

EXPERIMENTAL TESTS AND A NUMERICAL FINITE ELEMEN METHOD SIMULATION FOR MODE I FRACTURE OF INDONESIAN TIMBERS

UJI EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI NUMERIK METODE ELEMEN HINGGA POLA FRAKTUR RAGAM I KAYU INDONESIA

Johannes Adhijoso Tjondro¹⁾, Yosafat Aji Pranata²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit 94 Bandung 40141, E-mail jatjondro@unpar.ac.id

²⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha
Jalan Suria Sumantri 65 Bandung 40164, E-mail yosafat.ap@eng.maranatha.edu

ABSTRACT

Linear elastic fracture mechanic concepts use basic assumption that all of strain energy effecting the crack propagation. An approach of this method is the stress intensity factor used to control load, crack growth, and structure geometry. Failure criterion are modeled with three mode, which are mode I, mode II, and mode III. Experimental tests are important due to verification the results from analytical calculation, this tests be in great need of instrumentation comprehension. The objective of this research was to doing an experimental test of mode I fracture of orthotropic material to obtain the stress intensity factor (K_I) and fracture energy (G_I) paramaters, and doing an numerical method using nonlinear finite element method to modeling the samples using ADINATM. The orthotropic materials that used was 48 samples of Indonesian hardwoods: nyatoh (palaquium spp.), mersawa (anisoptera spp.), and durian (durio spp.). This research generated a general equation for stress intensity factor $K_I = 123.SG^{1.32}.\theta^{-0.02}$ and fracture energy $G_I = 1,22.SG^{1.25}.\theta^{-0.06}$, in this case SG is the specific gravity of wood, and θ is an angle of grain direction. The results of numerical simulation using ADINATM indicated that prediction for the crack propagation simulation using nonlinear finite element method are accurate and valid (0,97% relative difference between experimentals and simulation). Strength curve of linear model are usefull to obtain strengthen mechanism of materials.

Keywords : Fracture mode I, stress intensity factor, fracture energy, crack propagation

ABSTRAK

Konsep mekanika retak elastic linier menggunakan asumsi dasar bahwa semua energi regangan berpengaruh terhadap penalaran retak. Pendekatan dengan metode ini menggunakan factor intensitas tegangan untuk mengontrol beban, pertumbuhan retak, dan geometri struktur. Kriteria kegagalan dimodelkan menjadi tiga mode, yaitu mode I, mode II, dan mode III. Uji eksperimental penting dilakukan untuk verifikasi hasil dari perhitungan analitis, pengujian memerlukan pemahaman yang baik terhadap instrumen. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan penelitian eksperimental retak mode I material ortotropik untuk mendapatkan parameter faktor intensitas tegangan (K_I) dan energi retak (G_I), dan pemodelan metode numerik menggunakan metode elemen hingga menggunakan ADINATM. Benda uji material ortotropik yang digunakan berjumlah 48 sampel kayu Indonesia jenis daun lebar: nyatoh (palaquium spp.), mersawa (anisoptera spp.), dan durian (durio spp.). Penelitian ini menghasilkan persamaan faktor intensitas tegangan $K_I = 123.SG^{1.32}.\theta^{-0.02}$ dan energi retak $G_I = 1,22.SG^{1.25}.\theta^{-0.06}$, dalam hal ini SG adalah berat jenis kayu, dan θ adalah sudut terhadap arah pertumbuhan. Hasil dari simulasi numerik menggunakan ADINATM mengindikasikan bahwa simulasi prediksi penalaran retak menggunakan metode elemen hingga nonlinier akurat dan valid (perbedaan relatif antara eksperimental dan simulasi sebesar 0,97%). Kurva berbentuk model linier berguna untuk mendapatkan mekanisme kekuatan material.

Kata-kata kunci: Retak mode I, faktor intensitas tegangan, energi retak, penalaran retak

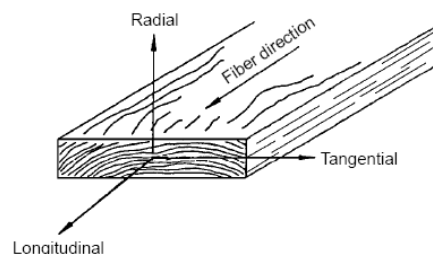
PENDAHULUAN

Material ortotropik merupakan material yang bersifat unik, dengan properti yang berbeda pada ketiga arah sumbu utamanya, yaitu arah longitudinal, arah radial, dan arah tangensial. Arah longitudinal didefinisikan sebagai arah sejajar serat, arah radial adalah tegak lurus serat serta arah normal terhadap lingkaran pertumbuhan. Sedangkan arah tangensial adalah tegak lurus serat tetapi arah sudut tangensial terhadap lingkaran pertumbuhan. Untuk menguraikan perilaku elastik material kayu, diperlukan dua belas konstanta (dengan sembilan diantaranya independen), yaitu tiga nilai modulus elastisitas (E_L , E_R , dan E_T), tiga nilai modulus rigiditas (G_L , G_R , dan G_T), dan enam nilai rasio Poisson (ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{RT} , dan ν_{TR}). Sifat fisik dan mekanik kayu sangat dipengaruhi oleh berat jenis dan kadar airnya. *Forest Product Laboratory (Wood Handbook, 1999)* mengklasifikasikan kekuatan kayu berdasarkan korelasi terhadap berat jenis.

Sedangkan Tata Cara Perencanaan Struktur Kayu untuk Bangunan Gedung SNI 03-xxxx-2000 (SNI, 2000) mengklasifikasikan kekuatan kayu dengan acuan berdasarkan besarnya nilai modulus elastisitas.

Mekanika fraktur dapat diterima sebagai suatu ilmu penting dan berguna, serta menjadi sangat berkembang selama kurun

waktu tiga puluh tahun terakhir ini. Pengembangan metode pengujian non-destruktif mengungkapkan retak pada struktur dan masalah berkaitan dengan hal tersebut.



Gambar 1. Sumbu utama material (*Wood Handbook, 1999*)

Tujuan penelitian dalam penulisan ini adalah melakukan uji eksperimental pola fraktur ragam I dengan benda uji material ortotropik untuk mendapatkan nilai faktor intensitas tegangan (K_I) dan energi fraktur (G_I), melakukan analisis pola fraktur ragam I pada model benda uji dengan metode elemen hingga, dan membandingkan hasil uji eksperimental dengan metode elemen hing-

ga. Penelitian ini dibatasi dalam ruang lingkup yaitu: (1). Benda uji adalah kayu jenis daun lebar yaitu nyatoh (*pala-quium spp.*), mersawa (*anisoptera spp.*), dan durian (*durio spp.*), (2). Jumlah benda uji untuk masing-masing jenis kayu sebanyak 16 benda uji kayu mersawa, 14 benda uji kayu nyatoh, dan 18 benda uji kayu durian, total 48 benda uji, (3). Analisis metode elemen hingga dilakukan pada model benda uji kayu Mersawa dengan perangkat lunak ADINATM.

STUDI PUSTAKA

Kayu Indonesia

Kayu mersawa memiliki warna terang dan tekstur kasar. Berat jenis kayu ini berkisar antara 544 kg/m³ sampai dengan 752 kg/m³ pada kondisi kandungan kadar air 12%, serta berat jenis kurang lebih 945 kg/m³ pada kondisi basah (FPL, 1999).

Kayu nyatoh termasuk dalam *family Sapotaceae*, dengan *genus Palaquium*. Tinggi pohon nyatoh dapat mencapai kurang lebih 30 meter, dengan diameter lingkaran batang dapat mencapai 1 meter.

Kayu durian termasuk dalam *family Bombacaceae*, dengan *genus Durio*. Tinggi pohon durian dapat mencapai berkisar antara 23 meter sampai dengan 40 meter, bahkan ada yang mampu mencapai 55 meter. Diameter lingkaran batang dapat mencapai berkisar antara 0,5 meter sampai dengan 1,2 meter.

Sifat Mekanis Kayu Indonesia

Dalam penelitian ini, beban yang bekerja pada benda uji adalah beban tarik. Tjondro (2007) telah melakukan penelitian dengan 72 benda uji (uji sifat fisik) dan 72 benda uji (uji sifat mekanik) untuk mendapatkan persamaan kuat kayu, yang hasilnya telah dibandingkan terhadap persamaan kuat kayu dari *Forest Product Laboratory* (FPL, 1999) dengan koreksi untuk kadar air yang sama. Persamaan Tjondro yaitu kuat tarik sejajar serat, kuat tarik tegak lurus serat, kuat tekan sejajar serat, kuat tekan tegak lurus serat, dan fraktur ragam 1.

Mekanika Fraktur Linier Elastik

Konsep mekanika fraktur linier elastik menggunakan asumsi dasar bahwa semua energi regangan akan mengakibatkan penjalaran retak (*crack propagation*). Pendekatan yang digunakan adalah asumsi bahwa faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*) digunakan untuk mengontrol beban, pertumbuhan dan ukuran retak, serta bentuk geometri struktur. Kriteria kegagalan dibagi menjadi beberapa ragam kegagalan, yaitu: ragam I, ragam II, dan ragam III.

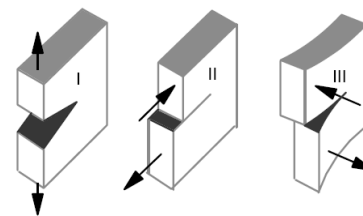
Dalam penelitian ini, model kegagalan yang ditinjau adalah pola kegagalan ragam I (Gambar 2.a) pada material ortotropik memungkinkan terjadinya beberapa orientasi penjalaran retak, akibat adanya perbedaan properti material pada ketiga buah arah sumbu utama. Maka orientasi kemungkinan terjadinya penjalaran retak selengkapnya ditampilkan pada Gambar 2.

Persamaan umum untuk menghitung faktor K_I yaitu sebagai berikut,

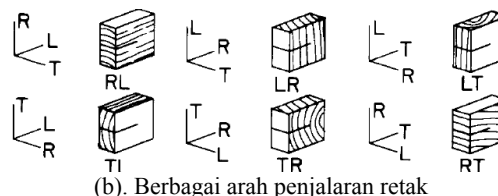
$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \beta \quad (1)$$

dimana K_I adalah faktor intensitas tegangan, σ adalah tegangan yang terjadi, a adalah panjang kantilever, β adalah faktor dimensi, yang bergantung dari bentuk/komponen geometri struktur dan panjang retak. Nilai K_I tersebut konstan pada saat terjadi kegagalan, atau disebut *fracture toughness* material, yaitu kemampuan ketahanan material kayu terhadap cacat yang mengakibatkan terjadinya permulaan kegagalan. Pengukuran parameter *fracture toughness* akan membantu dalam proses identifikasi panjang cacat yang mengakibatkan permulaan kegagalan.

Faktor intensitas tegangan untuk model benda uji dalam penelitian ini dihitung berdasarkan beberapa Persamaan 1, Persamaan 2, Persamaan 3, dan Persamaan 4.



(i). Ragam I. (ii). Ragam II. (iii). Ragam III.
(a). Model kegagalan



(b). Berbagai arah penjalaran retak

Gambar 2. Kemungkinan terjadi penjalaran retak material kayu

$$K_I = \frac{P}{b\sqrt{w}} \left[29,6 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^{1/2} - 185,5 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^{3/2} + 665,7 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^{5/2} - 1017 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^{7/2} + 638,9 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^{9/2} \right] \quad (2)$$

Persamaan 2 berlaku untuk kondisi model *ASTM compact tension* (Grandt, 2004; Smith et al., 2003), dengan rasio $0,5H/W = 0,6$.

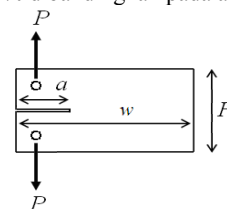
$$K_I = \frac{P}{b\sqrt{a}} \left[30,96 \cdot \left(\frac{a}{w}\right) - 195,8 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 730,6 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 1186,3 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^4 + 754,6 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^5 \right] \quad (3)$$

Persamaan 3 berlaku untuk kondisi model *wedge opening loading* (Grandt, 2004), dengan rasio $0,5H/W = 0,486$.

$$K_I = \frac{P}{b} \sqrt{4 \cdot \left(\frac{3 \cdot a^2}{h^3} + \frac{1}{h}\right)} \quad (4)$$

Sedangkan Persamaan 4 berlaku untuk kondisi *double cantilever beam* (Grandt, 2004). dimana K_I adalah faktor intensitas tegangan, P adalah beban (gaya tarik), w adalah panjang benda uji, dan b adalah tebal benda uji.

Pada kajian beberapa kategori material, fraktur ragam I (*tensile crack*) merupakan keadaan yang paling kritis dan mewakili kondisi paling berbahaya. Pada material kayu kondisi ini benar terutama akibat perbedaan ekstrim pada properti material sebagai fungsi dari orientasi serat, kekuatan pada arah radial dan tangensial sebesar 10%-30% dibandingkan pada arah longitudinalnya.



Gambar 3. Model pola fraktur ragam I

Besarnya energi fraktur untuk model benda uji *plane stress*, yang mana menunjukkan rekonsiliasi dengan faktor intensitas tegangan dihitung berdasarkan Persamaan 5 (Smith et al., 2003),

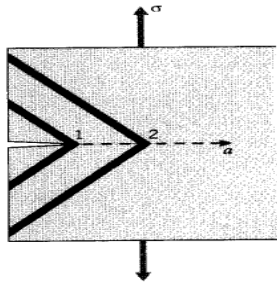
$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (5)$$

dimana E adalah modulus elastisitas, dalam penelitian ini nilai modulus elastisitas diambil dari nilai modulus elastisitas kuat te-

kan tegak lurus serat (Tjondro, 2007). Tegangan pada material ketika terjadi penjarangan retak (σ_f) yaitu pada titik ujung permulaan retak dihitung berdasarkan Persamaan 6 (Smith et al., 2003),

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{1,12 \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (6)$$

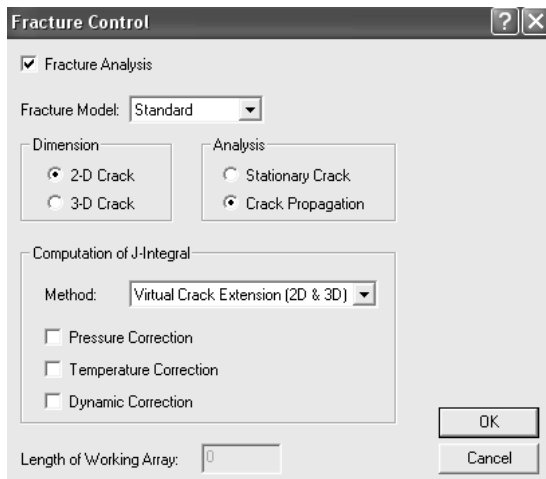
dimana K_{IC} adalah faktor intensitas tegangan kritis material, yang dipertimbangkan sebagai properti material untuk mendefinisikan tahanan terhadap pertumbuhan retak atau *fracture toughness*. Adalah penting untuk merealisasikan bahwa panjang retak kritis adalah berupa nilai absolut, tidak bergantung pada ukuran dan dimensi maupun bentuk geometri struktur. Setiap kali terjadi penjarangan retak (walaupun pertumbuhannya kecil), tambahan energi regangan dilepaskan pada area didekat lokasi retak. Gambar 4 memperlihatkan bahwa energi lebih banyak dilepaskan akibat adanya penjarangan retak pada posisi titik 2 dibandingkan titik 1.



Gambar 4. Energi yang dilepaskan pada saat terjadi pertumbuhan retak untuk dua panjang retak yang berbeda

Metode Elemen Hingga Nonlinier

Perangkat lunak *ADINATM* (ADINA, 2005) memiliki fitur untuk analisis mekanika fraktur linier dan nonlinier. Fitur analisis mekanika fraktur yaitu *stationary crack* (dapat digunakan untuk model metode elemen hingga baik 2D maupun 3D) dan *crack propagation* (hanya dapat digunakan untuk model 2D). *Stationary crack* adalah retak yang sifatnya tidak berkembang. Sedangkan *crack propagation* adalah retak yang dapat berkembang menjadi semakin panjang.



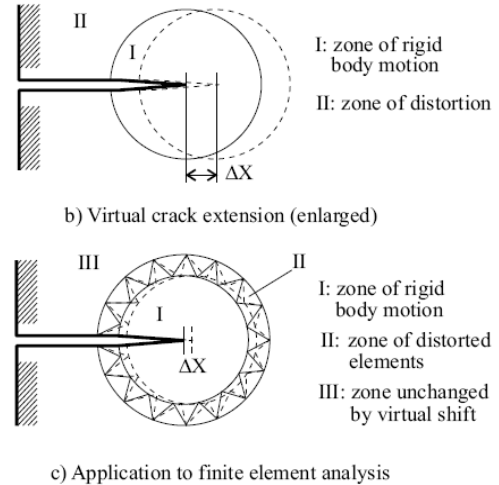
Gambar 5. Fitur kontrol *fracture analysis*.

Metode integral-J adalah metode yang digunakan pada analisis *rate-independent quasi-static fracture* untuk mengidentifikasi tingkat pelepasan energi yang berhubungan dengan pertumbuhan retak. Nilai J dapat dikaitkan dengan faktor intensitas tegangan untuk material dengan respons linier, sebagai contoh *LEFM*. Metode *virtual crack extension* adalah metode untuk mengevaluasi teknik komputasi integral-J dengan menggunakan perbedaan energi potensial total antara dua konfigurasi model retak yang perbedaannya tidak terlalu signifikan.

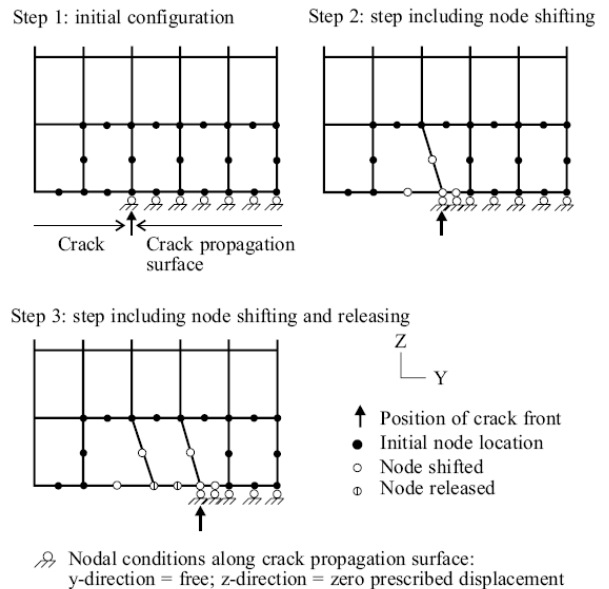
Metode ini memerlukan hanya satu analisis elemen hingga. Metode garis kontur (*line contour*) adalah analisis untuk menghitung nilai parameter kontur independen untuk menandai peralihan, tegangan, dan regangan pada ujung *crack*. Persamaan yang digunakan sebagai berikut,

$$J = \int_{\Gamma} W \cdot dx_2 - \sigma_{ij} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cdot n_j \cdot ds \quad (7)$$

dimana J adalah garis kontur pada ujung retak, Γ adalah komponen tensor tegangan, W adalah *stress work density*, ds adalah panjang *increment* sepanjang Γ , u_i adalah komponen vektor peralihan, n_j adalah komponen unit vektor normal Γ .



Gambar 6. Metode *virtual crack extension* pada model 2D



Gambar 7. Prosedur metode *node shift/release*.

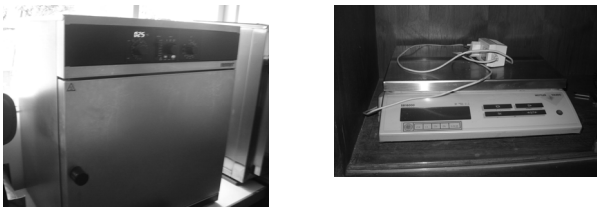
Specific Gravity

Sifat fisik dan mekanik kayu sangat dipengaruhi oleh berat jenis dan kadar airnya. Berat jenis kayu dihitung dengan Persamaan 23. Berat kering diukur setelah benda uji dikeringkan selama 24 jam pada suhu sampai dengan $106^{\circ}C$.

$$SG = \frac{W_{kering}}{V} \quad (8)$$

$$MC = \frac{W_{basah} - W_{kering}}{W_{kering}} \cdot 100\% \quad (9)$$

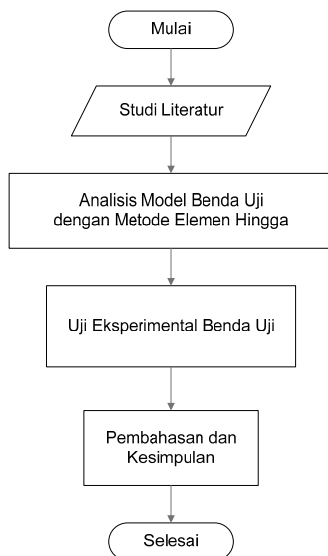
dimana SG adalah berat jenis kayu, W_{kering} adalah berat kering, V adalah volume benda uji, MC adalah kadar air, dan W_{basah} adalah berat benda uji kondisi sebelum dikeringkan.



(a). Oven. (b). Alat ukur berat.
Gambar 8. Alat Oven dan alat ukur berat.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah kombinasi antara studi literatur, model analitis, dan uji eksperimental.

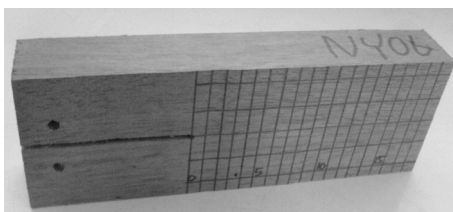


Gambar 9. Diagram bagan alir penelitian

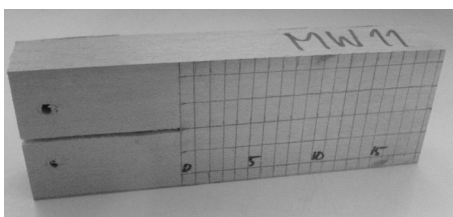
STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Studi Kasus

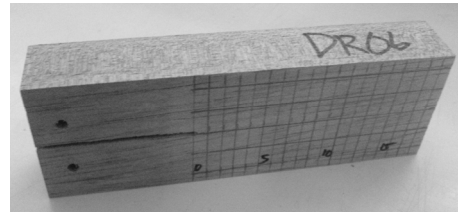
Garis bantu dibuat secara horisontal dengan ketelitian tiap 0,5 cm pada masing-masing benda uji untuk mempermudah pembacaan penjalaran retak.



Gambar 10. Benda uji kayu Mersawa



Gambar 11. Benda uji kayu Nyatoh



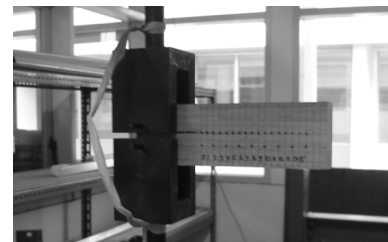
Gambar 12. Benda uji kayu Durian

Benda uji dalam penelitian ini menggunakan rasio $0,5H/w = 0,1667$, maka prediksi analitis nilai K_I lebih cocok dihitung dengan menggunakan persamaan untuk *double cantilever beam* (Persamaan 4) dan persamaan Tjondro (2007) untuk mendapat nilai yang paling mendekati terhadap hasil uji eksperimental. Sedangkan nilai P atau gaya tarik untuk masing-masing benda uji diperoleh dari beban maksimum (P_{maks}) hasil dari uji eksperimental.

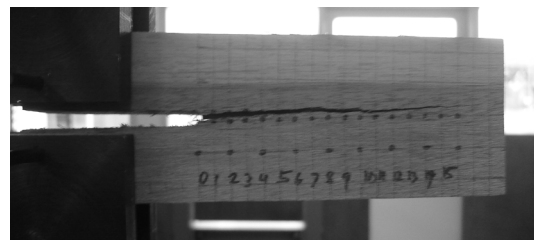
Hasil Uji Eksperimental

Hasil simulasi uji eksperimental adalah informasi kurva yang memberikan informasi hubungan antara beban terhadap waktu atau kurva beban-waktu, kurva beban-COD, kurva penjalaran retak-waktu, serta kurva penjalaran retak-COD. Beban adalah besarnya gaya tarik (P) yang diaplikasikan pada masing-masing lubang pada benda uji. Besarnya beban bergantung pada riwayat waktu pembebanan. Penjalaran retak adalah riwayat terjadinya retak akibat peningkatan beban. COD adalah *crack opening displacement*, yaitu besarnya peralihan vertikal antara lubang akibat peningkatan beban.

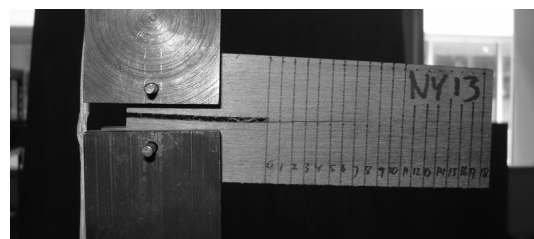
Hasil pengujian secara umum memberikan gambaran bahwa penjalaran retak kayu nyatoh memperlihatkan trend penjalaran tiba-tiba, sedangkan kayu mersawa dan kayu durian memperlihatkan penjalaran yang relatif stabil selama riwayat waktu pembebanan.



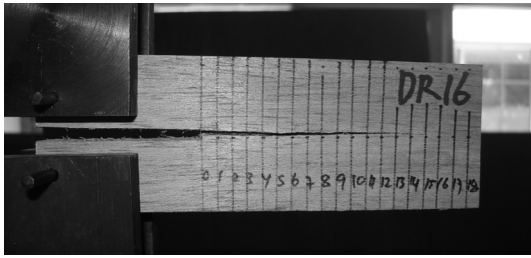
Gambar 13. Persiapan Uji Eksperimental



Gambar 14. Penjalaran retak benda uji MW03



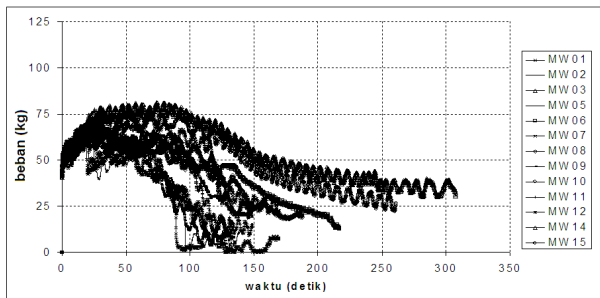
Gambar 15. Penjalaran retak benda uji NY13



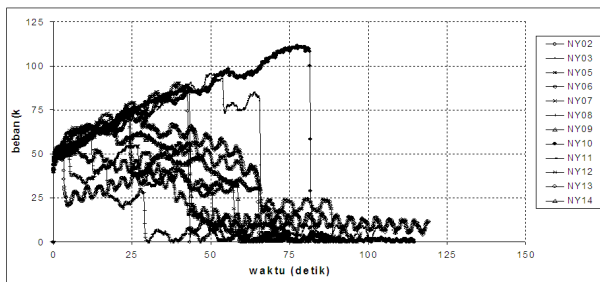
Gambar 16. Penjelaran retak benda uji DR16

Kurva Beban-waktu

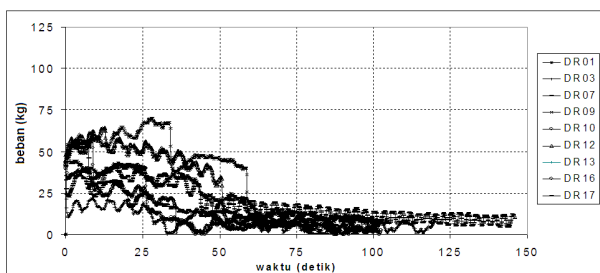
Hasil keluaran alat instrument *UTM* yaitu pembebanan terhadap riwayat waktu selengkapnya ditampilkan pada Gambar 17, Gambar 18, dan Gambar 19. Hasil uji eksperimental memperlihatkan bahwa beban maksimum (P_{maks}) yang terjadi pada benda uji kayu Mersawa adalah sebesar 81,5 kg, benda uji kayu Nyatoh sebesar 111,5 kg, dan benda uji kayu Durian sebesar 70,0 kg.



Gambar 17. Kurva beban-waktu Kayu Mersawa



Gambar 18. Kurva beban-waktu Kayu Nyatoh

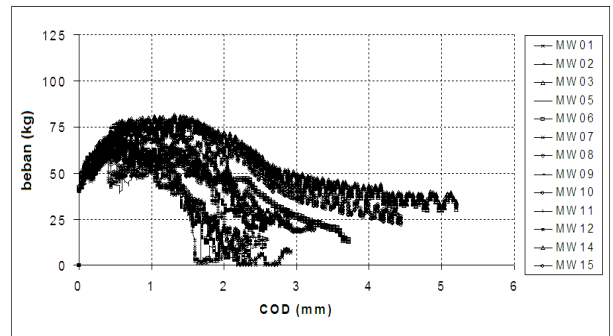


Gambar 19. Kurva beban-waktu Kayu Durian

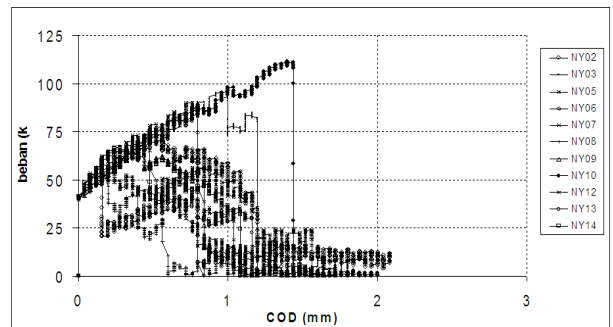
Kurva Beban-COD

Hasil *output* alat instrument *UTM* yaitu riwayat pembebanan terhadap *crack opening displacement* (*COD*) ditampilkan pada Gambar 20, Gambar 21, dan Gambar 22.

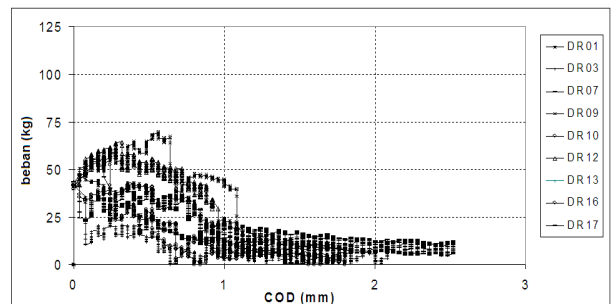
Hasil uji eksperimental memperlihatkan bahwa besarnya peralihan pada saat beban maksimum terjadi, untuk benda uji kayu Mersawa sebesar 1,2 mm, benda uji kayu durian sebesar 1,4 mm, sedangkan kayu Nyatoh mencapai 0,6 mm.



Gambar 20. Kurva beban-COD Kayu Mersawa



Gambar 21. Kurva beban-COD Kayu Nyatoh



Gambar 22. Kurva beban-COD Kayu Durian

Kurva Penjelaran retak-Waktu

Hasil pengamatan secara visual penjelaran retak (l_{crack}) terhadap riwayat waktu (t) selengkapnya ditampilkan pada Gambar 23 (kayu Mersawa), Gambar 24 (kayu Nyatoh), dan Gambar 25 (kayu Durian). Hasil uji eksperimental memperlihatkan bahwa untuk benda uji kayu Mersawa, penjelaran retak yang terjadi mencapai 80 mm. Persamaan regresi nonlinier yang dihasilkan dari uji eksperimental dengan benda uji kayu Mersawa ditampilkan dalam Persamaan 10, dengan $R^2 = 0,869$.

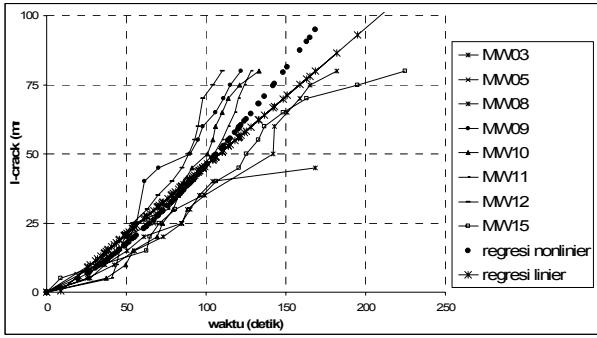
$$l_{crack} = 0,724.t^{1,4} \quad (10)$$

Untuk benda uji kayu Nyatoh, penjelaran retak yang terjadi mencapai 85 mm. Persamaan regresi nonlinier yang dihasilkan ditampilkan dalam Persamaan 11, dengan $R^2 = 0,615$.

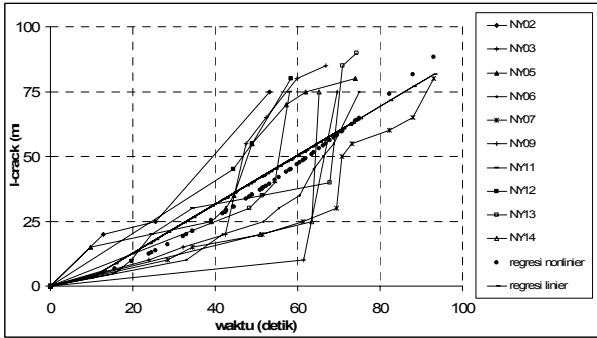
$$l_{crack} = 0,1294.t^{1,44} \quad (11)$$

Untuk benda uji kayu Durian, penjelaran retak yang terjadi mencapai 85 mm. Persamaan regresi nonlinier yang dihasilkan ditampilkan dalam Persamaan 12, dengan $R^2 = 0,934$.

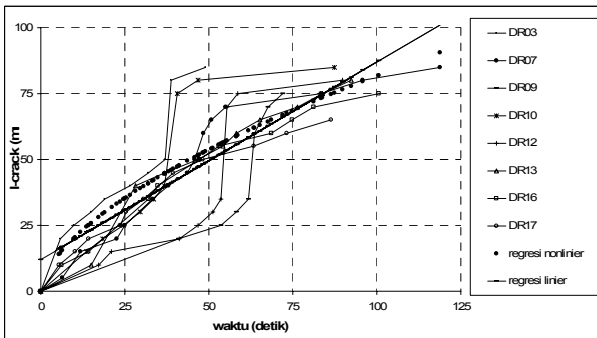
$$l_{crack} = 5,0119.t^{0,606} \quad (12)$$



Gambar 23. Kurva penjalaran retak-waktu Kayu Mersawa



Gambar 24. Kurva penjalaran retak-waktu Kayu Nyatoh



Gambar 25. Kurva penjalaran retak-waktu Kayu Durian

Kurva Penjalaran retak-COD

Hasil plot hubungan antara *crack opening displacement* (COD) terhadap penjalaran retak ditampilkan pada Gambar 26, Gambar 27, dan Gambar 28. Persamaan regresi nonlinier yang dihasilkan dari uji eksperimental dengan benda uji kayu Mersawa ditampilkan dalam Persamaan 13, dengan $R^2 = 0,801$.

$$l_{crack} = 19,4984.COD^{1,4} \quad (13)$$

Persamaan regresi nonlinier yang dihasilkan dari benda uji kayu Nyatoh ditampilkan dalam Persamaan 14, dengan $R^2 = 0,616$.

$$l_{crack} = 41,69.COD^{1,49} \quad (14)$$

Persamaan regresi nonlinier yang dihasilkan dari benda uji kayu Durian ditampilkan dalam Persamaan 15, dengan $R^2 = 0,929$.

$$l_{crack} = 54,9541.COD^{0,718} \quad (15)$$

Faktor Intensitas Tegangan

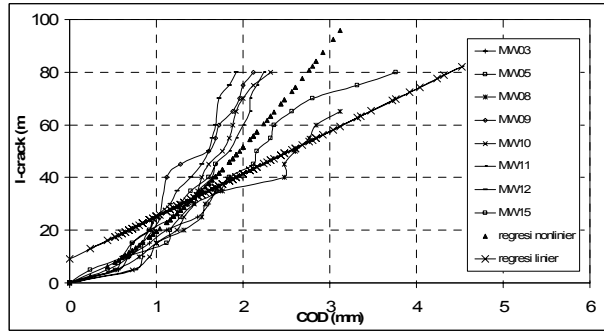
Persamaan regresi hubungan antara berat jenis (SG) dan besarnya sudut θ terhadap faktor intensitas tegangan (K_I) yang dihasilkan dari uji eksperimental pada penelitian ini ditampilkan dalam Persamaan 16, dengan $R^2 = 0,424$.

$$K_I = 123,027.SG^{1,11}.\theta^{-0,0424} \quad (16)$$

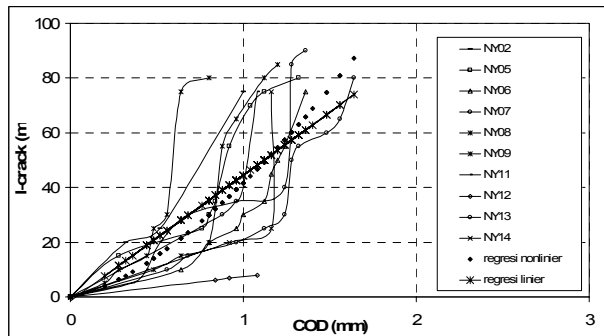
Apabila tidak memperhitungkan pengaruh sudut θ , persamaan regresi yang dihasilkan dari uji eksperimental pada penelitian ini ditampilkan dalam Persamaan 17, dengan $R^2 = 0,376$.

$$K_I = 112,2.SG^{1,22} \quad (17)$$

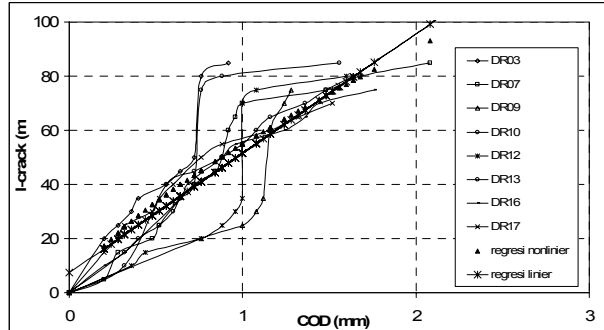
Definisi θ adalah sudut yang menunjukkan besarnya sudut antara beban terhadap arah/sumbu lingkaran pertumbuhan, sebagai contoh untuk besar sudut θ dengan nilai 0° , 45° , dan 90° ditampilkan pada Gambar 30.



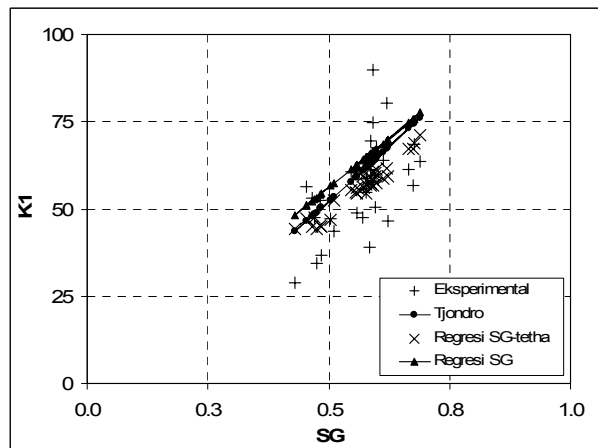
Gambar 26. Kurva penjalaran retak-COD Kayu Mersawa



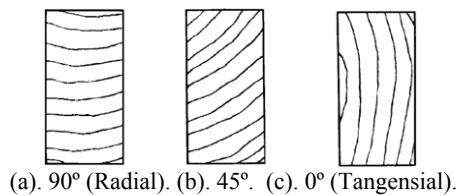
Gambar 27. Kurva penjalaran retak-COD Kayu Nyatoh



Gambar 28. Kurva penjalaran retak-COD Kayu Durian



Gambar 29. Kurva hubungan K_I dengan SG



Gambar 30. Sudut θ (satuan derajat)

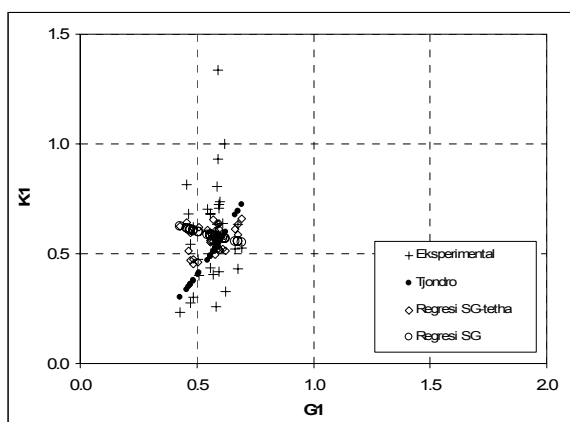
Energi Fraktur

Persamaan regresi hubungan antara berat jenis (SG) dan sudut θ terhadap besarnya energi fraktur (G_I) hasil uji eksperimental ditampilkan dalam Persamaan 18, dengan $R^2 = 0,012$.

$$G_I = 1,17.SG^{0,5}.\theta^{-0,13} \quad (18)$$

Apabila tidak memperhitungkan besar sudut θ , maka persamaan regresi hasil uji eksperimental ditampilkan dalam Persamaan 19, dengan $R^2 = 0,019$.

$$G_I = 0,5.SG^{-0,26} \quad (19)$$

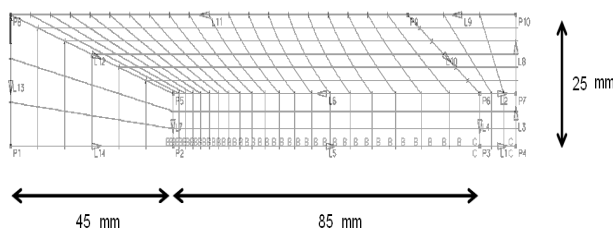


Gambar 31. Kurva hubungan G_I dengan SG

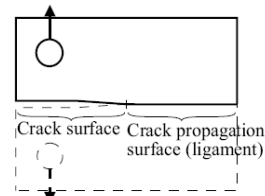
Hasil uji eksperimental memperlihatkan bahwa perbedaan %-relatif K_I antara persamaan Grandt dengan persamaan Tjondro berkisar antara 1,85%-50,48%. Besar nilai faktor intensitas tegangan rata-rata (Grandt) sebesar 56,84, (Tjondro) sebesar 60,54. Nilai terendah (Grandt) sebesar 28,91, (Tjondro) sebesar 43,51. Nilai tertinggi (Grandt) sebesar 89,68, (Tjondro) sebesar 76,36.

Analisis dengan Metode Elemen Hingga

Pemodelan elemen menggunakan tipe *solid*, pemodelan dilakukan secara 2D (*plane stress*). Strategi pemodelan tumpuan sebagai berikut: daerah di sepanjang garis $L1$ dimodelkan sebagai sendi (tidak terjadi translasi pada sumbu-y dan sumbu-z). Kemudian selanjutnya digunakan asumsi bahwa penjalaran retak yang terjadi ditinjau sepanjang 85 mm dari ujung retak, yaitu berawal dari titik $P2$ sampai dengan titik $P3$ (Gambar 32). Pemodelan properti material adalah elastik-ortotropik.

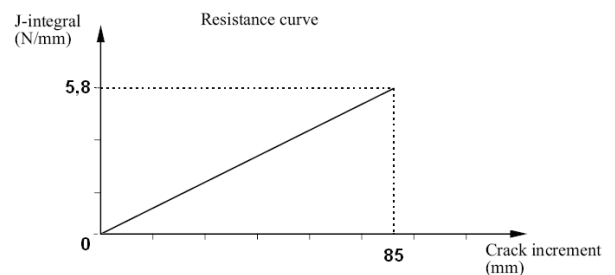


Gambar 32. Pemodelan benda uji kayu Mersawa



Gambar 33. Pemodelan *crack propagation*

Kurva tahanan (*resistance curve*) didefinisikan sebagai hubungan antara pelepasan energi (G_I) dan pertumbuhan retak. Dalam penelitian ini, pemodelan mekanika fraktur adalah linier elastik, maka kurva tahanan menunjukkan hubungan persamaan linier, yang berarti bahwa nilai kritis tahanan bersifat konstan terhadap pertumbuhan retak, serta menekankan bahwa mekanisme penguatan (*toughening mechanism*) material ortotropik seperti penghubung retak (*crack bridging*) bersifat tertentu. Digunakan asumsi bahwa daerah pertumbuhan retak adalah sepanjang 85 mm, maka *crack point* yaitu *point1* ($x = 0$) dan *point2* ($x = 85$). Sedangkan energi fraktur yaitu *point1* ($y = 0$) dan *point2* ($y = 5,8$ N/mm (energi fraktur rata-rata).

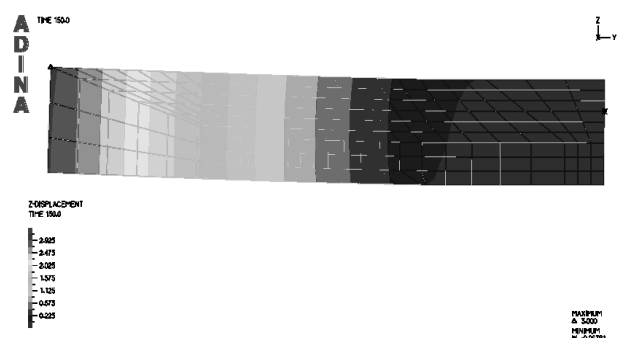


Gambar 34. *Resistance curve*

Pemodelan beban menggunakan kontrol peralihan (*displacement*) terhadap riwayat waktu pembebanan. Peralihan yang dimaksud adalah besarnya *crack opening displacement (COD)*. Kurva *COD*-waktu bersifat linier, kontrol fungsi waktu menggunakan riwayat waktu pembebanan sepanjang 150 detik dan besarnya target peralihan *COD* diasumsikan sebesar 3 mm (tren riwayat waktu pembebanan uji eksperimental berkisar pada durasi 150 detik dan *COD* berkisar pada nilai 3 mm). Arah peralihan (*prescived value of translation*) adalah sumbu-z positif, karena beban yang diaplikasikan pada benda uji berupa gaya tarik (arah sumbu-z positif).

a. Crack Opening Displacement (COD)

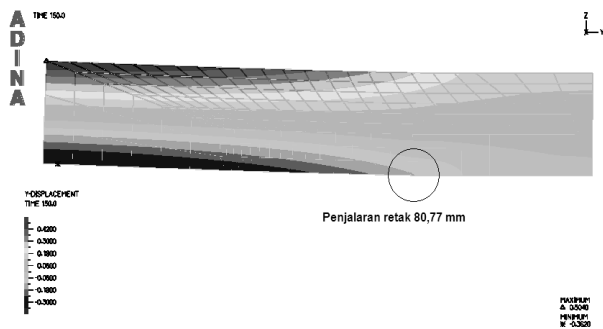
Hasil analisis diambil dari *Band Plot* dengan tinjauan peralihan sumbu-z ditampilkan pada Gambar 35, penjalaran retak (peralihan sumbu-y) ditampilkan pada Gambar 36, dan tegangan arah sumbu-z ditampilkan pada Gambar 37. Hasil analisis (Gambar 35) memperlihatkan bahwa peralihan sebesar 3 mm tercapai, yaitu peralihan vertikal pada titik lokasi beban dipasang.



Gambar 35. Peralihan sumbu-z

b. Penjalaran Retak

Perbandingan penjalaran retak maksimum yang terjadi antara hasil analisis model benda uji dengan metode elemen hingga (*ADINA*) terhadap uji eksperimental selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1. Hasil analisis memperlihatkan bahwa uji eksperimental kayu Mersawa mencapai penjalaran retak maksimum dalam rentan waktu berkisar antara 110 detik sampai dengan 224 detik pada penjalaran retak sebesar 80 mm, sedangkan simulasi dengan perangkat lunak *ADINA* pada detik ke-150 tercapai penjalaran retak sebesar 80,77 mm. Perbedaan penjalaran retak maksimum hasil uji eksperimental dengan simulasi *ADINA* sebesar 0,97%. Perbedaan waktu yang diperlukan untuk mencapai penjalaran retak maksimum antara hasil uji eksperimental dengan simulasi *ADINA* berkisar antara 40-74 detik.



Gambar 36. Peralihan sumbu-y

Tabel 1 Penjalaran retak maksimum.

Benda Uji	Eksperimental		<i>ADINA</i>	
	Penjalaran retak maks. (mm)	Waktu (detik)	Penjalaran retak maks. (mm)	Waktu (detik)
MW08	80,0	182		
MW09	80,0	122		
MW10	80,0	133	80,77	150
MW11	80,0	128		
MW12	80,0	110		
MW15	80,0	224		

c. Tegangan pada daerah ujung retak (σ_f)

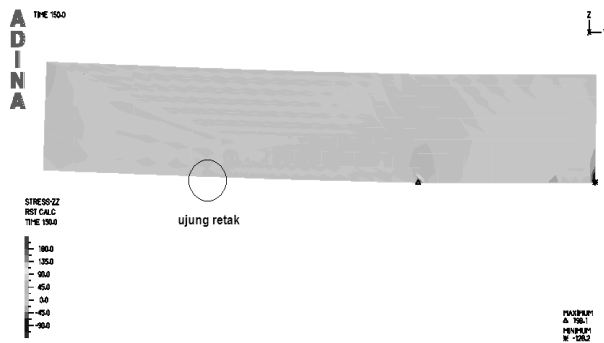
Besarnya tegangan (σ_f) yang terjadi pada daerah ujung retak (dalam hal ini ditinjau titik nodal 50) hasil simulasi *ADINA* yaitu sebesar 1,503 N/mm². Hasil ini menunjukkan perbedaan %-relatif terhadap perhitungan berdasarkan persamaan analitis (Grandt, 2004) berkisar antara 0,2% - 25,23%, sedangkan terhadap persamaan analitis (Tjondro, 2007) berkisar antara 4,18% - 18,44%.

Faktor intensitas tegangan (K_I) pada daerah ujung retak dapat digunakan sebagai parameter *fracture toughness* (K_{IC}), karena retak pada material akan bertumbuh ketika K_I mencapai nilai kritis (*critical value*) (Smith et al., 2003). Dengan kata lain, *fracture Toughness* adalah faktor intensitas tegangan kritis untuk material, yang dipertimbangkan sebagai properti material yang mendefinisikan tahanan material terhadap pertumbuhan retak.

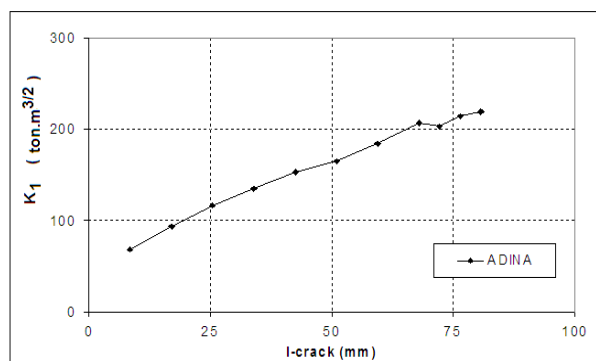
Tabel 2 Tegangan (σ_f) benda uji kayu Mersawa.

Benda uji	σ_f (N/mm ²)		
	Analitis (Grandt)	Analitis (Tjondro)	<i>ADINA</i>
MW01	1,4207	1,3901	
MW02	1,4846	1,6115	
MW03	1,5060	1,3664	
MW05	1,3097	1,2689	
MW06	1,3121	1,2759	
MW07	1,2150	1,5953	1,503
MW08	1,2687	1,3446	

MW09	1,3639	1,6401
MW10	1,3167	1,5685
MW11	1,3280	1,3608
MW12	1,2002	1,3496
MW14	1,4332	1,3893
MW15	1,3103	1,4220



Gambar 37. Tegangan arah sumbu-z

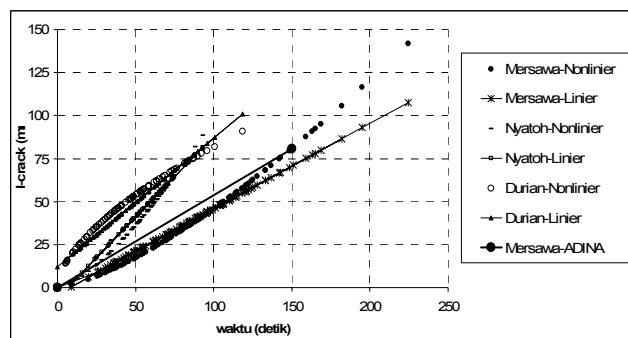


Gambar 38. Faktor Intensitas Tegangan kayu Mersawa

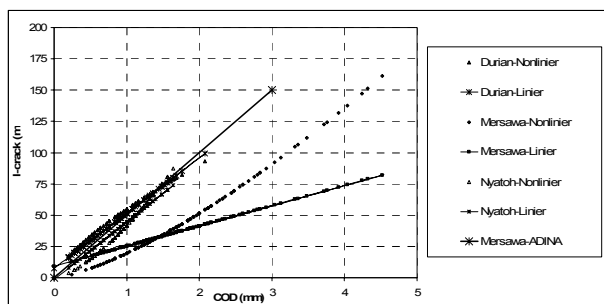
Dari hasil simulasi *ADINA* diperoleh pula informasi besarnya tegangan yang terjadi pada setiap titik penjalaran retak sesuai riwayat waktu pembebanan. Dari informasi tegangan tersebut selanjutnya dapat dihitung nilai K_I dengan menggunakan Persamaan 21, sehingga dapat diperoleh informasi hubungan antara faktor intensitas tegangan (K_I) terhadap riwayat penjalaran retak (l_{crack}). Hasil selengkapnya ditampilkan pada Gambar 38.

Hubungan Penjalaran Retak - Waktu dan Penjalaran Retak-COD

Hasil uji eksperimental memberikan hasil berupa korelasi hubungan antara penjalaran retak (l_{crack}) terhadap waktu dan penjalaran retak (l_{crack}) terhadap COD. Prediksi linier dan nonlinier dilakukan, dengan pertimbangan bahwa perangkat lunak *ADINA* tidak memiliki fitur nonlinier beban-waktu pada analisis *crack propagation*, sehingga untuk memprediksi dilakukan prediksi secara linier berdasarkan data hasil uji eksperimental.



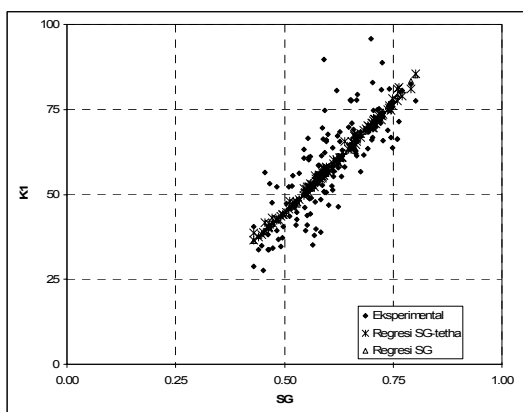
Gambar 39. Kurva hubungan penjalaran retak-waktu



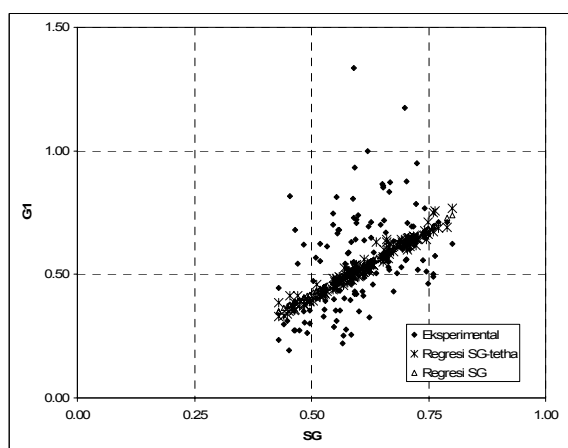
Gambar 40. Kurva hubungan penjaralan retak-COD

Hubungan K_I dan G_I terhadap Berat Jenis

Data hasil uji eksperimental dalam penelitian ini (jenis kayu Mersawa, Nyatoh, dan Durian) selanjutnya digabungkan dengan data hasil penelitian terhadap benda uji kayu Akasia Mangium (*Acacia Mangium*), Kruing (*Dipterocarpus sp.*), dan Meranti (*Shorea sp.*) yang telah dilakukan oleh Tjondro dengan jumlah benda uji total sebanyak 95 benda uji (Tjondro, 2007), untuk mendapatkan persamaan umum yang menunjukkan hubungan antara faktor intensitas tegangan (K_I) terhadap berat jenis (SG) dan hubungan antara energi fraktur (G_I) terhadap SG .



Gambar 41. Kurva hubungan K_I - SG



Gambar 42. Kurva penjaralan G_I - SG

Dengan memperhitungkan pengaruh besar sudut terhadap arah tangensial serat, maka persamaan yang dihasilkan sebagai berikut,

$$K_I = 123.SG^{1,32}.\theta^{-0,02}; R^2 = 0,722 \quad (20)$$

$$G_I = 1,22.SG^{1,25}.\theta^{-0,06}; R^2 = 0,416 \quad (21)$$

Sedangkan apabila tanpa memperhitungkan besar sudut terhadap arah tangensial serat, persamaan sebagai berikut,

$$K_I = 11482SG^{1,36}; R^2 = 0,707 \quad (22)$$

$$G_I = 0,96.SG^{1,19}; R^2 = 0,323 \quad (23)$$

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menghasilkan persamaan umum faktor intensitas tegangan yaitu $K_I = 123.SG^{1,32}.\theta^{-0,02}$ dan energi fraktur yaitu $G_I = 1,22.SG^{1,25}.\theta^{-0,06}$.
2. Perbedaan %-relatif yang terjadi antara hasil analisis metode elemen hingga terhadap uji eksperimental terjadi karena perbedaan antara data masukan yaitu asumsi properti material pada pemodelan benda uji (*ADINA*) dengan kondisi benda uji yang sebenarnya. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih teliti, diperlukan data material yang berasal dari hasil tes laboratorium, sebagai contoh diperlukan tes untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas tegak lurus serat dan rasio poisson.
3. Analisis metode elemen hingga (*ADINA*) dengan menggunakan prediksi *COD* berdasarkan hasil uji eksperimental dapat digunakan dengan akurat untuk memprediksi penjaralan retak pada model benda uji pola kegagalan fraktur ragam I.
4. Kurva tahanan (*resistance curve*) dengan model linier berguna untuk mengetahui mekanisme penguatan dari suatu material. Hal ini dilakukan karena perangkat lunak *ADINA* tidak memiliki fitur kurva tahanan nonlinier yang menunjukkan kondisi benda uji yang sebenarnya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbedaan %-relatif nilai *fracture toughness* simulasi *ADINA* terhadap perhitungan analitis berkisar antara 0,2% - 25,23%.
5. Simulasi *ADINA* model benda uji kayu Mersawa memberikan hasil prediksi penjaralan retak sebesar 80,77 mm. Hasil tersebut sangat akurat dengan perbedaan %-relatif sebesar 0,97% terhadap hasil uji eksperimental sebesar 80 mm.
6. *Fracture toughness* merupakan properti material, maka tidak tergantung bentuk dan geometri struktur. Nilai *fracture toughness* diambil sama dengan nilai faktor intensitas tegangan kritis, sebagai kriteria terjadinya penjaralan retak.

DAFTAR PUSTAKA

- ADINA R&D, Inc. (2005). *ADINA Theory and Modelling Guide*. Volume 1. ADINA R&D, Inc., USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2002). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. ASTM Standard D143-94, Annual Book of ASTM Standards v4.10, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Forest Products Laboratory. (1999). *Wood Handbook Wood As An Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-113, Forest Products Laboratory, United States Departments of Agriculture.
- Grandt, Jr., A.F. (2004). *Fundamental of Structural Integrity*, John Wiley & Sons.
- Mirzaei, M. (2006). *Fracture Mechanics – Lecturer Notes*, Department of Mechanical Engineering, TMU, url: <http://www.modares.ac.ir>, April 2008.
- Pranata, Y.A. (2008). “Studi Perbandingan Kuat Fracture Material Ortotropik dari Uji Eksperimental dengan Analisis Metode Elemen Hingga.” *Seminar Bidang Kajian 2*, Tidak dipublikasikan, Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Parahyangan, Bandung.
- Saouma, V.E. (2000). *Lecture Notes in: Fracture Mechanics*. Department of Civil Engineering and Architectural Engineering University of Colorado, Boulder, CO 80309-0428.

- Smith, I., Landis, E., Gong, M. (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*. John Wiley & Sons, New York.
- Standar Nasional Indonesia. (2000). *Tata Cara perencanaan Struktur Kayu Untuk Bangunan Gedung - SNI 03-xxxx-2000*, Standar Nasional Indonesia.
- Tjondro, J.A. (2007). "Perilaku Sambungan Kayu dengan Baut Tunggal Bepelat Sisi Baja Akibat Beban Uni-Aksial Tarik." Disertasi, Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.