

STUDI PARAMETRIK: KINERJA SEISMIC KOLOM KOMPOSIT EWECS (*ENGINEERING WOOD ENCASED CONCRETE-STEEL*) DENGAN BAJA PROFIL *KING CROSS*

Zev Al Jauhari^{1*}, Faisal Ananda², Fauzan³ dan Ruddy Kurniawan⁴

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bengkalis

Jln. Bathin Alam, Sungai Alam, Bengkalis, Provinsi Riau, Indonesia

^{3,4}Jurusan Teknik Sipil, Universitas Andalas

Limau Manis, Padang, Provinsi Sumatera Barat, Indonesia

*E-mail: zevaljauhari@polbeng.ac.id

Abstrak

Kolom komposit EWECS (*Engineering Wood Encased Concrete-Steel*) merupakan struktur komposit *hybrid* yang telah dikembangkan untuk zona seismik rendah dan tinggi. Studi eksperimental pada perilaku seismik kolom komposit EWECS telah dilakukan oleh Fauzan et. al, 2005. Untuk melengkapi dan memvalidasi hasil studi eksperimental, analisis numerik dilakukan pada kolom EWECS di bawah beban konstan aksial dan beban lateral siklik. Analisis berbasis metode elemen hingga ini dilakukan untuk mengetahui kinerja struktural kolom EWECS menggunakan baja profil *king cross* dan dibandingkan dengan hasil eksperimental. Analisis numerik menggunakan program ANSYS APDL v.14, untuk mengetahui perilaku seismik struktur kolom berupa karakteristik histeresis, distribusi tegangan utama, dan mode kegagalan. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa kolom EWECS memiliki kinerja yang sangat baik tanpa kerusakan parah, bahkan pada *story drift* akhir, R 5%. Kayu panel berkontribusi terhadap kapasitas kolom hingga R 5%, meskipun retak pada kayu muncul setelah R 3%. Secara umum, distribusi tegangan pada model FE dapat mewakili mode kegagalan spesimen kolom dengan baik. Analisis numerik studi parametrik juga dilakukan pada kolom komposit EWECS. Berdasarkan analisis studi parametrik, semakin besar tebal kayu maka semakin meningkat kinerja seismik kolom, namun besarnya disipasi energi cenderung tetap. Semakin tinggi mutu beton maka semakin meningkat kinerja seismik kolom, namun gaya geser maksimum hanya mengalami sedikit kenaikan.

Kata kunci: Kolom Komposit, *Engineering Wood Encased Concrete-Steel*, Analisis Elemen Hingga, ANSYS, dan Kinerja Seismik

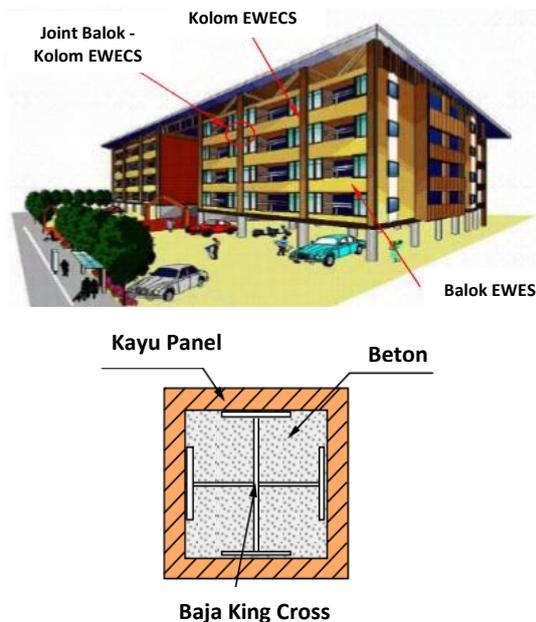
PENDAHULUAN

Material kayu sudah sangat populer digunakan sebagai elemen struktur. Banyak bangunan gedung yang dibuat dari kayu karena material ini ramah lingkungan dan mempunyai nilai estetika dan keindahan. Sebuah sistem struktur hybrid kayu telah diteliti dan dikembangkan, yaitu sistem struktur *Engineering Wood Encased Concrete-Steel* (EWECS). Kolom komposit EWECS adalah struktur kolom komposit yang terdiri dari *core* beton yang membungkus baja (CES) dan lapisan kayu panel sebagai penutup, dengan penampang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Keuntungan ekonomi dan struktural dapat diwujudkan pada tipe kolom komposit ini. Beton pada struktur komposit ini berfungsi untuk menahan tekuk lokal baja dan meningkatkan daktilitas struktur. Penggunaan panel kayu pada struktur ini memiliki beberapa manfaat. Selama konstruksi, kayu panel berfungsi sebagai pembentuk (bekisting) kolom, mengurangi pekerjaan dan kebutuhan

material konstruksi sehingga mengurangi biaya konstruksi. Dari segi struktural, kayu panel dapat meningkatkan perilaku struktur pada kolom melalui aksinya memberikan ikatan pada *core* serta menahan momen lentur, gaya geser, dan tekuk. Keuntungan ini membuat kolom komposit EWECS bisa diterapkan sebagai sebuah alternatif kolom SRC, yang mempunyai kelemahan karena sulit pada proses konstruksi. Serangkaian studi eksperimental terhadap kinerja seismik kolom EWECS yang dikenakan beban aksial konstan dan beban lateral siklik sebagai simulasi gempa telah dilakukan oleh Fauzan, et al., 2005 di laboratorium dari Toyohashi University of Technology (TUT) Jepang.

Pada dasarnya, studi eksperimental sangat ideal untuk mempelajari perilaku dan kegagalan struktur. Namun, studi ini dapat memakan waktu dan biaya yang mahal. Selain itu, studi eksperimental juga membutuhkan fasilitas yang memadai, ruang, pengaturan dan setting alat, dan tenaga kerja. Jika dilakukan dengan benar, analisis elemen

hingga dapat menjadi alternatif ampuh dan menarik sebagai pengganti dan validator untuk pengujian eksperimental. Hal ini mendasari penulis untuk mengembangkan model elemen hingga menggunakan software ANSYS APDL v14 untuk memprediksi respon dan perilaku seismik kolom komposit EWECS akibat beban lateral siklik. Perangkat lunak ini telah terbukti keandalannya dalam banyak penelitian dan dianggap cocok untuk kasus ini. Model dikembangkan dengan mempertimbangkan perilaku nonlinier material. Hasil yang diperoleh dari analisis elemen hingga diverifikasi dengan hasil tes eksperimental yang dilakukan oleh Fauzan et al.. Studi parametrik juga dilakukan untuk menyelidiki pengaruh material (kuat tekan beton dan ketebalan panel kayu) terhadap kinerja kolom komposit EWECS.



Gambar 1. Gedung dengan sistem struktur dan penampang kolom komposit EWECS [1]

MATERIAL DAN PERMODELAN

MATERIAL PROPERTIES

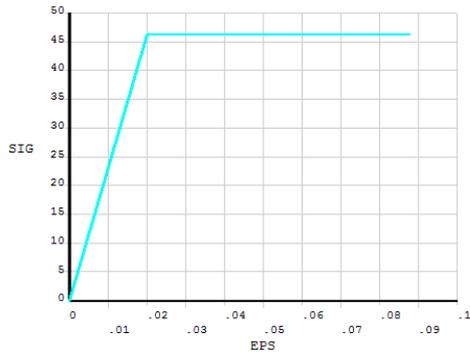
Untuk menganalisis dan memperoleh hasil yang akurat dari perilaku seismik struktur kolom komposit EWECS, sifat material (*material properties*) yang akurat dan koefisien yang relevan harus didefinisikan dengan baik dalam model FE. Komponen struktur ini terdiri dari material berikut: beton, baja, kayu panel, dan pelat baja (perletakan dan pembebanan). Rekapitulasi material properties, model konstitutif, dan koefisien-koefisien untuk setiap

elemen yang diinputkan pada program ANSYS ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi *Material Properties* Setiap Elemen

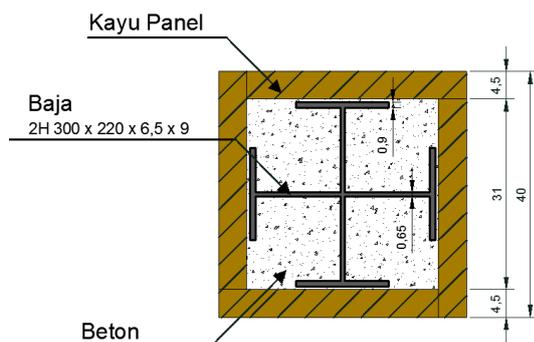
NM	Material Properties	
1	Beton	
	Modulus Elastisitas (N/mm ²)	28000
	Poisson Rasio	0.2
	Koef. geser untuk retak terbuka	0.75
	Koef. geser untuk retak menutup	0.90
	Kuat tarik uniaxial (N/mm ²)	1.8
	Kuat tekan uniaxial (N/mm ²)	35
Model Konstitutif :		
2	Baja Flange	
	Modulus Elastisitas (N/mm ²)	146800
	Poisson Rasio	0.3
	Tegangan Leleh (N/mm ²)	293.6
	Modulus tangen	0
Model Konstitutif :		
3	Baja Web	
	Modulus Elastisitas (N/mm ²)	156700
	Poisson Rasio	0.3
	Tegangan Leleh (N/mm ²)	313.3
	Modulus tangen	0
Model Konstitutif :		
4	Kayu Panel	

Modulus Elastisitas (N/mm ²)	13700
Poisson Rasio	0.38
Koef. geser untuk retak bukaan	0.35
Koef. geser untuk retak menutup	0.50
Kuat tarik uniaxial (N/mm ²)	5
Kuat tekan uniaxial (N/mm ²)	46.2
Model Konstitutif :	



MODEL NUMERIK 3D KOLOM KOMPOSIT EW ECS

Model FE tiga dimensi yang dibuat pada penelitian ini mereplikasikan kolom komposit EW ECS dalam program eksperimental. Detail dan dimensi penampang kolom EW ECS dengan baja profil *king cross* ditunjukkan pada Gambar 2. Kolom EW ECS memiliki tinggi 1600 mm dengan luas penampang total 400 x 400 mm. Perangkat lunak ANSYS APDL v14 digunakan untuk membangun geometri model, memproses model numerik menggunakan metode elemen hingga, dan melihat hasil (baik pra maupun pasca-*processing*).

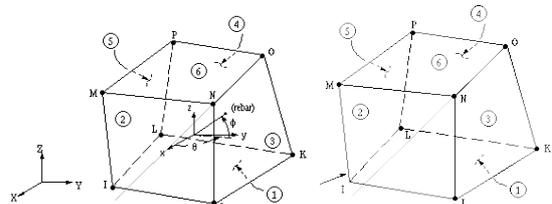


Gambar 2. Detail dan dimensi penampang kolom komposit EW ECS

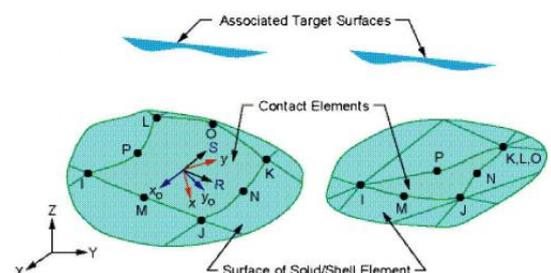
Elemen solid digunakan untuk memodelkan seluruh material pembentuk kolom komposit EW ECS (beton, baja profil, dan kayu). Elemen solid65 dan solid185, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, digunakan untuk model FE, dimana elemen-elemen ini merupakan elemen solid isoparametric berdasarkan interpolasi linear

dan integrasi Gauss. Elemen Solid65 dapat mendefinisikan sifat material linear isotropik dan multi-linear isotropik untuk model beton. Model material beton adalah elemen yang sesuai untuk material getas (*brittle*) dan quasi-brittle. Elemen ini dapat mengkarakterisasi distribusi retak serta mampu retak pada tegangan tertentu dan hancur akibat gaya tekan. Elemen ini didefinisikan oleh delapan node dengan tiga derajat kebebasan pada setiap node: arah x, y, dan z. Aspek yang paling penting dari elemen ini adalah *treatment* pada sifat material nonlinear. Elemen Solid185 digunakan sebagai elemen pembentuk baja dan kayu. Solid185 juga digunakan untuk model tiga dimensi pada struktur solid. Elemen ini terdiri dari delapan nodal dengan tiga derajat kebebasan pada masing-masing nodalnya, yaitu translasi pada arah x, y, dan z. Elemen ini memiliki kapabilitas plastisitas, tegangan kekakuan, defleksi dan regangan yang besar [5].

Model numerik pada penelitian ini dianggap *perfectly-bonded* untuk setiap *interface* material pada pertemuan baja profil dengan beton. Sedangkan pertemuan permukaan kayu dengan beton yang mengalami kontak, dibuatkan model *interface*-nya. Asumsi ini berlaku karena pada hasil eksperimen terjadi slip dan pemisahan yang terjadi pada masing-masing material. Elemen Conta174 and Targe170 digunakan untuk model *interface*, dimana Conta174 diletakkan pada material beton, sedangkan Targe170 pada material kayu. Elemen ini memiliki delapan node seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Analisis numerik menetapkan tegangan normal diubah menjadi nol jika terjadi pemisahan antara permukaan dalam kontak [6].



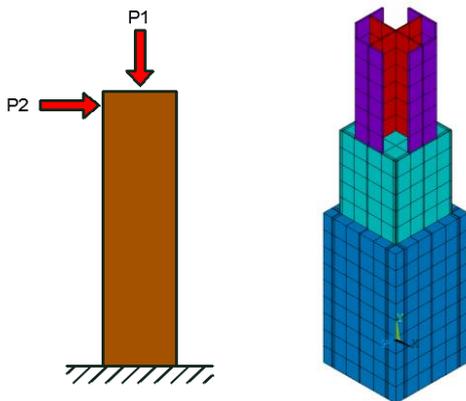
Gambar 3. Elemen solid65 dan solid185 [4]



Gambar 4. Elemen conta174 dan targe170 [4]

MESHING

Pada penelitian ini, ukuran mesh yang berbeda diuji untuk menentukan mesh yang tepat sehingga akan memberikan hasil yang akurat dengan waktu proses perhitungan yang lebih sedikit. Kerapatan mesh yang digunakan pada analisis numerik ini mempertimbangkan *aspect ratio* elemen. Nilai *aspect ratio* yang digunakan rata-rata hampir sama dengan satu. Hal ini dilakukan agar pemodelan kolom komposit memiliki hasil yang akurat, berimbang, dan memadai dalam waktu komputasi. Gambar 5 menunjukkan meshing kolom komposit EWECS dengan jumlah elemen yang digunakan adalah 4420.



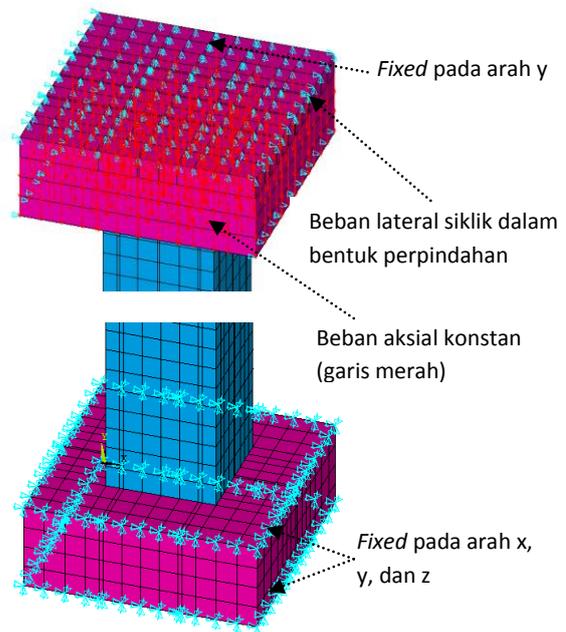
Gambar 5. Meshing model 3D kolom EWECS

SYARAT BATAS

Syarat batas (*Boundary conditions*) digunakan untuk mensimulasikan kondisi eksperimental. Mengacu pada *setup* spesimen eksperimental, kondisi batas yang digunakan dalam analisis numerik ini menggunakan pelat angkur baja dengan ukuran 700 x 700 x 400 mm pada bagian atas dan bawah kolom. Nodal di pelat baja bawah kolom diberikan tahanan translasi horizontal dan vertikal (*fixed/jepit*) pada seluruh arah derajat kebebasan (arah x, y, dan z). Selama analisis, ditemukan bahwa hasil yang sensitif terhadap kondisi batas di pelat angkur baja di atas kolom. Terjadi perpindahan arah vertikal (arah y) pada pelat baja tersebut, baik arah positif maupun negatif, saat proses pembebanan berlangsung. Untuk mencegah perpindahan ini, penyempurnaan khusus dari kondisi batas

di permukaan pelat baja atas kolom dilakukan dengan memberikan tahanan translasi pada arah y (rol).

Kondisi batas akhir (*boundary conditions*) dan metode pembebanan yang diterapkan pada model FE ditunjukkan pada Gambar 6. Nodal pada dua baris (paling atas dan paling bawah) pelat baja atas merupakan nodal yang diberikan beban displacement. Ini dipilih untuk memastikan semua elemen pada pelat angkur baja atas bergerak bersama-sama. Kondisi batas yang sama berlaku untuk semua siklus pembebanan.



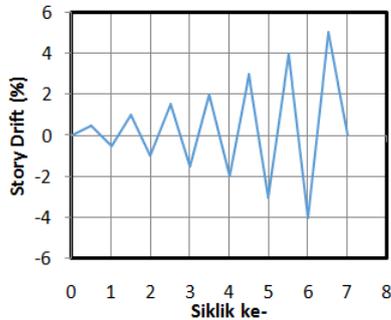
Gambar 6. Syarat batas dan beban model kolom EWECS

BEBAN

Beban aksial konstan yang diaplikasikan pada model kolom adalah beban terpusat pada setiap nodal dengan nilai 770 kN. Beban aksial dikenakan di bagian atas kolom, tepatnya pada nodal pelat baja bagian atas. Hal ini diwakili dalam model FE dengan menerapkan tekanan 13 kN pada nodal sebanyak 544 di pelat baja angkur diatas kolom. Riwayat pembebanan lateral untuk model FE didasarkan pada story drift. Jumlah siklus berbeda dengan yang digunakan dalam program eksperimental.

Riwayat pembebanan lateral terdiri dari lima dasar siklus pada tingkat penyimpangan tertentu. Hal ini diwakili dalam model elemen hingga dengan menerapkan perpindahan dalam siklus pembebanan (load step) di tepi atas kolom. Siklus pembebanan dikendalikan

oleh story drift, $R = \delta/h$, yang didefinisikan sebagai rasio perpindahan lateral terhadap tinggi kolom. Urutan beban lateral terdiri dari satu siklus untuk setiap story drift, R 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 3%, 4%, dan diikuti oleh setengah siklus R 5%, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Beban lateral siklik

SOLUSI NONLINIER

Perpindahan siklik yang diterapkan pada model dibagi menjadi serangkaian kenaikan (*increments*) yang disebut *load steps* dan *load substeps*. Pada setiap *increment* akhir solusi, program akan menyesuaikan matriks kekakuan model sebelum melanjutkan ke *load step* berikutnya untuk mencerminkan perubahan nonlinier pada kekakuan struktur model. Untuk memprediksi dan mengontrol ukuran *increment* pada setiap *load step*, penulis menggunakan pilihan waktu step otomatis [5]. Saat analisis, kekakuan model diperbarui oleh iterasi kesetimbangan Newton-Raphson dengan default hingga 30 persamaan kesetimbangan. Perilaku konvergensi model tergantung pada respon nonlinier beton akibat regenerasi dan propagasi (penjalaran) retak, dan hilangnya kekakuan pada elemen-elemen tertentu setelah disipasi energi. Hal ini dapat menyebabkan perbedaan dan kegagalan yang akan mengarah pada penghentian analisis [6].

Dalam penelitian ini, kegagalan model FE didefinisikan ketika solusi dengan selisih perpindahan sebesar 0.01 mm tidak bertemu (tidak konvergen). Sehingga ANSYS akan memberikan pesan untuk menentukan perbedaan analisis karena besar defleksi melebihi batasan perpindahan program [7]. Kriteria konvergensi untuk setiap elemen didasarkan pada kekuatan, perpindahan, dan batas-batas toleransi kriteria konvergensi. Nilai standar dari toleransi konvergensi ANSYS yang dipilih adalah 5% untuk pengecekan perpindahan (default). Namun, konvergensi sulit dicapai dengan menggunakan nilai default karena perilaku yang nonlinier pada elemen

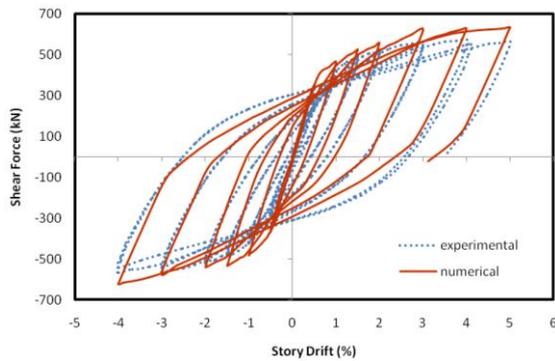
beton dan defleksi yang besar saat menerima beban siklik. Sehingga untuk mendapatkan konvergensi dari iterasi kesetimbangan, batas toleransi konvergensi ditingkatkan menjadi 10-15% untuk pengecekan kriteria perpindahan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

KARAKTERISTIK HISTERESIS

Perbandingan kurva gaya geser versus story drift hasil studi eksperimental dengan hasil FEM untuk model kolom komposit EWECS dapat dilihat pada Gambar 8. Pada gambar, garis merah menunjukkan hysteresis-loop model FE, sedangkan titik-titik biru menunjukkan spesimen eksperimental. Model FE memperlihatkan bentuk hysteresis-loop pipih yang stabil, daktail, dengan disipasi energi yang sedikit lebih kecil dari hasil eksperimental tanpa penurunan kapasitas hingga story drift maksimum, R 5% (disp. 80 mm). Kemiringan kurva pada model FE lebih curam dibandingkan dengan spesimen. Secara umum, hasil model FE sangat memuaskan dalam mewakili perilaku seismik kolom.

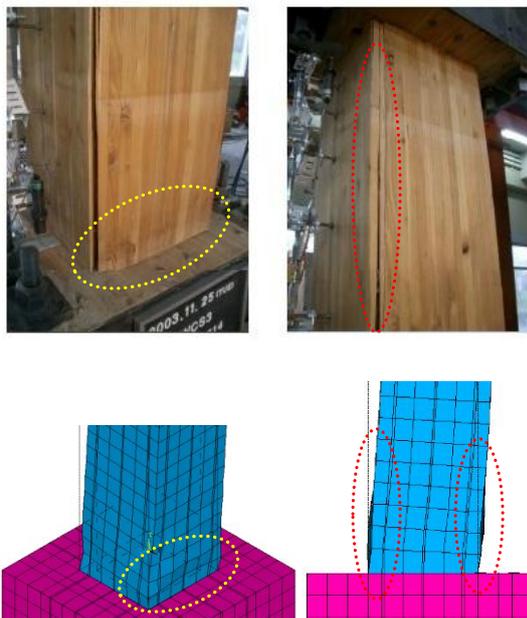
Kurva gaya geser vs story drift di atas mengilustrasikan perbedaan antara kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan disipasi energi pada spesimen dan model kolom. Pada studi eksperimental, gaya geser maksimum yang terjadi sebesar 573 kN saat R 4%, sedangkan pada model FE diperoleh saat R 5% dengan nilai 629 kN. Hasil ini adalah sekitar 9% lebih tinggi dari hasil yang diperoleh dari studi eksperimental. Disipasi energi dan kekakuan pada model FE juga lebih besar dibandingkan spesimen eksperimental, dengan selisih 4,6% dan 9,6%. Secara umum, perbandingan kurva gaya geser versus story drift studi numerik dan eksperimental cukup memuaskan karena menunjukkan perilaku seismik yang serupa. Model numerik lebih kaku dari model eksperimental. Hal ini umum untuk model numerik yang menyajikan kekakuan yang lebih tinggi karena dimodelkan dengan mengadopsi penyederhanaan dalam penciptaan geometri, penerapan beban, dan definisi syarat batas.



Gambar 8. Perbandingan kurva gaya geser vs story drift kolom EW ECS antara hasil studi eksperimental dan studi numerik

MODE KEGAGALAN

Pola kegagalan spesimen eksperimental kolom EW ECS digunakan sebagai referensi untuk memvalidasi model numerik. Tidak ada kerusakan yang diamati pada permukaan kolom spesimen hingga story drift, R 3%. Mekanisme kegagalan ini juga diamati pada model numerik. Gambar 9 menyajikan perbandingan bentuk kegagalan kayu panel spesimen eksperimental dan model FE saat story drift akhir, R 5%. Kegagalan pada kayu panel terlihat dengan jelas, baik pada spesimen eksperimental ataupun model FE, dimana kayu panel retak disepanjang sejajar arah serat dan bagian bawah hancur (tertekek keluar) akibat menahan beban siklik. Setelah pengujian, kayu panel dibuka sehingga dapat diamati bahwa beton *in-filled* hancur akibat lentur pada bagian atas dan bawah kolom dan tidak terjadi tekuk lokal pada baja pada model.

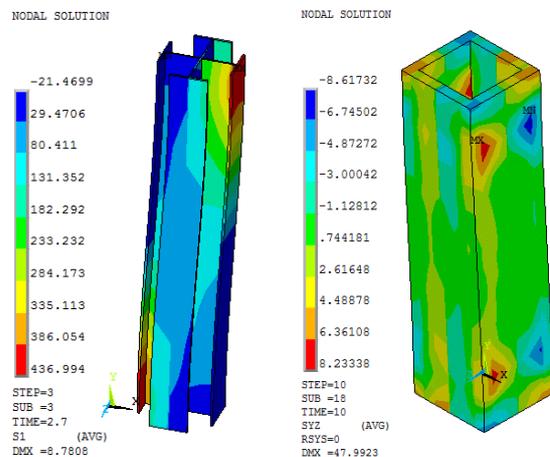


Gambar 9. Mode kegagalan kayu panel studi eksperimental dan numerik [3]

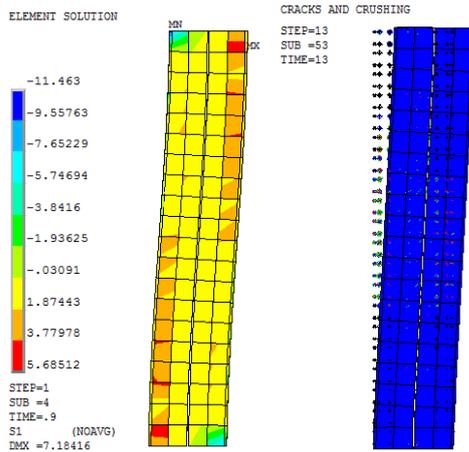
DISTRIBUSI TEGANGAN UTAMA

Tegangan utama pada model numerik kolom diamati pada masing-masing material untuk mengetahui besar tegangan yang terjadi disetiap step pembebanan serta memvalidasinya dengan data eksperimental. Pada studi eksperimental, saat story drift, R 0.76%, *encased steel* mengalami leleh pertama. Distribusi tegangan baja pada spesimen eksperimental dihitung berdasarkan regangan dari *strain gauges* yang dipasang di *flange* baja. Hal ini juga diamati pada model FE, dimana saat story drift, R 0.78%, leleh pertama terjadi pada material baja di bagian atas dan bawah *flange* (zona tarik) saat nilai regangannya lebih dari 0.002, seperti yang ditunjukkan pada warna merah dalam Gambar 10 (a). Dengan nilai modulus elastisitas material sebesar 206300 MPa dan atau tegangan leleh sebesar 412.5 MPa, tegangan leleh pada model FE sedikit lebih tinggi dari data eksperimental, yaitu bernilai 435 MPa.

Distribusi tegangan geser pada kayu panel menunjukkan bahwa tegangan geser maksimum pada model FE lebih tinggi dari kekuatan geser tangensial kayu normal yang ditemukan oleh Calderoni adalah rata-rata 7.44 MPa [8]. Tegangan geser maksimum di panel kayu kolom adalah sekitar 8 MPa, seperti yang ditunjukkan dalam bentuk oval pada Gambar 10 (b). Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pembentukan retak sepanjang penyambungan kayu panel dan menyebar sepanjang arah vertikal kayu. Tegangan geser yang lebih tinggi ini mengakibatkan retak geser.



Gambar 10. (a) Tegangan leleh pertama baja dan (b) tegangan geser pada kayu panel



Gambar 11. (a) Retak awal; dan (b) Retak dan crush beton pada story drift akhir

Pada material beton, retak (crack) pertama terjadi saat story drift, R 0.5% di zona *field* model FE yang ditandai dengan tegangan utama maksimum (tarik) lebih besar daripada kuat tarik beton (1,8 MPa). Retak akhir pada beton ditunjukkan pada Gambar 11 (a). Retak yang terjadi menyebar pada daerah *field* sepanjang arah diagonal. Hasil ini menunjukkan bahwa model numerik sangat memuaskan dalam menggambarkan perilaku kolom EWECS. Gambar 11 (b) memperlihatkan tegangan utama tekan beton saat story drift akhir. Pada gambar tersebut, terlihat nilai tegangan utama minimum (tekan) beton adalah 94 MPa pada bagian atas dan bawah beton.

STUDI PARAMETRIK

Dari hasil analisis di atas, disimpulkan bahwa analisis numerik dengan metode elemen hingga dapat memberikan prediksi yang akurat terhadap perilaku seismik kolom komposit EWECS. Sehingga dapat dilakukan studi parametrik untuk mengetahui pengaruh parameter yang diusulkan pada perilaku seismik kolom EWECS. Analisis studi parametrik yang dilakukan dengan simulasi numerik ini bertujuan untuk mengidentifikasi material mana yang memungkinkan untuk memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap kinerja kolom tersebut [9, 10].

Model numerik sebelumnya, yang divalidasi dengan hasil eksperimen, disebut sebagai model referensi pada analisis parametrik ini. Model referensi ini memiliki ketebalan kayu 45 mm dengan mutu beton normal 35 MPa. Variasi dalam setiap parameter direalisasikan untuk mengetahui pengaruh material (mutu dan dimensi penampang) terhadap kinerja seismik kolom

komposit EWECS. Ketebalan kayu panel ditambah untuk meningkatkan kapasitas, kekakuan, dan disipasi energi pada kolom, sedangkan kuat tekan beton ditingkatkan untuk meningkatkan kapasitas penampang kolom.

Studi parameter yang dilakukan adalah ketebalan kayu panel dan kuat tekan beton. Parameter ini dipilih karena pentingnya peran material tersebut dalam perlawanan struktur dan karena material ini bisa meningkatkan perilaku seismik tanpa mengubah dimensi kolom secara signifikan. Terdapat tiga nilai yang berbeda digunakan pada setiap parameter, seperti yang terlihat pada Tabel 2.

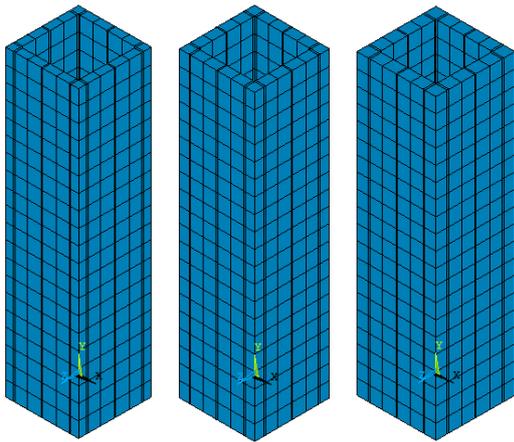
Tabel 2. Nilai studi parametrik

Parameter	Nilai
Ketebalan kayu panel	35 mm, 45 mm (R1), 55 mm
Mutu beton	35 MPa (R1), 50 MPa, 60 MPa

KETEBALAN KAYU PANEL

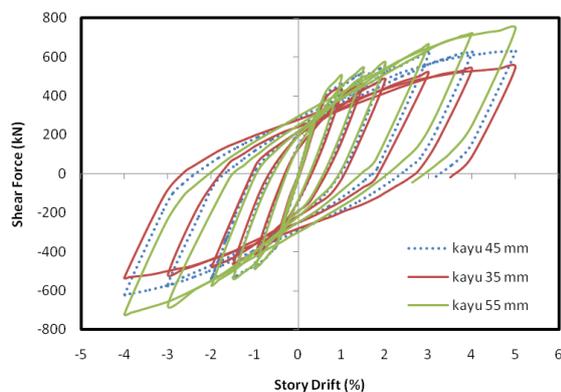
Kayu panel adalah komponen terluar kolom komposit EWECS yang berinteraksi dengan beton dan berkontribusi terhadap kapasitas lentur kolom. Ketebalan kayu panel yang diteliti bervariasi untuk mengevaluasi pengaruh parameter ini pada perilaku seismik kolom. Dimensi atau ketebalan kayu panel yang digunakan dalam analisis parametrik ini ditentukan/ berdasarkan spesifikasi code/peraturan di tingkat nasional, SNI 9426-2008 [11]. SNI tersebut menunjukkan bahwa ketebalan kayu panel berkisar 40-60 mm.

Nilai ketebalan kayu pada range tersebut ditentukan dan diverifikasi berdasarkan ketentuan kode. Sifat material dari kayu panel, seperti model konstitutif, kuat tarik, kuat tekan, dan modulus elastisitas, serta lebar dan tinggi yang digunakan pada analisis parametrik ini sama dengan model pada referensi. Tiga ukuran ketebalan kayu panel dengan ketinggian 1600 mm dipasang sebagai penutup. Gambar 12 menyajikan model FE dengan ketebalan kayu panel berbeda sesuai studi parameter.

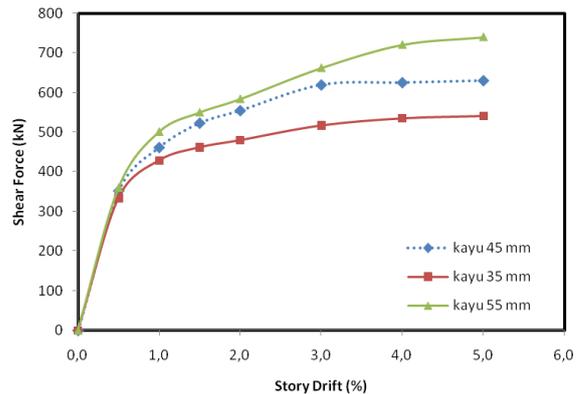


Gambar 12. Model FE kayu dengan perbedaan ketebalan

Perbandingan kurva gaya geser vs story drift untuk model FE kolom komposit EW ECS dengan variasi tebal kayu panel dapat dilihat pada Gambar 13. Setiap model memperlihatkan bentuk histeresis-loop pipih, stabil, dan daktail, tanpa penurunan kapasitas hingga *story drift* maksimum, R 5%. Pada gambar terlihat bahwa semakin besar tebal kayu maka semakin besar kemiringan kurva histeresis-loop. Kriteria seismik model FE ini dirangkum pada Tabel 3.



Gambar 13. Kurva gaya geser vs story drift kolom EW ECS dengan variasi ketebalan kayu panel



Gambar 14. Kurva gaya geser vs story drift monotonik kolom EW ECS dengan variasi ketebalan kayu panel

Tabel 3. Kriteria seismik kolom EW ECS dengan variasi ketebalan kayu panel

KS	35 mm (A)	45 mm (R1)	55 mm (B)	Kenai kan A (%)	Kenai kan B (%)
KL	541.1	630	740.3	-14.1	17.52
D	7.69	6.86	6.24	12.1	-9.12
DE	163.2	165.1	171	-1.2	3.56
K	7.45	8.68	10.14	-14.2	16.86

Note: KS = Kinerja Seismik; KL = Kapasitas Lateral (kN); D = Daktilitas; DE = Disipasi Energi (kJ); K = Kekakuan (kN/mm)

Model dengan ketebalan kayu 55 mm (Model B) memiliki kekakuan 16.8% lebih tinggi daripada model referensi (Model R1). Sedangkan model dengan ketebalan kayu 35 mm (Model A) memiliki kekakuan 14.2% lebih rendah daripada model referensi (R1). Peningkatan kekuatan beban lateral maksimum terjadi pada Model B sebesar 17.5%, namun menurun sebesar 14.1% pada Model A. Seiring dengan peningkatan tebal kayu, daktilitas model parametrik menurun. Hal ini terjadi karena kayu yang tebal dapat menunda terjadinya leleh pada *encased steel*. Model A memiliki disipasi energi 1.2% lebih rendah dari Model R1, sedangkan disipasi energi pada Model B 3.5% lebih besar dari Model R1. Dari hasil di atas, dapat disimpulkan bahwa semakin tebal kayu yang digunakan maka semakin meningkat kinerja seismik, terutama kekuatan lateral dan kekakuan kolom komposit EW ECS. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa ketebalan kayu panel memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perilaku seismik kolom.

Gambar 14 menunjukkan perbandingan kurva gaya geser vs story drift monotonik pada model FE kolom komposit EW ECS dengan

variasi tebal kayu. Nilai-nilai pada kurva ini ditentukan melalui gaya geser maksimum yang terjadi pada setiap drift positif pada kurva siklik. Pada gambar tersebut terlihat nilai gaya geser yang terjadi pada Model A di seluruh tahap pembebanan siklik lebih rendah daripada Model R1, dengan persentasi perbedaan 1-14%. Sedangkan pada nilai gaya geser di seluruh tahap pembebanan siklik pada Model B lebih tinggi daripada Model R1 dengan persentasi perbedaan 1-17%.

MUTU BETON

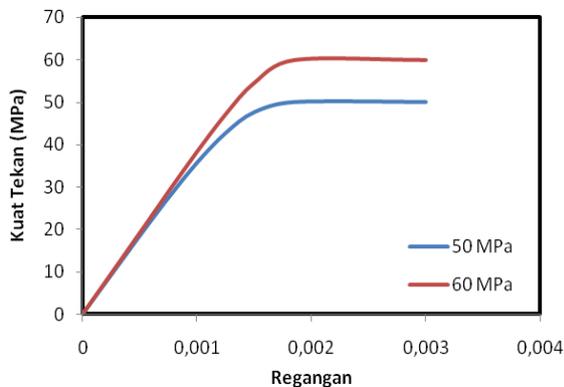
Kekuatan tekan beton yang digunakan pada studi parametrik ini didasarkan pada perbandingan perilaku seismik kolom komposit EWECS yang menggunakan beton mutu normal dengan beton mutu tinggi. Nilai kuat tekan untuk beton tinggi adalah 50 MPa dan 60 MPa. Fitur dari elemen struktur lainnya pada simulasi numerik analisis parametrik ini tetap konstan. Data terkait untuk analisis parametrik ini sama dengan analisis numerik referensi. Model konstitutif beton mutu tinggi menggunakan persamaan berikut [12]:

$$f_c = f'_c \left[\frac{\beta \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^\beta} \right] ; \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (1)$$

dimana:

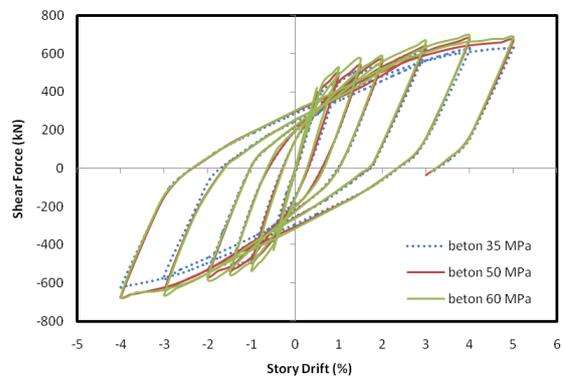
$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{\epsilon_0 E_{lt}}} \quad (2)$$

Nilai modulus elastisitas beton adalah $E_{lt} = 10300(f'_c)^{0,3}$ dan $\epsilon_0 = 0,0026$
 Model konstitutif untuk masing-masing beton mutu tinggi ditunjukkan pada Gambar 14.



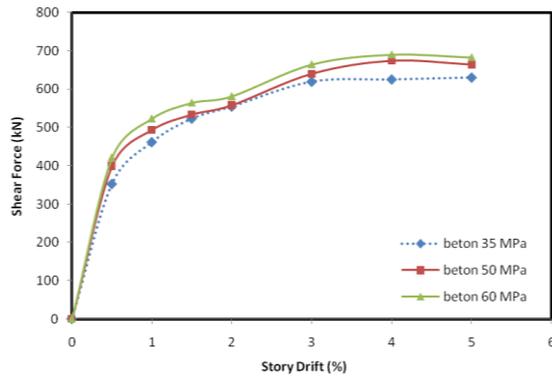
Gambar 14. Model konstitutif beton mutu tinggi 50 MPa dan 60 MPa

Perbandingan kurva gaya geser versus story drift untuk model FE kolom komposit EWECS dengan variasi mutu beton dapat dilihat pada Gambar 15. Setiap model memperlihatkan bentuk histeresis-loop pipih yang stabil, daktail, dengan kemiringan yang hampir sama dengan sedikit penurunan setelah *story drift*, R 4%. Model dengan kuat tekan beton 50 MPa (Model E) memiliki kapasitas beban lateral 6,68% lebih besar daripada model referensi (Model R1), sedangkan model dengan kuat tekan beton 60 MPa (Model F) memiliki kapasitas beban lateral sebesar 8,69% lebih besar daripada Model R1.



Gambar 15. Kurva gaya geser vs story drift kolom EWECS dengan variasi mutu beton

Seiring dengan peningkatan mutu beton, daktilitas model parametrik menurun. Hal ini terjadi karena mutu beton yang tinggi dapat menunda terjadinya leleh pada *encased steel*, seperti yang terlihat pada Tabel 4. Model E dan Model F memiliki kekakuan kolom lebih besar 5,33% dan 11,97% terhadap Model R1. Peningkatan mutu beton juga meningkatkan disipasi energi pada model parametrik sebesar 4,38% dan 10,4% untuk Model E dan Model F. Simulasi numerik parametrik ini menunjukkan beton mutu tinggi dapat meningkatkan kinerja seismik pada kolom komposit EWECS, namun tidak sebesar peningkatan pada studi parametrik tebal kayu panel.



Gambar 16. Kurva gaya geser vs story drift monotonik kolom EWECs dengan variasi mutu beton

Tabel 4. Kriteria seismik kolom EWECs dengan variasi mutu beton

KS	35 MPa (R1)	50 MPa (C)	60 MPa (D)	Kenai kan C (%)	Kenai kan D (%)
KL	630	675	689.9	6.68	8.7
D	6.86	6.45	5.88	-6.36	-16.7
DE	165.1	172.1	188.9	4.38	10.4
K	8.68	9.27	9.35	5.33	11.97

Note: KS = Kinerja Seismik; KL = Kapasitas Lateral (kN); D = Daktilitas; DE = Disipasi Energi (kJ); K = Kekakuan (kN/mm)

Gambar 16 menunjukkan perbandingan kurva gaya geser vs story drift monotonik pada model numerik kolom komposit EWECs dengan variasi mutu beton. Nilai-nilai pada kurva ini ditentukan melalui gaya geser maksimum yang terjadi pada setiap drift positif kurva siklik. Pada gambar tersebut terlihat nilai gaya geser yang terjadi pada model E dan model F di seluruh tahap pembebanan siklik model FE lebih tinggi daripada Model R1, dengan persentase perbedaan 1-7% dan 2-9%.

KESIMPULAN

Model numerik Kolom EWECs memiliki histeresis loop berbentuk pipih yang stabil dan daktail tanpa penurunan kekuatan hingga story drift akhir, dengan persentase perbedaan gaya geser maksimum hasil analisis numerik lebih besar daripada data eksperimental sebesar 9%. Distribusi tegangan pada model FE dapat merepresentasikan mode kegagalan spesimen dengan baik. Analisis Model FE dengan ANSYS dapat memberikan prediksi yang akurat terhadap perilaku Kolom EWECs yang sebenarnya, sehingga model numerik ini dapat dikembangkan dan dijadikan acuan untuk mengukur pengaruh variasi mutu dan dimensi

material terhadap perilaku seismik Kolom EWECs. Berdasarkan studi parametrik, semakin besar tebal kayu maka kinerja seismik kolom semakin meningkat, namun besarnya disipasi energi cenderung tetap. Kemudian, semakin tinggi mutu beton maka kinerja seismik kolom semakin meningkat, namun gaya geser maksimum hanya mengalami sedikit kenaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Kuramoto, H., and Fauzan. (2005). Feasibility study on engineering wood encased concrete-steel composite columns. Proc., 11th Int. Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering (11thICSGE), Ain Shams Univ., Cairo, Egypt.
- Fauzan, Kuramoto, H., Shibayama, Y. And Yamamoto, T. (2004). Structural Behaviour of Engineering Wood Encased Concrete-Steel Composite Columns, Proceedings of the Japan Concrete Institute (JCI), Vol. 26, No.2, pp.295-300.
- ANSYS Version 14.0. (2017) User and Theory Reference Manual.
- Hawileh, R.A. (2010). "Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam-coumn connection subjected to cyclic lads". Journal Applied Mathematical Modelling Sciencedirect 34, pp. 2562-2583.
- Pateriya, R., and Akhtar S. (2015). Finite Element Analysis of Different Types of Composite Column, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 5, Issue 5, pp. 173-179, India.
- Pagoulatou M., Shehan T., and Lam D. (2014). Finite Element Analysis on The Capacity of Circular Concrete-Filled Double-Skin Steel Tubular (CFDST) Stub Columns, Journal Engineering Structures Sciencedirect 72, pp. 102-112.
- Begum M., Driver R.G., and Elwi A.E. (2013). Behaviour of Partially Encased Composite Column with High Strength Concrete, Journal Engineering Structures Sciencedirect 56, pp. 1718-1727.
- Calderoni, C., Matteis, G. D., Giubileo, C., and Mazolani, F. M. (2006). "Flexural and shear behavior of ancient wood beams: Experimental and theoretical evaluation." J.

Struct. Eng., 28(5), 729–744.

Kuramoto, H., Li, B., Meas, K., and Fauzan. (2011). "Experimental and Analytical Performance Evaluation of Engineering Wood Encased Concrete-Steel Beam-Column Joints". *Journal of Structural Engineering ASCE*, pp. 822-833.

Marcela N. Kataoka, Ana Lúcia H.C. El Debs
Parametric study of composite beam-column connections using 3D finite element modelling. *Journal of Constructional Steel Research* 2014;102:136–149.

Badan Standardisasi Nasional, SNI 9426 : 2008.
Panel Kayu - Penentuan Dimensi Panel, Jakarta, 2008.

Leskes, A., Grambicka, S. (2013). "Theoretical and Experimental Studies on Composite Steel-Concrete Columns". *Concrete and Concrete Structures 2013 Conference. Procedia Engineering* 65 Sciencedirect, pp. 405 – 410.