

# PERBANDINGAN KUAT TEKAN KOLOM KAYU KAMPER ANTARA PENAMPANG *HOLLOW* DAN SOLID

Handika Setya Wijaya<sup>1</sup>, dan Blima Oktaviastuti<sup>2</sup>  
1, 2) Dosen Universitas Tribhuwana Tunggaladewi, Jl. Telaga Warna, Tlogomas,  
Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang  
E-mail: handika.civilunitiri@gmail.com ; [blima.oktavia@ymail.com](mailto:blima.oktavia@ymail.com)

**ABSTRAK:** Pertambahan jumlah penduduk pada tiap tahun menyebabkan kebutuhan material juga semakin meningkat. Manusia membutuhkan tempat tinggal dan secara tidak langsung membutuhkan kayu sebagai salah satu bahan materialnya. Semakin bertambah tahun, kualitas dan kuantitas pasokan kayu dari hutan alam guna memenuhi kebutuhan pembangunan juga semakin menurun. Penelitian rekayasa tentang kayu hollow merupakan salah satu solusi pemenuhan kebutuhan kayu utuh (solid) berdiameter besar. Penelitian ini bertujuan mengungkapkan: (1) pengaruh perbedaan nilai P kritis kolom panjang pada kayu hollow dan solid dengan luas penampang (A) sama, (2) pola grafik hubungan momen inersia (I) dan P kritis pada kolom panjang. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen yang akan menggali data mengenai kuat tekan kolom kayu kamper hollow dan solid pada kolom panjang. Uji kuat tekan sejajar serat, modulus elastisitas, dan kadar air kayu kamper dilakukan secara langsung. Hasil uji laboratorium kolom kayu (eksperimen) terbentuk diagram antara momen inersia (I) dan P kritis (Pcr) yang akan dibandingkan dengan perhitungan analitis. Hasil penelitian disimpulkan bahwa berdasarkan hasil pengujian kolom kayu hollow dan solid memiliki kecenderungan bahwa kekuatan kolom hollow lebih besar dibanding kolom solid, di mana momen inersia (I) kolom hollow lebih besar daripada kolom solid. Pola grafik hubungan antara momen inersia (I) dan P kritis menunjukkan bahwa semakin besar momen inersia (I), semakin meningkatkan nilai P kritis kolom kayu pada hasil pengujian selama tidak terjadi local buckling. Selanjutnya, terdapat perbedaan hasil pengujian dan hasil perhitungan analitis untuk P kritis kolom kayu hollow dan solid masih dalam batasan teori yang ada, walaupun terdapat hasil yang tidak sesuai karena berbagai faktor seperti cacat kayu.

**Keywords :** Gaya Tekan, Kolom Kayu Hollow , Momen Inersia

## 1. PENDAHULUAN

Pertambahan jumlah penduduk pada tiap tahun menyebabkan kebutuhan material juga semakin meningkat. Manusia membutuhkan tempat tinggal dan secara tidak langsung membutuhkan kayu sebagai salah satu bahan materialnya. Penggunaan kayu dapat digunakan sebagai komponen struktural dan non struktural pada konstruksi bangunan. Adanya kemajuan teknologi, sebenarnya telah memberikan alternatif material selain kayu. Namun, kondisi dilapangan menunjukkan bahwa material kayu belum sepenuhnya dapat tergantikan.

Kebutuhan kayu yang tinggi belum di imbangi dengan masih kurangnya perilaku reboisasi dan masih maraknya pembalakan liar. Semakin bertambah tahun, kualitas dan kuantitas pasokan kayu dari hutan alam guna memenuhi kebutuhan pembangunan juga semakin menurun. Dari delapan provinsi sejak 2004-2012 terjadi 2.494 kasus pembalakan liar di lahan perkebunan dan pertambangan ilegal dengan total kerugian Rp276,4 triliun dan kerusakan hutan 41 juta hektar yang disumbang dari pembalakan liar [1].

Pembalakan liar merupakan salah satu penyebab sulitnya mencari kayu yang berukuran besar dan berkualitas tinggi di pasaran. Adanya kecenderungan untuk mengembangkan kayu dengan kualitas rendah menjadi salah satu upaya pemenuhan kebutuhan. Penggunaan metode yang tepat juga dibutuhkan agar efisiensi dan optimalisasi penggunaan kayu dapat diperoleh. Khususnya dalam aplikasi struktur bangunan yang membutuhkan kajian metode disertai syarat-syarat konstruksi sebelum kayu digunakan.

Penelitian rekayasa tentang kayu *hollow* merupakan salah satu solusi pemenuhan kebutuhan kayu utuh (solid) berdiameter besar. Kolom kayu *hollow* merupakan lembaran kayu gergajian yang direkatkan sedemikian rupa sehingga terbentuk komponen struktur panjang, langsing dan dibebani secara aksial tekan yang di tengah penampangnya berlubang. Penelitian ini dilatar belakangi beberapa hasil penelitian terdahulu yang sebagian besar mengkaji optimalisasi penggunaan bahan kayu konstruksi ditinjau dari kemampuan menahan berbagai gaya.

Jumaat (1991) meneliti metode numerik seserhana untuk prediksi beban tekuk kolom kayu *built-up* yang bertujuan menambah kekuatan dan kepraktisan [2]. Dyer (1992) menghasilkan penelitian terkait kekuatan dan efisiensi kolom kotak kayu bervariasi, tergantung dari panjang kolom dan jumlah paku yang digunakan [3]. Harries, dkk (2000) menelitian stabilitas dimensi arah longitudinal kolom *built-up* lebih tinggi dibanding kayu padat dengan dimensi yang lebih besar [4]. Tjondro, dkk (2008) meneliti kuat lentur balok penampang tersusun *box* dari papan kayu sengon dengan alat sambung paku [5]. Kimble, dkk (2010) meneliti stabilitas *built-up* balok dan kolom kayu *built-up* dengan alat sambung paku, baut atau sekrup didasarkan pada teori statistik yang menjelaskan pengurangan variabilitas terhadap stabilitas desain yang lebih efisien [6].

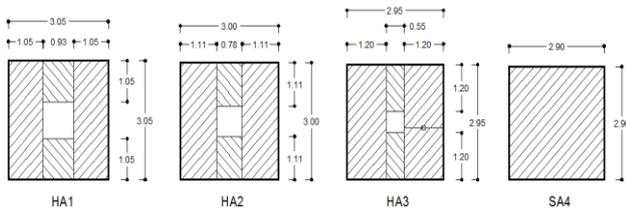
Penelitian ini bertujuan mengungkapkan: (1) pengaruh perbedaan nilai P kritis kolom panjang pada kayu *hollow* dan solid dengan luas penampang (A) sama dan (2) pola grafik hubungan momen inersia (I) dan P kritis pada kolom panjang.

**2. METODE PENELITIAN**

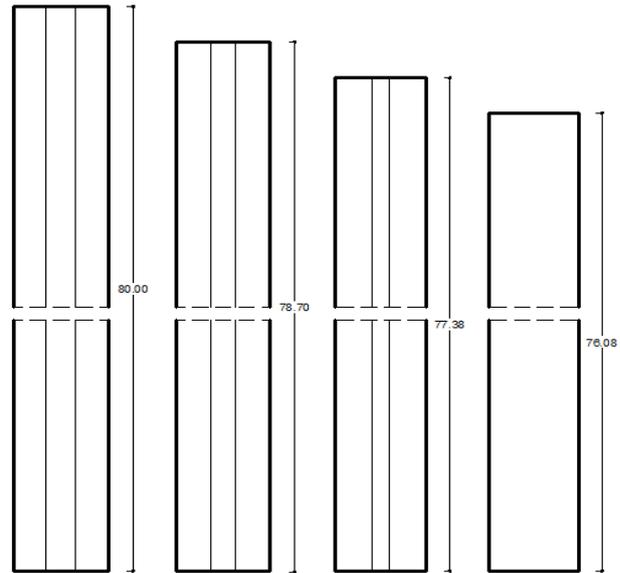
Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen yang akan mengali data mengenai kuat tekan kolom kayu kamper *hollow* dan solid pada kolom panjang. Hasil uji laboratorium kolom kayu (eksperimen) menghasilkan diagram antara momen inersia ( $I$ ) dan  $P$  kritis ( $P_{cr}$ ) yang akan dibandingkan dengan perhitungan analitis.

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai  $P$  kritis kolom kayu kamper *hollow* dan solid. Variabel bebas yaitu dimensi dan ketebalan dinding khususnya kolom kayu *hollow*. Variabel kontrol yaitu penggunaan bahan perekat campuran antara *Urea Formaldehyde*,  $NH_4Cl$ , dan tepung terigu untuk seluruh benda uji, serta metode perekatan dengan pengempaan dingin.

Bahan utama pembuatan benda uji adalah kayu kamper dengan ciri-ciri warna coklat kemerah-merahan, arah serat lurus, dan tekstur kayu agak kasar. Kayu kamper berukuran 6cm x 15cm panjang 3m dilakukan pengeringan secara alami (*air drying*) sebelum proses perekatan, serta diletakkan di tempat kering dan terlindungi dari hujan. Perekat yang digunakan pada penelitian ini adalah *Urea Formaldehyde* (UA-181). Bahan perekat ini memerlukan campuran guna meningkatkan kekuatan perekatan yaitu pengeras (*hardener*) berupa bubuk  $NH_4Cl$  (HU-12) dan pengembang (*extender*) berupa tepung terigu. Perbandingan berat perekat Urea Formaldehyde,  $NH_4Cl$ , dan tepung terigu adalah 300:1:50. Pada pelaksanaannya, kayu kamper yang sudah berbentuk papan (*lumber*) dihubungkan (direkatkan) dengan papan kayu kamper lainnya sehingga membentuk kolom *hollow*. Lain halnya dengan kolom solid yang tidak memerlukan proses perekatan. Dimensi penampang dan panjang kolom masing masing variasi dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.



**Gambar 1. Dimensi Penampang dan Ketebalan Dinding Kolom Kayu Masing-Masing Variasi**



**Gambar 2. Panjang Kolom Kayu Masing-Masing Variasi**

Peralatan yang digunakan dalam pembuatan benda uji dan untuk pengujian digunakan alat UTM (*Universal Testing Material*). Luaran data yang dicatat adalah  $P$  kritis yang dicapai oleh masing-masing variasi kolom. Setelah bahan dan alat penelitian tersedia, langkah selanjutnya adalah membuat benda uji dan melakukan pengujian. Bahan kayu kamper diuji fisis untuk mengetahui nilai kadar air ( $w$ ), sedangkan uji mekanis digunakan untuk mengetahui nilai modulus elastisitas ( $E$ ) dan kuat tekan sejajar serat ( $\sigma_{tk//}$ ). Pada uji kadar air dan kuat tekan sejajar arah serat mengikuti SNI ISO 3129: 2011 [7].

**3. HASIL**

**3.1 Hasil Eksperimen P Kritis Kolom Kayu Hollow dan Solid dengan Luas Penampang Sama**

Pada pengujian kuat tekan benda uji kolom kayu *hollow* dan solid, dihasilkan nilai kuat tekan maksimum atau yang disebut  $P$  kritis kolom. Ujung bagian atas kolom kayu ditumpu plat besi alat UTM dengan mendapatkan beban sentris yang menumpu pada seluruh permukaan kolom. Pengujian kuat tekan diperoleh nilai  $P$  kritis kolom kayu *hollow* dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. P Kritis Kolom Kayu Hollow dan Solid Hasil Eksperimen**

Kode Benda Uji	Dimensi			Luas Penampang	Momen Inersia		Beban Awal	Beban Akhir	P Kritis
	p	l	t		arah radial	arah tangensial			
a	b	c	d	$g = \frac{(c^4d)}{12}$	h	i	j	k	$l = k - j$
	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>	N	N	N
HA1-I	800,00	31,00	31,00	895,88	76460,34	76710,20	11700,00	23600,00	11900,00
HA1-II	800,00	31,10	31,10	896,81	77458,19	77616,60	11700,00	33700,00	22000,00
HA1-III	800,00	31,00	31,10	896,04	77562,45	76583,32	11700,00	24700,00	13000,00
Rata-Rata									15633,33
HA2-I	786,00	30,50	30,80	886,60	74651,82	71955,63	11700,00	20700,00	9000,00
HA2-II	786,00	30,60	30,90	890,34	75630,51	72875,28	11700,00	20800,00	9100,00
HA2-III	786,00	30,50	30,60	880,26	72755,71	71935,58	11700,00	25900,00	14200,00
Rata-Rata									14200,00
HA3-I	774,00	30,20	30,20	900,28	69270,04	69315,32	11700,00	23300,00	11600,00
HA3-II	774,00	30,00	29,90	881,64	66560,25	67491,26	11700,00	32900,00	21200,00
HA3-III	774,00	30,00	30,00	885,00	67447,92	67493,25	11700,00	27300,00	15600,00
Rata-Rata									16133,33
SA1V-I	760,00	28,60	28,30	809,38	53452,07	55754,88	11700,00	17000,00	5300,00
SA1V-II	760,00	28,50	28,00	798,00	51221,33	54979,17	11700,00	18000,00	6300,00
SA1V-III	760,00	28,50	28,30	806,55	53452,07	54979,17	11700,00	21600,00	9900,00
Rata-Rata									7166,67

**3.2 Hasil Analisis P Kritis Kolom Kayu Hollow dan Solid dengan Luas Penampang Sama**

Berdasarkan nilai kuat tekan sejajar arah serat dan nilai modulus elastisitas lentur kayu kamper, dilanjutkan perhitungan P kritis secara analitis dengan tumpuan jepit-jepit dan tumpuan sendi-sendi. Berdasarkan PKKI NI-5 (2002), nilai  $c=0,80$  untuk kayu solid dan  $c=0,90$  untuk kayu *glulam*. Perhitungan nilai P kritis untuk kayu *hollow* menggunakan pendekatan nilai  $c=0,90$  seperti kayu *glulam*. Hasil perhitungan diperoleh nilai P kritis rata-rata tumpuan jepit-jepit dengan kode benda uji HA I sebesar 26000,53 N; HA II sebesar 25489,88 N; HA III sebesar 25190,23 N; dan SA IV sebesar 21017,34 N. Sedangkan nilai P kritis rata-rata tumpuan sendi-sendi dengan kode benda uji HA I sebesar 14456,77 N; HA II sebesar 13083,46 N; HA III sebesar 12923,40 N; dan SA IV sebesar 10911,15 N.

**4. PEMBAHASAN**

Pembahasan dilakukan pada data-data hasil pengujian dan perhitungan yang telah dikemukakan sebelumnya seperti nilai P kritis kolom kayu hasil pengujian dan hasil perhitungan analitis serta sifat fisis dan mekanik kayu kamper.

**4.1 Hasil Eksperimen Nilai P Kritis Kolom Kayu Hollow dan Solid dengan Luas Penampang Sama**

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan terhadap benda uji kolom kayu *hollow* dan solid, semua jenis benda uji diambil rerata dari hasil setiap jenis benda uji kecuali kode benda uji HA II. Hasil yang digunakan sebagai rerata merupakan hasil dari benda uji yang berhasil mengalami *buckling* setelah pengujian sebanyak satu hasil dari tiga benda uji.

Dua benda uji lainnya mengalami kegagalan dikarenakan mencapai *buckling*. Kode benda uji HA II-I mengalami rusak karena cacat kayu yang ditandai perbedaan warna dan tekstur kayu yang agak kasar walaupun setelah mengalami proses pengetaman sebelum diuji. Tanda cacat kayu diketahui setelah kolom kayu patah setelah diuji, namun menghasilkan P kritis yang rendah dibanding kolom kayu sejenisnya. Sedangkan kode benda uji HA II-II mengalami rusak karena geser yang ditandai retak-retak pada kolom kayu di bagian ujung-ujungnya. Jadi kedua benda uji ini tidak digunakan sebagai perbandingan P kritis dengan perhitungan analitis. Maka, nilai rerata P kritis kode benda uji HA II adalah kode benda uji HA II-III yang mengalami *buckling*.

Besar tingkatan momen inersia rata-rata tiap benda uji dari yang terbesar kode HA I, HA II, HA III, dan yang terendah SA IV. Komponen struktur berlubang pada umumnya lebih ekonomis untuk digunakan sebagai kolom dibandingkan dengan komponen struktur solid yang mempunyai luas penampang yang sama (Gere dan Timoshenko, 1996: 238) [8]. Menurut Dyer, V (1992), sebuah kolom kotak (*box*) memiliki kekuatan hingga 1,75 kali kekuatan kolom padat, dan sampai tiga kali kekuatan sistem berlapis setara yang sesuai [3].

Berdasarkan teori tersebut, hasil pengujian memiliki kecenderungan bahwa kekuatan kolom *hollow* lebih besar dibanding kolom solid. Tetapi pada perbandingan momen inersia tiap benda uji terhadap nilai P kritis yang terjadi, benda uji HA I seharusnya memiliki nilai P kritis yang lebih besar dari semua benda uji. Perbedaan hasil P kritis eksperimen jika ditinjau dari teori yang ada akibat dari banyak faktor, seperti sifat fisis dan mekanik yang

berbeda pada tiap elemen kayu penyusun kolom kayu. Sifat-sifat tersebut meliputi kadar air, arah serat kayu, adanya mata kayu dan cacat kayu, serta pengaruh perusak kayu.

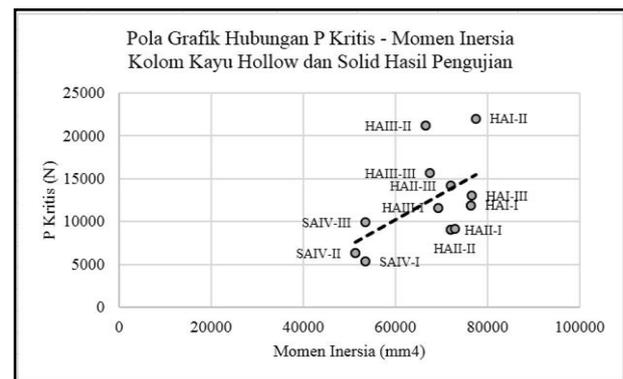
Kemungkinan faktor lain adalah kedataran permukaan tumpuan dan perletakan benda uji saat pengujian yang berakibat kerusakan kolom bukan karena tekuk (*buckling*), tetapi karena geser yang menyebabkan nilai P kritis belum terjadi secara maksimal. Hal ini ditandai dengan pola kelenturan yang terjadi pada daerah 1/3 bentang kolom kayu.

Pada benda uji dengan kerusakan karena geser, juga dimungkinkan akibat proses pelaburan perekat yang kurang merata dan pengencangan klem saat pengempaan tidak sempurna. Tetapi untuk kekuatan campuran perekat *Urea Formaldehyde*,  $NH_4Cl$ , dan tepung terigu dengan GPU (*gram pick up*)=60 MDGL pada keseluruhan benda uji kolom *hollow* secara umum layak digunakan, karena lebih banyak rusak pada kayu dibanding perekat.

**4.2 Pola Grafik Hubungan Momen Inersia dan P Kritis**

Pola grafik hubungan antara momen inersia (*I*) dan P kritis ditandai dengan pola garis yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pola grafik menunjukkan bahwa semakin besar momen inersia (*I*), nilai P kritis kolom kayu juga meningkat pada hasil pengujian. D.Kroll, dkk (1943) menyatakan penampang *hollow* persegi panjang memiliki nilai koefisien (*k*) yang membatasi ketebalan dinding penampang *hollow* sehingga tidak terjadi *local buckling*, yaitu kondisi di mana batang berpenampang *hollow* mengalami kerusakan dinding *hollow* sebelum terjadinya *global buckling* [9].

Jadi pola grafik yang dihasilkan dari hasil pengujian dengan asumsi bahwa semakin besar momen inersia (*I*), semakin meningkatkan nilai P kritis kolom kayu tidak ditemukan *local buckling* pada semua benda uji. Dengan kata lain, semua benda uji kolom kayu mengalami *global buckling*.



Gambar 3. Pola Grafik Hubungan P Kritis dan Momen Inersia Kolom Kayu Kamper *Hollow* dan Solid Hasil Pengujian

**4.3 Hasil Perhitungan Analitis Nilai P Kritis Kolom Kayu Hollow dan Solid dengan Luas Penampang Sama**

Hasil perhitungan analitis tumpuan jepit-jepit dan tumpuan sendi-sendi menghasilkan nilai P kritis yang berbeda. Pada perhitungan analitis dengan tumpuan jepit-jepit dan tumpuan sendi-sendi dengan nilai  $c=0,90$  untuk *glulam* dan  $c=0,80$  untuk solid menunjukkan bahwa

kolom *hollow* memiliki nilai P kritis lebih besar dibanding nilai P kritis kolom solid, di mana momen inersia kolom *hollow* lebih besar dibandingkan kolom solid.

Perhitungan analitis dipengaruhi oleh hasil pengujian mekanis kayu kamper yang digunakan sebagai bahan penyusun kolom kayu seperti kuat tekan sejajar arah serat ( $P_o'$ ) dan modulus elastisitas lentur ( $E_{05}'$ ). Pada perhitungan analitis juga didapatkan pola grafik hubungan antara momen inersia ( $I$ ) dan P kritis yang menunjukkan bahwa semakin besar momen inersia ( $I$ ), semakin tinggi nilai P kritis kolom kayu.

**4.4 Perbedaan Nilai P Kritis Kolom Kayu Hollow dan Solid dengan Luas Penampang Sama Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan Analitis**

Hasil penelitian dan perhitungan P kritis kolom kayu *hollow* dan solid didapatkan perbedaan hasil yang signifikan antara hasil pengujian benda uji dengan hasil analisis perhitungan. Pada dasarnya, nilai P kritis hasil pengujian harus berada di antara hasil perhitungan analitis tumpuan jepit-jepit dan tumpuan sendi-sendi. Hal ini disebabkan karena setting kolom kayu pada alat UTM berorientasi di antara tumpuan jepit-jepit dan sendi-sendi.

Jika terdapat perbandingan hasil pengujian yang tidak berada di antara hasil perhitungan analitis kedua jenis tumpuan, maka dimungkinkan adanya faktor lain yang menyebabkan nilai P kritis hasil perhitungan tidak sesuai dengan kondisi benda uji kolom kayu saat diuji. Perbedaan yang terjadi adalah pada nilai rerata P kritis kolom solid yang berada di bawah hasil perhitungan analitis tumpuan sendi-sendi yang merupakan batasan minimal P kritis dengan kondisi perhitungan pendekatan antara tumpuan jepit-jepit dan tumpuan sendi-sendi.

Penyebab ketidaksesuaian hasil pengujian dengan hasil perhitungan dimungkinkan adalah faktor cacat kayu yang mengakibatkan rendahnya nilai P kritis. Sedangkan perbedaan panjang benda uji juga berpengaruh terhadap rasio kelangsingan (*slenderness ratio*) kolom. Perbandingan antara hasil eksperimen dengan hasil analisis menggunakan tumpuan jepit-jepit dan sendi-sendi dapat dilihat pada Tabel 2.

Rasio kelangsingan antara perencanaan dan pelaksanaan pengukuran dimensi penampang dan panjang pada benda uji tidak menunjukkan perbedaan yang besar dengan tingkat kesalahan terbesar 5,19%. Dari hal tersebut dapat diasumsikan bahwa rasio kelangsingan pada pelaksanaan benda uji dengan hasil pengujian tidak terlalu berpengaruh besar.

Cacat kayu terjadi pada kode benda uji SA IV-I setelah pengujian dan serat kayu di dalamnya terlihat lapuk. Jadi secara garis besar perbedaan hasil pengujian dan hasil perhitungan analitis untuk P kritis kolom kayu *hollow* dan solid masih dalam batasan teori yang ada, walaupun terdapat hasil yang tidak sesuai karena berbagai faktor tersebut.

**Tabel 2. Perbandingan P Kritis Hasil Perhitungan Analitis dan Hasil Pengujian Eksperimen**

Kode Benda Uji	c	Momen Inersia	P Kritis		
			Analisis Tumpuan Jepit-Jepit	Pengujian Eksperimen	Analisis Tumpuan Sendi-Sendi
		mm <sup>4</sup>	N	N	N
HA I	0,90	76833,95	26000,53	15633,33	14456,77
HA II	0,90	71935,58	25489,88	14200,00	13083,46
HA III	0,90	67774,51	25190,23	16133,33	12923,40
SA IV	0,80	52708,49	21017,34	7166,67	10911,15

**5 KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian ini, diperoleh kesimpulan bahwa hasil pengujian kolom kayu *hollow* dan solid memiliki kecenderungan bahwa kekuatan kolom *hollow* lebih besar dibanding kolom solid, di mana momen inersia ( $I$ ) kolom *hollow* lebih besar daripada kolom solid. Jadi perbedaan ketebalan dinding kolom kayu berpengaruh terhadap P kritis pada kolom panjang. Kemudian, pola grafik hubungan antara momen inersia ( $I$ ) dan P kritis menunjukkan bahwa semakin besar momen inersia ( $I$ ), semakin meningkatkan nilai P kritis kolom kayu pada hasil pengujian selama tidak terjadi *local buckling*. Selanjutnya, terdapat perbedaan hasil pengujian dan hasil perhitungan analitis untuk P kritis kolom kayu *hollow* dan solid masih dalam batasan teori yang ada, walaupun terdapat hasil yang tidak sesuai karena berbagai faktor seperti cacat kayu.

**6 DAFTAR RUJUKAN**

Anonim. 2016. Illegal Logging di Malinau Rugikan Negara Rp 15 T. (Online). (<http://realita.co/>, diakses 22 Desember 2016)

Jumaat, M. 1991. Analysis of Built-up Timber Columns Using Matrix Progression Method. *Journal of Structural Engineering*, 117(7): 1911-1928.

Dyer, Van. 1992. Strength and Efficiency of Wood Box Columns. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 3: 716-722.

Harries, Kent. 2000. Structural Characterization of Built-Up Timber Columns. *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 6, No. 2: 58-65.

Tjondro, A. D. dan Fachmi. 2008. Kuat Lentur Balok Penampang Tersusun *Box* dari Papan Kayu Sengon. *Prosiding Simposium Nasional 1-Forum Teknologi Hasil Hutan (FTHH)*: 253-257.

Kimble, R. and Bender, D. 2010. Stability of Built-Up Timber Beams and Columns: Accounting for Modulus of Elasticity Variability. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 15(4): 272-277.

[7] Badan Standardisasi Nasional. 2011. *SNI ISO 3129-2011 Kayu-Metode Pengambilan Contoh dan Persyaratan Umum untuk Uji Fisis dan Mekanis (ISO 3129-1975, IDT)*. Jakarta: BSN.

Timoshenko, Gere. 1996. *Mekanika Bahan Jilid 2 Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.

Kroll, W.D., et. al. 1943. Chart For The Calculation of The Critical Stress For Local Instability of Columns With I, Z, Channel, and Rectangular-Tube Section. *NACA Wartime Report*, ARR No. 3K04.