

COMMUNICATION II

Penggunaan Kaedah Dinamik Ultrasonik bagi Menentukan Pemalar Kenyal Kayu Tropika

Diterima 7 May 1994

ABSTRAK

Kertas ini melaporkan penentuan pemalar kenyal 56 spesis kayu-kayan tropika menggunakan teknik dinamik ultrasonik. Gelombang membujur (45 kHz) digunakan untuk mengukur halaju pada arah ketakisotropan jejarian (R), tangen (T) dan longitud (L) bagi setiap sampel kayu. Pemalar kenyal bagi setiap spesis kayu ditentukan dengan menggunakan nilai halaju ultrasonik dan ketumpatan menerusi persamaan Christoffel. Hasil kajian menunjukkan terdapat satu korelasi yang linear diantara pemalar kenyal dan ketumpatan kayu bagi arah L, R dan T. Perbandingan hasil pengukuran ultrasonik kepada hasil pengukuran statik menunjukkan teknik ultrasonik juga mampu digunakan untuk menilai kualiti sampel-sampel kayu tropika jenis sederhana dan keras.

ABSTRACT

This paper reports the determination of elastic constants for 56 tropical wood species using the dynamic ultrasonic technique. Longitudinal waves (45 kHz) were used to measure the velocity in the radial (R), tangential (T) and longitudinal (L) anisotropic directions of each sample of wood. The diagonal elastic constants of each species of wood studied were estimated using the values of ultrasonic wave velocities and their mean densities via the Christoffel equations. The results show that there is a linear correlation between the elastic constants in the L, R and T directions and density of wood. Comparison between the ultrasonic measurement and static measurement indicate that the ultrasonic measurement technique is also capable of assessing the quality of tropical medium and heavy hardwood.

PENGENALAN

Teknik ujian memusnah biasa diguna bagi mendapatkan sifat fizikal bahan yang boleh dikaitkan dengan kualiti kayu (Szymani and McDonald 1981; Bucur 1985). Kaedah yang berkesan, kos yang rendah dan kepentingan kajian merupakan faktor-faktor yang harus dipertimbangkan bagi mendapatkan hasil pengukuran yang memuaskan. Teknik ujian memusnah dikatakan kurang efektif kerana memerlukan banyak sampel kajian di samping kos penyelenggaraan yang tinggi dan hanya dapat dilakukan di makmal sahaja. Teknik ujian tak memusnah ultrasonik merupakan satu alternatif bagi tujuan pengujian, pemiawaian dan kawalan mutu kepada bahan kayu (Bucur 1983; Bucur 1985; Bucur and Rocaboy 1988). Teknik

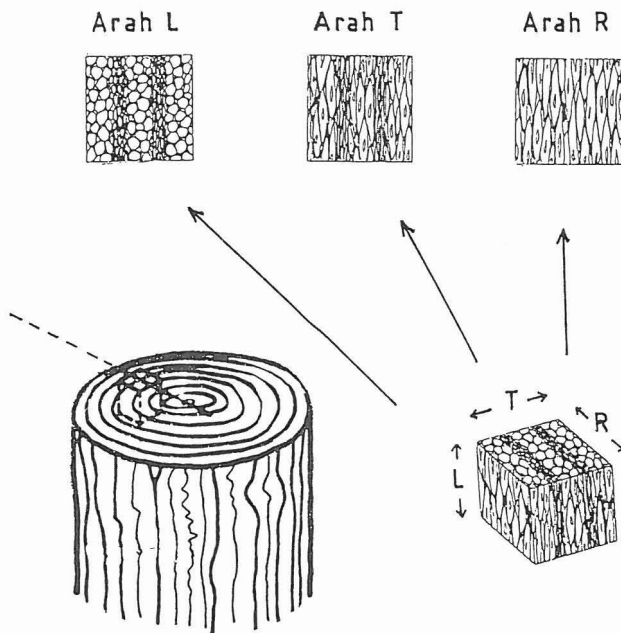
ini tidak memerlukan banyak sampel kerana sampel kajian tidak mengalami kemusnahan dan sampel yang sama dapat diuji semula bagi mendapatkan parameter fizik yang lain. Di samping itu ia berupaya untuk memberikan data-data fizik dalam masa yang singkat di makmal atau ujian secara *in situ*.

TEORI DAN TEKNIK PENGUKURAN

Kayu adalah bahan ortotropik kenyal dengan ciri kimia dan struktur binaannya yang kompleks serta berbeza pada arah longitud (L), tangen (T) dan jejarian (R) seperti yang ditunjukkan secara skematik pada *Rajah 1*. Kayu menunjukkan sifat kenyal dan berkemampuan mengatasi sebarang tegasan luar seperti ketumpatan dan ketegangan sehingga ke had kenyalnya; ia mematuhi hukum Hooke iaitu

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl}$$

dengan C_{ijkl} adalah pemalar kenyal bahan σ_{ij} dan e_{kl} masing-masing mewakili komponen tegasan dan terikan (Bucur 1983; Bucur 1985). Model ortotropik Cartesian digunakan bagi memudahkan kajian perambatan gelombang ultrasonik bagi mencirikan aspek-aspek kekenyalan bahan kayu. Data-data pemalar kenyal kayu ini sangat penting bagi menganggarkan atau menentukan pemalar-pemalar teknikal yang digunakan oleh jurutera bahan.



*Rajah 1. Arah rujukan bagi sampel kayu
Tatanda L mewakili longitud (arah pemanjangan), R
mewakili jejarian (arah pembesaran cecincin) dan T merujuk
kepada tangen terhadap arah pembesaran cecincin).*

Pemalar kenyal bagi komponen normal (diagonal) iaitu C_{LL} , C_{RR} dan C_{TT} bagi bahan kayu dapat diperolehi menerusi data masa perambatan halaju gelombang ultrasonik yang merambat dalam arah L, R dan T. Indeks pertama dan kedua masing-masing merujuk kepada arah perambatan gelombang ultrasonik dan arah sesaran zarah-zarah. Pemalar kenyal C_{ij} dapat dikaitkan dengan sebutan halaju gelombang ultrasonik V melalui persamaan berikut:

$$C_{ij} - \rho V^2 = 0$$

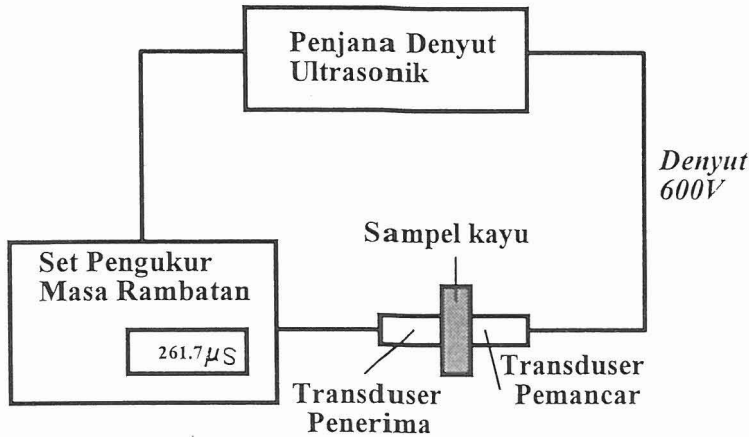
Persamaan ini sebenarnya merupakan hasil penyelesaian persamaan Christoffel (Bucur 1985; Sidek *et al.* 1990) iaitu

$$C_{ijkl} n_i n_j - \rho V^2 \delta_{ik} = 0$$

dengan $n_i n_j$ merujuk kepada arah perambatan gelombang, ρ adalah ketumpatan sampel kayu dan δ_{ik} adalah delta Kronecker yang bernilai 1 apabila nilai i bersamaan dengan nilai k .

Matlamat utama kajian ini adalah untuk menentukan pemalar-pemalar kenyal kayu tropika menggunakan kaedah dinamik ultrasonik. Konsep asas pengukuran adalah begitu mudah dengan gelombang ultrasonik 45 kHz yang dipancarkan menerusi transduser piezoelektrik ke dalam bahan kajian. Gelombang ini akan dikesan oleh alat pengesan gelombang ultrasonik yang juga diperbuat dari bahan piezoelektrik. Bagi bahan pepejal seperti kayu, di samping gelombang longitud (membujur), terdapat juga gelombang ricih (melintang) dan gelombang Rayleigh iaitu gelombang kenyal yang merambat pada permukaan bahan. Dalam kajian ini kaedah pemancaran terus digunakan bagi pengujian bahan kayu yang mempunyai struktur butiran kasar. Frekuensi 45 kHz digunakan supaya gelombang ultrasonik dengan jarak gelombang yang panjang mampu dirambatkan di dalam sampel dan dapat melalui halangan-halangan kecil. Alat ultrasonik BPV Steinkamp (buatan German) dengan operasinya berdasarkan kaedah pemancaran mampu mengukur masa perambatan gelombang ultrasonik sehingga $999.9 \mu s$ telah digunakan bagi mencirikan sifat kenyal kayu tropika. Rajah blok bagi keseluruhan set eksperimen ditunjukkan pada *Rajah 2*. Dua buah prob berbentuk kon dipilih disebabkan keadaan permukaan kayu yang kasar dan tidak sama rata jika ditinjau secara mikroskopik. Dengan mengetahui jarak dan masa perambatan gelombang yang merambat dalam kayu pada arah-arrah tertentu, maka nilai halaju gelombang ultrasonik diperolehi melalui sebutan V (=jarak/masa). Bagi setiap arah L, R dan T, lebih dari dua puluh nilai pengukuran halaju

dilakukan untuk setiap sampel kayu dan nilai purata halaju digunakan bagi mendapatkan nilai pemalar-pemalar kenyal.



Rajah 2. Rajah skema bagi peralatan ultrasonik BPV Steinkamp yang digunakan untuk mengukur masa perambatan gelombang ultrasonik dalam setiap sampel kayu tropika.

BAHAN KAJIAN

Sampel kayu tropika yang dikaji diperolehi dari Institut Penyelidikan Perhutanan Malaysia (FRIM) Kepong yang dikeringkan secara pendedahan pada udara. Kandungan kelembapan bagi sampel-sampel kayu ini dianggarkan antara 12-15%. Jadual 1 menyenaraikan sampel kayu tropika yang dikaji berdasarkan nama tempatan dan saintifik serta nilai ketumpatan purata setiap satunya. Sampel-sampel kayu tropika yang kering mempunyai dimensi 11 cm (panjang) x 7 cm (lebar) x 1 cm (tebal) (ralat pengukuran ± 0.01 cm) dan setiap satunya mempunyai arah longitud L, tangen T dan jejarian R yang merujuk kepada arah utama ketakisotropan kayu (lihat *Rajah 1*). Nilai pemalar kenyal normal kayu dapat ditentukan dari nilai ketumpatan dan halaju gelombang (V) ultrasonik melalui persamaan berikut

$$C_{LL} = \rho V_L^2, C_{RR} = \rho V_R^2, C_{TT} = \rho V_T^2$$

dengan indeks L, R dan T mewakili arah-arang paksi utama kayu iaitu longitud, jejarian dan tangen (*Rajah 1*).

JADUAL 1

Nama tempatan, spesies, nilai ketumpatan purata dan pemalar kenyal longitud bagi sampel kayu tropika yang dikaji menggunakan teknik dinamik ultrasonik (dalam unit 10^{10} N/m²)

Sampel	Nama Tempatan	Nama Saintifik	Ketumpatan (kgm ⁻³)	C _{LL}	C _{TT}	C _{RR}	C _{LL}
Kayu keras							
A1	Tembusu	<i>Fagraea fragrans</i>	800	1.47	0.20	0.23	1.40
A2	Merbau	<i>Intsia palembanica</i>	800	1.57	0.19	0.20	1.54
A3	Giam	<i>Hopea</i> spp.	975	1.67	0.21	0.24	1.65
A4	Balau merah	<i>Shorea</i> spp.	880	1.74	0.19	0.23	1.70
A5	Resak	<i>Vatica</i> spp.	945	1.88	0.18	0.24	1.81
A6	Kekatong	<i>Cynometra</i> spp.	975	1.87	0.22	0.24	1.84
A7	Chengal	<i>Neobalanocarpus heimii</i>	945	1.96	0.23	0.24	1.96
A8	Keranki	<i>Dialium</i> spp.	960	1.56	0.22	0.23	2.01
A9	Balau	<i>Shorea</i> spp.	975	1.73	0.21	0.23	2.01
A10	Bitis	<i>Madhuca utilis</i>	1105	2.19	0.24	0.26	2.38
A11	Bakau	<i>Rhizophora</i> spp.	1040	1.99	0.23	0.25	2.07
Kayu sederhana							
B1	Meransi	<i>Carallia</i> spp.	800	1.41	0.17	0.22	1.34
B2	Simpoh	<i>Dillenia</i> spp.	735	1.49	0.16	0.19	1.43
B3	Rengas	<i>Gluta</i> spp.	835	1.52	0.20	0.23	1.49
B4	Kulim	<i>Scorodocarpus</i>	835	1.51	0.19	0.22	1.49
B5	Punah	<i>Tetramesrista glabra</i>	720	1.54	0.17	0.19	1.54
B6	Merawan	<i>Hopea</i> spp.	690	1.62	0.19	0.23	1.55
B7	Keledang	<i>Artocarpus</i> spp.	800	1.57	0.16	0.21	1.55
B8	Mengkulang	<i>Heritiera</i> spp.	755	1.65	0.18	0.20	1.60
B9	Mata ulat	<i>Kokoona littoralis</i>	880	1.76	0.19	0.24	1.63
B10	Kasai	<i>Pometia</i> spp.	800	1.84	0.15	0.23	1.70
B11	Kelat	<i>Eugenia</i> spp.	800	1.77	0.17	0.23	1.76
B12	Tualang	<i>Koompassia excelsa</i>	835	1.81	0.17	0.20	1.78
B13	Merpauh	<i>Swietenia</i> spp.	755	1.87	0.15	0.19	1.81
B14	Kempas	<i>Koompassia</i>	880	1.90	0.19	0.24	1.86
B15	Kapur	<i>Dryobalanops</i> spp.	755	1.98	0.18	0.21	1.80
B16	Keruing	<i>Dipterocarpus</i>	880	2.01	0.19	0.23	2.23
Kayu lembut							
C1	Terentang	<i>Camposperma</i> spp.	435	1.09	0.17	0.18	0.70
C2	Jelutong	<i>Dyera costulata</i>	465	1.19	0.13	0.18	0.80
C3	Pulai	<i>Alstonia</i> spp.	465	1.39	0.14	0.20	0.71
C4	Sesendok	<i>Endospermum malaccensis</i>	530	1.40	0.16	0.19	0.85
C5	Melantai	<i>Hopea macroptera</i>	530	1.21	0.17	0.21	0.79
C6	Geronggang	<i>Cratoxylon</i>	545	1.25	0.20	0.22	0.80

(Jadual 1) sambungan

Sampel	Nama Tempatan	Nama Saintifik	Ketumpatan (kgm ⁻³)	C _{LL}	C _{TT}	C _{RR}	C _{LL}
C7	Meranti merah muda	<i>Shorea</i> spp.	545	1.40	0.21	0.24	1.94
C8	Petai	<i>Parkia</i> spp.	545	1.13	0.12	0.23	1.07
C9	Perupok	<i>Lophopetalum</i> spp.	560	1.38	0.20	0.22	1.26
C10	Machang	<i>Mangifera</i> spp.	560	1.45	0.18	0.21	1.43
C11	Kedondong	<i>Burseraceae</i>	575	1.45	0.13	0.24	1.29
C12	Terap	<i>Paratocarpus</i> spp.	575	1.34	0.16	0.22	1.20
C13	Panarahan	Myristicaceae	595	1.45	0.16	0.18	0.94
C14	Medang	Lauraceae	610	1.53	0.16	0.22	1.26
C15	Ramin	<i>Gonystylus bancanus</i>	625	1.46	0.17	0.23	1.64
C16	Kayu getah	<i>Hevea brasiliensis</i>	640	1.32	0.17	0.20	0.92
C17	Mersawa	<i>Anisoptera</i> spp.	640	1.37	0.18	0.21	1.26
C18	Melunak	<i>Pentace</i> spp.	655	1.31	0.18	0.20	1.20
C19	Meranti kuning	<i>Shorea</i> spp.	655	1.38	0.20	0.22	1.21
C20	Meranti putih	<i>Shorea</i> spp.	675	1.46	0.17	0.20	1.94
C21	Kungkur	<i>Pithecellobium</i> spp.	675	1.26	0.17	0.22	1.07
C22	Meranti bakau	<i>Shorea uliginosa</i>	675	1.50	0.16	0.18	1.47
C23	Sepetir	<i>Sindora</i> spp.	675	1.49	0.16	0.20	1.36
C24	Merawan	<i>Hopea</i> spp.	690	1.59	0.11	0.19	1.55
C25	Gerutu	<i>Parashorea lucida</i>	690	2.06	0.17	0.20	2.06
C26	Bintangor	<i>Calophyllum</i> spp.	690	1.84	0.19	0.22	1.43
C27	Durian	<i>Durio</i> spp.	690	1.62	0.18	0.21	1.58
C28	Kembang semangkok	<i>Scaphium</i> spp	705	1.64	0.20	0.22	1.70
C29	Meranti	<i>Shorea</i> spp.	705	1.54	0.21	0.24	1.39

Data pemalar kenyal C_{LL}* dilaporkan oleh (MTIB) Malaysia Timber Industry Board (1986).

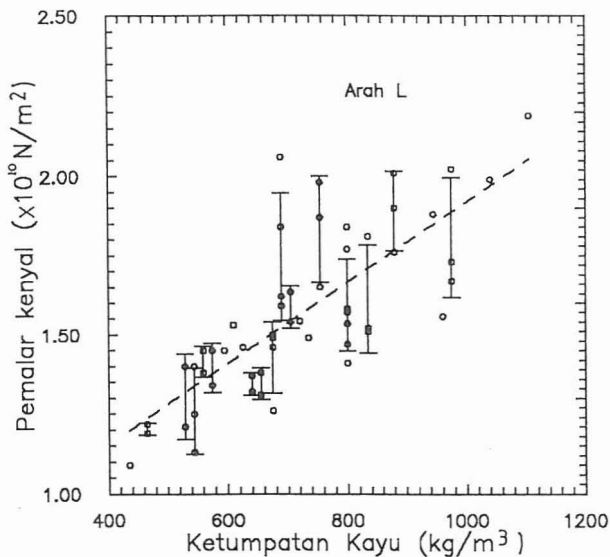
HASIL DAN PERBINCANGAN

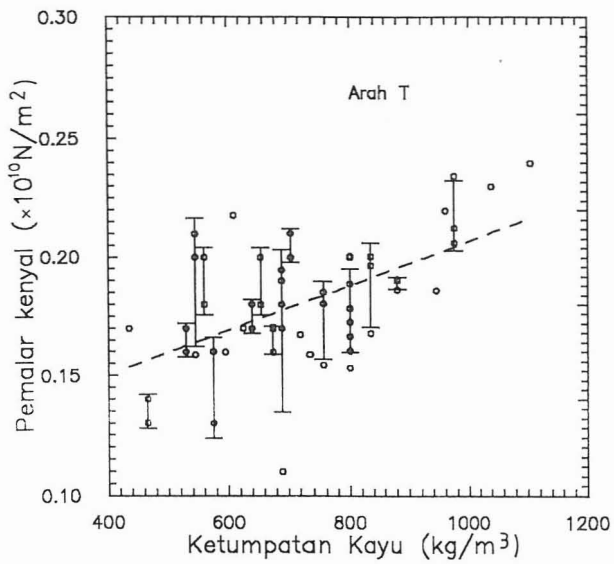
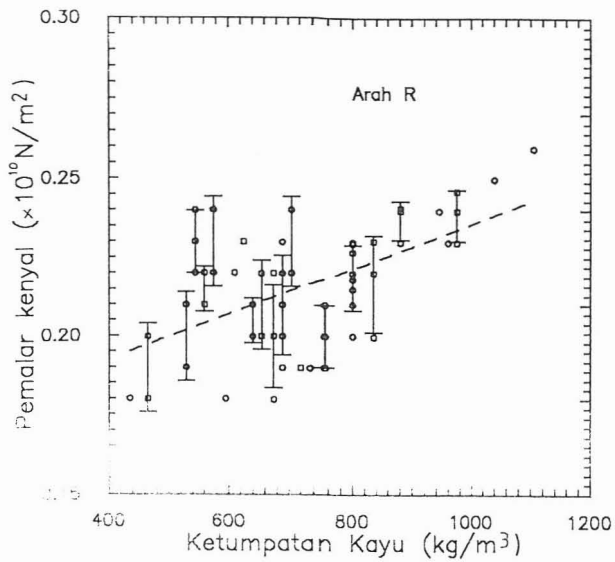
Perubahan nilai-nilai pemalar kenyal terhadap ketumpatan pada arah L, R dan T bagi sampel kayu tropika yang diukur pada suhu bilik ditunjukkan pada Rajah 3 (a)-(c) dan nilai puratanya dinyatakan dalam Jadual 1. Perbezaan nilai pemalar kenyal bagi satu spesis kayu dengan spesis yang lain adalah kerana kayu merupakan bahan yang bersifat tak homogen samaada pada jenis yang sama atau jenis yang berbeza. Struktur asas binaan kayu akan menentukan nilai ketumpatan dan sifat fizik kayu yang lain. Secara amnya struktur kayu keras terdiri dari bahan molekul makro

(40-45% hablur polimer alfa selulos, 15-35% hemiselulos dan 17-25% amorfus lignin) dan bahan bermolekul rendah (bahan organan - ekstraktif dan bahan tak organan). Manakala kayu lembut pula mengandungi 40-45% selulos, 20% hemiselulos dan 25-35% lignin. Peratusan ini berbeza dari satu jenis dengan jenis kayu yang lain. Kandungan selulos tidak banyak berbeza bagi kayu jenis keras berbanding dengan kayu lembut (Desch 1980). Molekul selulos diorientasikan sepanjang paksi serabut (atau sepanjang butiran kayu) bagi menghasilkan kekuatan serta kekenyalan yang maksimum pada arah L (Patton 1986). Hal ini jelas diperhatikan dari Rajah 3(a)-(c), corak pemalar kenyal bagi kayu-kayan tropika adalah $C_{LL} > C_{RR} > C_{TT}$ sepertimana yang diperolehi oleh Bucur (1983) yang mengkaji kayu beech. Perbezaan inilai C_{LL} , C_{RR} dan C_{TT} bagi setiap spesies kayu kajian (lihat Jadual 1) adalah di antara lain bergantung kepada struktur binaan kayu, ketumpatannya dan juga kelembapan bandingan persekitaran. Data-data ini adalah unik bagi setiap sampel kayu kajian dan amat berkait rapat dengan kualiti kayu berkenaan. Analisis korelasi linear ke atas nilai pemalar kenyal dan ketumpatan bagi sampel-sampel kayu tropika setiap satunya pada arah L, R dan T menggunakan komputer menunjukkan terdapatnya perkaitan yang berikut;

- i) $C_{LL} = 1.2758 \times 10^{-3} \rho + 0.643228$ ($r = 0.59$), arah L
- ii) $C_{RR} = 7.1621 \times 10^{-5} \rho + 0.16402$ ($r = 0.31$), arah R
- iii) $C_{TT} = 9.43053 \times 10^{-5} \rho + 0.112512$ ($r = 0.31$), arah T

dengan C_{LL}, C_{RR}, C_{TT} diukur dalam unit ($\times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$) dan ρ dalam unit kgm^{-3} .



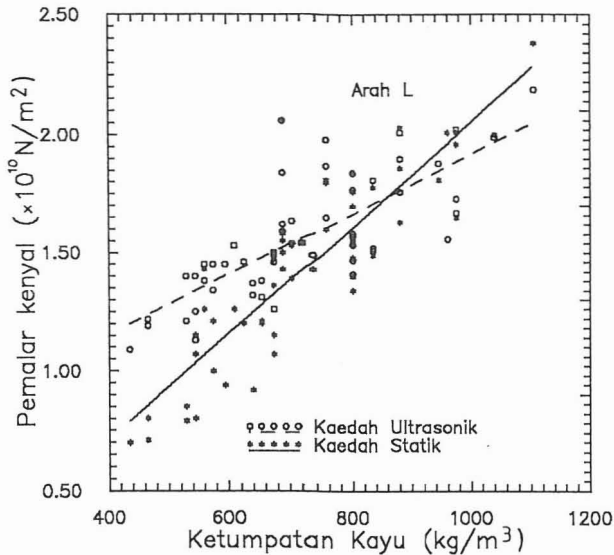


Rajah 3. Perubahan pemalar kenyal terhadap ketumpatan pada (a) arah L, (b) arah R dan (c) arah T bagi 56 spesis kayu tropika

Nilai pemalar kenyal longitud kayu yang didapati dari eksperimen ultrasonik lebih tinggi berbanding dengan nilai pemalar kenyal kayu yang dilaporkan oleh MTIB (1986) menggunakan teknik statik. *Rajah 4* menunjukkan perkaitan di antara pemalar kenyal C_{LL} yang diukur menggunakan kaedah ultrasonik dan kaedah statik bagi menentukan sejauh mana penyisihan kedua-dua teknik bagi sampel-sampel kayu tropika. Dari eksperimen ultrasonik didapati nilai pemalar kenyal C_{LL} bagi kayu tropika yang berketumpatan kurang dari 840 kgm^{-3} lebih tinggi berbanding dengan nilai pemalar kenyal kayu yang dilaporkan oleh MTIB (1986). Analisis seterusnya terhadap data-data ini menunjukkan terdapat penyisihan yang agak tinggi bagi kayu tropika yang mempunyai ketumpatan yang rendah, tetapi bagi kayu jenis sederhana dan keras, nilai purta perbezaan antara kedua-dua teknik ini tidak melebihi 5%. Bagi kelompok kayu sederhana dan keras, teknik ultrasonik berkeupayaan memberikan data-data pemalar kenyal sepertimana dari teknik pengukuran statik. Perbezaan yang ketara ini disebabkan oleh isyarat gelombang ultasonik yang merambat di dalam sampel kajian diterima dalam masa yang amat singkat, menyebabkan tegasan yang amat kecil terhasil dari gelombang ultrasonik yang berfrekuensi antara 40 hingga 45 kHz ini. Hasil yang diperolehi bersesuaian dengan hasil yang diperolehi oleh Bucur (1985) iaitu nilai pemalar kenyal bagi kayu beech yang dikaji dengan menggunakan kaedah dinamik ultrasonik didapati lebih tinggi berbanding dari kaedah statik (lihat Jadual 1 dan *Rajah 4*). Bodig and Jayne (1982) juga melaporkan bahawa nilai pemalar kenyal kayu yang diperolehi dari kaedah dinamik agak tinggi (sekitar 10-15%) berbanding dari kaedah lenturan statik bagi sejalur kayu; proses pelenturan kayu tersebut akan melibatkan canggaaan ricih. Faktor ini disebabkan oleh perbezaan keadaan termodinamik bagi ujian statik dan ultrasonik. Secara teorinya pemalar kenyal yang terlibat dalam pengukuran statik adalah bersifat isoterma sedangkan bagi pengukuran dinamik ultrasonik ia lebih mematuhi hukum adiabatik terutama apabila frekuensi gelombang ultrasonik meningkat. Corak taburan data-data pengukuran dari kedua-dua teknik adalah seragam dengan sisihan taburan tidak melebihi 10% dan ini menunjukkan bahawa teknik ultrasonik berupaya menyediakan data-data pemalar kenyal sebagai suatu faktor pencirian untuk menentukan kualiti kayu.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan dapat disimpulkan kaedah dinamik ultasonik dapat digunakan bagi kayu tropika. Teknik ini dapat digunakan bagi tujuan pengujian dan pempiawaan bahan berkayu kerana nilai pemalar kenyal yang didapati melalui kaedah ini walaupun lebih tinggi tetapi peratusan ralatnya kecil iaitu kurang dari 10 peratus dari nilai yang diperolehi menerusi kaedah statik. Bagi kayu tropika corak pemalar kenyal adalah $C_{LL} > C_{RR} > C_{IT}$ dan terdapat satu korelasi yang linear di antara nilai pemalar-pemalar kenyal dan ketumpatan bagi 56 sampel kayu tropika yang dikaji.



Rajah 4. Perbandingan hasil pengukuran pemalar kenyal C_{LL} menggunakan kaedah dinamik ultrasonik dan kaedah statik (MTIB 1986)

PENGHARGAAN

Projek penyelidikan ini dibiayai sepenuhnya oleh Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar Malaysia menerusi geran penyelidikan jangka panjang IRPA/RME, Kod no. 1-07-05-062. Ucapan terima kasih ditujukan kepada Encik Zaidi Hassan, Cik Tijah Pardi dan staf Jabatan Fizik di atas perbincangan dan bantuan teknikal.

SIDEK HJ. ABDUL AZIZ, ABDUL HALIM SHAARI
dan CHOW SAI PEW

Jabatan Fizik, Fakulti Sains dan Pengajian Alam Sekitar
Universiti Pertanian Malaysia
43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia.

RUJUKAN

- BODIG, J. and B.A. JAYNE. 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- BUCUR, V. 1983. Ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics* **May**: 116-126.
- BUCUR, V. 1985. Ultrasonic, hardness and x-ray densitometric analysis of wood. *Ultrasonics* **November**: 269-275.

- BUCUR, V. and F. FOCABOY. 1988. Surface wave propagation in wood: Prospective method for determination of wood off-diagonal terms of stiffness matrix. *Ultrasonics* **November**: 344-347.
- DESCH, H.E. 1980. *Timber Its Structure, Properties and Utilisation*. London: McMillan.
- MALAYSIAN TIMBER INDUSTRY BOARD (MTIB). 1986. *100 Malaysian Timbers*. Kuala Lumpur: Malaysian Timber Industry Board.
- PATTON, W.J. 1986. *Materials in Industry*. New Jersey: Prentice Hall.
- SIDEK HJ. AB. AZIZ, HJ. SALLEH HARON, ABDUL HALIM SHAARI, CHOW SAI PEW, GAZALI AHMAD dan MOHD. SALLEH MOHD DENI. 1990. Pendekatan ujian tak memusnah bagi penganalisaan ciri kenyal bahan kayu. In: *Seminar Kebangsaan Fizik Dalam Industri*, 19-20 September (1990) Universiti Teknologi Malaysia, Sekudai, Johor.
- SZYMANI, R. and K.A. McDONALD. 1981. Defect detection in lumber; state of the art. *Forest Products Journal* **31(11)**: 34-43.