)-glikosidik pada jarak-jarak tertentu di sepanjang rantai (Timell, 1964).

Bagi kayu keras, selalunya penambahan sisi atau cabang pendek ini berlaku dengan nisbah 10:1 (Xyl:Me-GluU) dan terdapat juga kes di mana sejumlah kecil unit-unit ramnosa dan galakturonik asid yang menyulami rantai induk xilan (Samuelson dan Wictorin, 1966; Shimizu dan Samuelson, 1973). Di samping itu, ada antara kumpulan hidroksil pada C2 dan C3 unit xilosa digantikan dengan kumpulan O-acetil. Oleh itu, xilan kayu keras dinamakan O-acetil-4-O-metilglukuronoxilan. (Rajah 2.8). Molekul ini didapati mempunyai dua ke tiga cabang sisi dengan DP antara 100 - 200.

Xilan kayu lembut agak berbeza daripada kayu keras dengan penambahan sisi unit arabinofuranosa pada rantai induk xilan dan pengurangan kumpulan O-acetil. Kebanyakan kayu lembut mempunyai nisbah Xyl:Me-GluU dan Xyl:Ara masing-masing ialah 5-6:1 dan 6-10:1 (Harwood, 1972). Oleh itu, ia dinamakan arabino-4-O-metilglukuronoxilan dengan dengan dua atau tiga cabang untuk setiap molekul. Molekul xilan kayu lembut ini lebih pendek daripada kayu keras dengan DP antara 70 - 130 (Rajah 2.9).