

ANALISIS KAPASITAS BALOK KOMPOSIT DENGAN VARIASI TULANGAN PELAT TERHADAP KERUNTUHAN KOLOM MENGGUNAKAN APLIKASI MIDAS FEA

Richard Widjaya¹ dan Sunarjo Leman²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta
richard.325190089@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta
sunarjo@ft.untar.ac.id

Masuk: 15-07-2023, revisi: 29-07-2023, diterima untuk diterbitkan: 27-09-2023

ABSTRACT

Composite structure is a type of structure that is commonly used in the world of construction. As a structural system consisting of several constituent elements, failure can occur in elements or systems. The analysis was carried out by results comparison between research results in standard reference journals and the finite element modeling with MIDAS FEA program. The analysis model consists of 6 composite beams and columns represents interior side with 3 models represent sagging moments and 3 models represent hogging moments. The modification was carried out by adding the number of main and dividing reinforcement bar in top and bottom row of reinforced concrete slab. The analysis in MIDAS FEA program is carried out statically nonlinear with vertical loads in displacement approach. Analysis result shows that sagging composite structure has a higher capacity than hogging composite structure. Modification of the model which bears sagging moments did not provide a significant capacity increase in model with slab bar spacing of 150 mm by 1,22% and with slab bar spacing of 100 mm plates by 0,36%. However, the addition of number of reinforcement in composite structure which bears hogging moments gives a significant capacity increase in the model with slab bar spacing of 150 mm by 13,62% and with slab bar spacing of 100 mm by 9,82%. Capacity is reviewed as part of reinforced concrete slab that has cracked, especially around the stud shear connector and spread throughout others stud, so that composite action does not occur.

Keywords: Composite Structure; Composite Beam; Composite Column; Beam Column Joint; Capacity

ABSTRAK

Struktur komposit merupakan salah satu jenis struktur yang lazim digunakan dalam dunia konstruksi. Sebagai suatu sistem struktur yang terdiri atas beberapa elemen penyusun, kegagalan dapat terjadi, baik secara elemen maupun sistem. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil antara hasil penelitian dalam jurnal dengan standar acuan dan pemodelan elemen hingga dengan program MIDAS FEA. Model analisis sebanyak 6 buah balok-kolom komposit yang merepresentasikan sisi interior dengan 3 model mengakomodasi momen positif dan 3 model mengakomodasi momen negatif. Modifikasi dilakukan dengan penambahan jumlah tulangan utama dan pembagi pada baris atas dan baris bawah pelat beton bertulang. Analisis dalam program MIDAS FEA dilakukan secara nonlinear statik dengan beban secara vertikal berupa pendekatan perpindahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur komposit yang memikul momen positif memiliki kapasitas lebih tinggi dibandingkan dengan struktur komposit yang memikul momen negatif. Modifikasi model pada struktur komposit yang memikul momen positif tidak memberikan peningkatan kapasitas secara signifikan pada model dengan jarak antartulangan pelat 150 mm sebesar 1,22% dan pada model dengan jarak antartulangan pelat 100 mm sebesar 0,36%. Akan tetapi, penambahan jumlah tulangan pada struktur komposit yang memikul momen negatif memberikan peningkatan kapasitas cukup signifikan pada model dengan jarak antartulangan pelat 150 mm sebesar 13,62% dan pada model dengan jarak antartulangan pelat 100 mm sebesar 9,82%. Keruntuhan ditinjau dari bagian pelat beton bertulang yang sudah retak, terutama di sekitar stud dan tersebar ke seluruh stud, sehingga aksi komposit sudah tidak berlaku.

Kata kunci: Struktur Komposit; Balok Komposit; Kolom Komposit; Hubungan Balok Kolom; Kapasitas

1. PENDAHULUAN

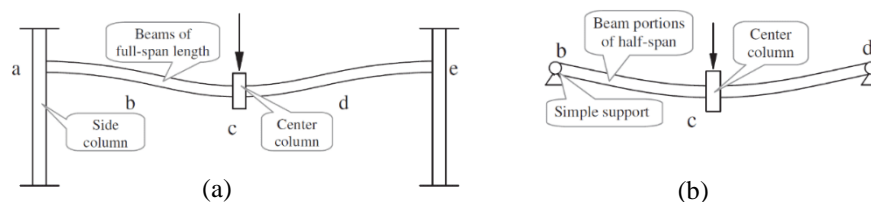
Latar belakang

Secara umum, jenis material yang digunakan dalam konstruksi terdiri atas (1) kayu, (2) baja, dan (3) beton bertulang. Material kayu alami, ringan, dan mudah dibentuk, Akan tetapi, material ini memiliki durabilitas lemah (terhadap kelembaban dan serangga) serta ukuran penampang terbatas. Material baja kuat tarik (daktail), bermutu tinggi, dan terkontrol dalam pembuatannya di pabrik. Akan tetapi, material ini memiliki durabilitas lemah (terhadap korosi dan suhu tinggi), berat, dan mahal. Material beton kuat tekan, tetapi tidak kuat tarik. Kombinasi kedua sifat material baja dan beton menghasilkan material komposit berupa beton bertulang. Jenis material ini merupakan insulator suhu yang baik, memiliki nilai redaman getar yang baik, dan mudah dibentuk dalam suatu cetakan ataupun dirakit dalam pelaksanaannya. Akan tetapi, diperlukan waktu yang lama untuk mencapai kekuatan tekan perlu dan diperlukan pengawasan yang baik di lapangan dalam perakitan, pencetakan, dan perawatannya. Tiap-tiap material ini memiliki keunggulan yang dapat diaplikasikan sesuai dengan jenis dan model kebutuhan konstruksi (Garrison, 2016). Di Indonesia, material beton bertulang yang paling umum digunakan dalam dunia konstruksi setelah material baja.

Suatu struktur bangunan rangka portal, yang salah satu aplikasinya digunakan untuk bangunan gedung, terdiri atas elemen balok, kolom, dan pelat. Ketiga elemen tersebut dapat tersusun atas satu material homogen, seperti bangunan struktur kayu (*timber*), ataupun material komposit yang terdiri atas berbagai jenis material, seperti (1) bangunan struktur portal baja (*steelwork*) dengan dek baja bergelombang yang dilapisi beton polos atau beton bertulang dan (2) bangunan struktur portal beton bertulang (*reinforced concrete*). Secara ideal, sistem struktur yang terdiri atas balok, kolom, dan pelat memiliki perilaku mekanisme penyaluran beban masing-masing yang bekerja sebagai satu kesatuan.

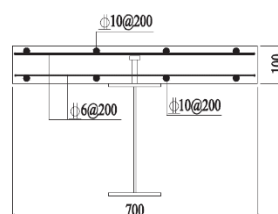
Sebagai suatu sistem struktur yang terdiri atas beberapa elemen penyusun, terjadinya kegagalan (*failure*) dapat terjadi akibat beberapa hal. Ketika terjadi kegagalan kolom, mekanisme pembebanan yang semula ditujukan pada kolom tersebut akan beralih ke bentang balok pada kiri-kanan kolom. Penyaluran beban berlebih tersebut bertujuan untuk mencegah terjadinya keruntuhan yang tidak seimbang. Kondisi ini dikenal sebagai *catenary action*.

Li et al. (2013) meneliti perilaku sambungan momen pada hubungan balok baja dengan kolom pipa tabung baja (*tubular column*) terhadap skenario keruntuhan kolom dengan eksperimen. Model keruntuhan kolom diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Idealisasi perakitan hubungan balok kolom (a) kegagalan kolom dan (b) idealisasi titik sambungan kolom sebagai sendi (Li et al., 2013)

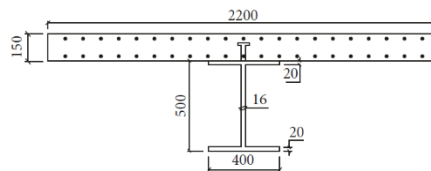
Wang et al. (2017) meneliti perilaku pelat pada struktur komposit terhadap skenario keruntuhan kolom baja. Penelitian ini mengaktualisasikan kondisi pelat beton bertulang pada pertemuan balok-kolom baja jika kolom tersebut mengalami kerusakan atau kegagalan sehingga dapat dianggap kolom tersebut tidak ada dalam konfigurasi sistem struktur.



Gambar 2. Penampang melintang benda uji (Wang et al., 2017)

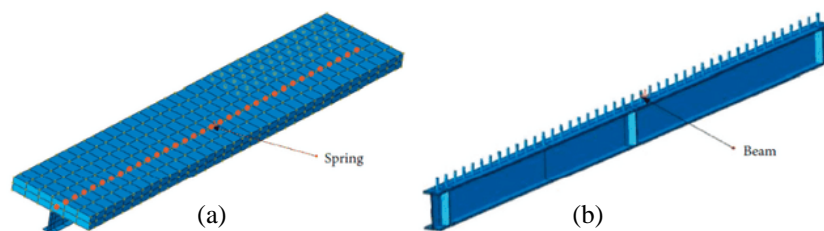
Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas beban pada bahwa daya dukung beban dari penampang komposit adalah 63% lebih tinggi dari penampang baja. Penampang komposit menunjukkan kekakuan awal yang lebih besar daripada Penampang baja. Berbeda dengan penampang baja, gaya aksial tekan yang besar dikembangkan pada balok dari penampang komposit yang mengalami defleksi ke bawah pada tahap pembebanan awal, yang menunjukkan aksi lengkung berkontribusi pada ketahanan beban pada beban kecil (Wang et al., 2017).

Liu, et al. (2019) meneliti kapasitas lentur pada balok baja pelat beton komposit terhadap momen negatif (*hogging moment*). Dalam penelitian ini, parameter perhitungan kekuatan lentur berdasarkan tiga standar, yaitu GB 50017, Eurocode 4, dan BS 5950. Hasil perhitungan yang didapatkan lalu dibandingkan dengan hasil pengujian dan pemodelan numerik.



Gambar 3. Tampak samping potongan balok komposit baja-beton uji (Liu et al., 2019)

Pemodelan numerik dilakukan dengan kondisi batas stud sebagai elemen pegas (*spring*) dan balok (*beam*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pemodelan kedua kondisi batas memberikan hasil yang signifikan terhadap data eksperimen. Jika kedua analisis dibandingkan, analisis elemen pegas menghasilkan hasil yang lebih akurat dan waktu komputasi yang lebih cepat (Liu et al., 2019). Analisis data menunjukkan bahwa semakin tinggi derajat sambungan, semakin besar kapasitas lentur. Peningkatan kapasitas lentur juga dipengaruhi oleh penambahan rasio tulangan transversal dan longitudinal pada pelat. Kapasitas lentur tidak terlalu dipengaruhi oleh diameter stud dan kondisi pembebanan (Liu et al., 2019).



Gambar 4. Pemodelan elemen stud sebagai (a) pegas dan (b) balok (Liu et al., 2019)

Zandorini et al. (2019) meneliti perilaku keruntuhan kolom interior pada sistem rangka pemikul momen baja-beton berdasarkan standar Eurocode. Tinjauan utama dalam penelitian ini adalah kekokohan struktur (*structural robustness*) terhadap peristiwa tidak terduga, seperti beban impak, ledakan, dan kebakaran. Dilakukan pengujian laboratorium dan analisis terhadap dua benda uji, simetris dan asimetris terhadap sumbu kolom. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelat beton bertulang pada struktur komposit berkontribusi dalam redistribusi beban akibat keruntuhan tiba-tiba. Distribusi beban berpindah dari bagian struktur yang mengalami kerusakan ke bagian struktur yang tidak rusak (Zandorini et al., 2019).

Dalam penelitian ini, rumusan masalah yang akan dianalisis adalah perilaku kapasitas beban dengan variasi penambahan tulangan pada pelat beton bertulang terhadap keruntuhan kolom di titik hubungan balok kolom struktur komposit. Penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah yang ditetapkan di awal penelitian berdasarkan sifat material, jenis beban, komponen struktur, dan material elemen. Sifat material isotropik dan tidak dipengaruhi oleh tekanan hidrostatik. Sifat material tidak terikat terhadap variabel waktu dan suhu sehingga pengaruh rangkakan (*creep*) dan susut (*shrinkage*) diabaikan. Jenis beban yang digunakan adalah beban terpusat yang terletak tepat pada sumbu penampang di posisi serat teratas penampang untuk arah beban ke bawah (*download*) dan di posisi serat terbawah penampang untuk arah beban ke atas (*upload*). Pembebanan dilakukan secara statik nonlinear.

Secara komponen struktur, posisi titik hubungan balok kolom struktur komposit terletak di interior dengan balok terkekang pada kedua sisi kolom. Hubungan balok kolom dengan diafragma dianggap rigid sempurna dan monolit tanpa meninjau komponen sambungan. Struktur komposit dianggap dibangun dengan perancah (*shored*) sehingga komponen struktur memikul beban hidup dan mati. Struktur balok komposit dirancang dengan sistem konektor geser parsial. Pelat beton bertulang dihitung berdasarkan pelat satu arah nonprategang.

Secara material, mutu beton digunakan 37 MPa sesuai dengan hasil pengujian Wang et al. (2017). Mutu baja tulangan dan baja profil sesuai dengan hasil pengujian Wang et al. (2017). Selain itu, mutu elemen struktur yang tidak dinyatakan digunakan nilai referensi lain yang memiliki kaitan dengan elemen tersebut.

Kerangka berpikir

Penelitian ini dilakukan secara bertahap dengan dimulai dari studi pustaka. Kegiatan ini bertujuan untuk mencari referensi jurnal pengujian laboratorium. Dari jurnal tersebut, model benda uji dalam penelitian tersebut dijadikan sebagai acuan dengan modifikasi pengujian berupa pembebanan statik nonlinear. Model pengujian dan data material dalam jurnal tersebut dijadikan sebagai acuan dengan modifikasi pada jenis pengujian beban dan elemen benda uji dengan batasan penelitian yang ditentukan di awal. Setelah rumusan masalah, tujuan, dan manfaat penelitian ini ditentukan, langkah berikutnya dilanjutkan ke tahap penyusunan dasar teori yang memiliki hubungan dan termasuk dalam lingkup penelitian ini.

Dalam tahap penentuan model uji, setiap model benda uji berdasarkan jurnal tersebut tetap dianalisis dalam penelitian ini sebagai verifikasi. Modifikasi benda uji tambahan dilakukan dengan menambahkan baris tulangan utama dan pembagi pada pelat beton bertulang. Hal ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas struktur komposit terhadap penambahan tulangan pada pelat beton struktur komposit.

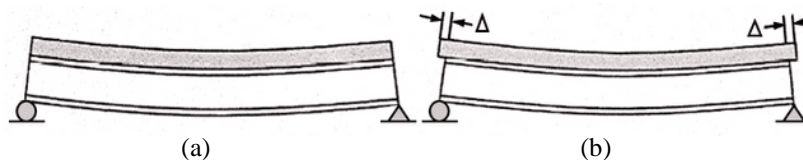
Struktur baja komposit

Salah satu keunggulan struktur baja komposit didasarkan atas transfer tegangan antara material baja dan beton melalui tegangan lekatan (*bond stress*). Berdasarkan mekanisme tersebut, konstruksi struktur baja komposit lebih kuat dan kaku dengan biaya minimal daripada konstruksi baja atau beton bertulang (Roeder et al., 1999). Komponen struktur ini dapat menahan beban lebih besar sekitar 33%--50% daripada beban yang hanya dipikul oleh balok baja tunggal (Setiawan, 2008). Kesatuan material komposit terbentuk saat pelat beton dihubungkan dengan balok baja. Pelat beton bekerja sebagai lapisan penutup (*cover plate*) yang membantu balok untuk distribusi beban. Dengan adanya kesatuan material tersebut, aksi pikul momen lentur yang terjadi dapat dilakukan tidak hanya oleh balok baja, tetapi juga oleh pelat beton (Setiawan, 2008).

Untuk sistem struktur komposit penuh, berat elemen struktur dapat dikurangi sekitar 20%--30% (McCormac & Csernak, 2012; Setiawan, 2008). Pengurangan berat elemen struktur merupakan hasil penggunaan ukuran profil baja yang lebih kecil (tinggi elemen menjadi lebih kecil dan berat elemen menjadi lebih ringan). Ukuran profil yang lebih kecil dapat memberikan keuntungan dalam perencanaan ruang bangunan dapat lebih efisien (Geschwindner et al., 2017; McCormac & Csernak, 2012). Dengan demikian, dapat dilakukan penghematan biaya, seperti material dan perlindungan terhadap api (McCormac & Csernak, 2012; Setiawan, 2008).

Balok baja komposit

Dalam balok komposit, terdapat dua jenis material yang masing-masing memiliki perilaku material yang berbeda, yaitu balok baja dan pelat beton bertulang. Akibat perbedaan perilaku ini, jika terdapat gaya geser yang bekerja terhadap sistem struktur balok komposit, antara pelat beton bertulang dan balok baja akan saling bergeser atau tidak terdapat lekatan di antara kedua material tersebut. Pergeseran lateral yang timbul antara kedua material tersebut tidak lagi menjadikan balok komposit sebagai satu kesatuan, tetapi hanyalah pelat beton bertulang yang bekerja sebagai beban mati di atas balok baja (Dewobroto, 2016). Dengan ditemukannya alat-alat penghubung dan metode penyambungan (pengelasan) yang lebih baik seiring dengan waktu dan perkembangan teknologi, lekatan antara balok baja dan pelat beton dapat ditingkatkan dan berperilaku lebih realistis sebagai satu kesatuan (Setiawan, 2008). Jika ditinjau berdasarkan kekakuan, struktur pelat lantai komposit memiliki kekakuan lebih besar dibandingkan dengan struktur pelat beton di atas balok baja yang bekerja sendiri (Setiawan, 2008).



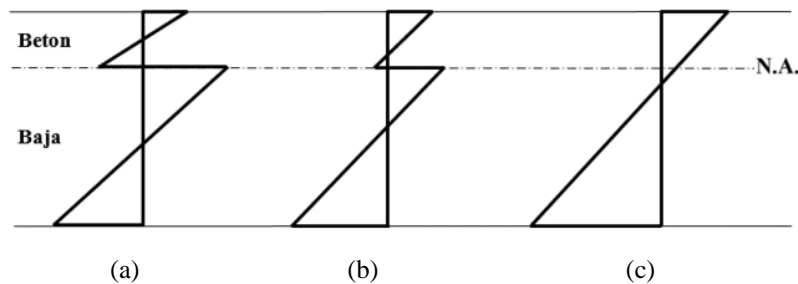
Gambar 5. Balok Komposit (a) dengan Konektor Geser dan (b) Tanpa Konektor Geser (Dewobroto, 2016)

Konektor geser

Konektor geser menjadikan pelat beton dan balok baja profil bekerja sebagai satu kesatuan komposit. Konektor geser didesain untuk menahan gaya geser antara pelat beton dan balok baja. Tipe konektor geser stud yang paling

banyak digunakan dalam dunia konstruksi (Nguyen & Kim, 2009; Setiawan, 2008). Konektor geser stud termasuk dalam jenis *flexible* yang meneruskan gaya geser segala arah tegak lurus terhadap konektor tersebut (Soegiarso).

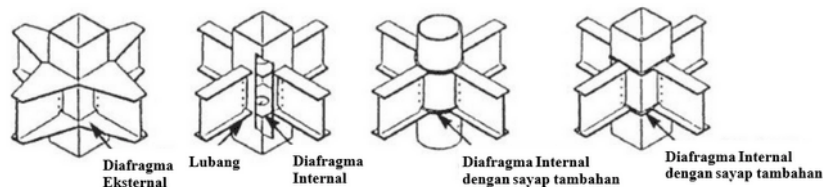
Dalam perencanaan, jumlah konektor geser dapat dipasang secara penuh yang menghasilkan struktur komposit penuh ataupun secara sebagian yang menghasilkan struktur komposit parsial (Setiawan, 2008). Hal ini dapat disebabkan beberapa hal, seperti penambahan biaya yang diperlukan untuk kebutuhan konektor geser sesuai dengan standar atau spesifikasi yang digunakan. (Geschwindner et al., 2017); (McCormac & Csernak, 2012). Jika struktur komposit bekerja secara parsial, distribusi tegangan elastis dan plastis yang terjadi tidak secara penuh, tetapi masih terjadi secara individu. Jika digunakan konektor geser secara penuh, lekatan yang terjadi dianggap terjadi menyeluruh secara komposit.



Gambar 6. Distribusi tegangan elastis untuk perilaku (a) nonkomposit, (b) komposit parsial, dan (c) komposit penuh (Geschwindner et al., 2017)

Kolom baja komposit

Jenis kolom struktur komposit yang digunakan adalah kolom struktur baja berongga diisi beton (*concrete filled tube* [CFT]). Salah satu kategori sambungan yang berbeda pada umumnya adalah sambungan antara balok dan kolom dengan las penetrasi penuh yang lazimnya dipraktikkan di Jepang seperti ditunjukkan dalam Gambar 7. Pemasangan pengaku (diafragma) diperlukan di daerah sambungan balok-kolom jika balok baja disambungkan atau dilas dengan baja berongga (Tamboli, 2017).



Gambar 7. Jenis sambungan yang direkomendasikan di Jepang untuk struktur kolom komposit (Tamboli, 2017)

Metode elemen hingga

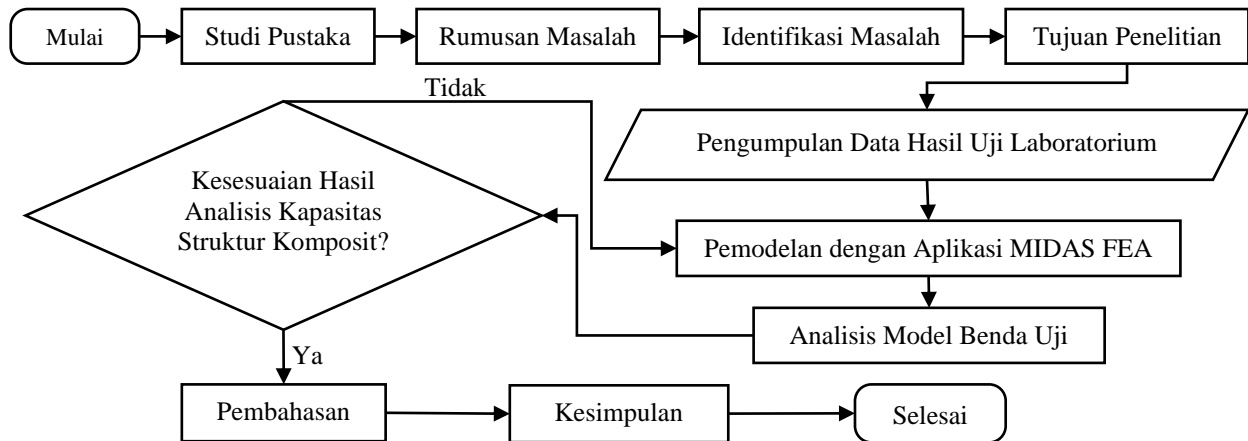
Model persamaan matematika kadang-kadang menjadi lebih kompleks dan rumit sehingga dalam penyelesaiannya secara manual digunakan pendekatan dan asumsi-asumsi untuk penyederhanaan metode penyelesaian. Seiring dengan perkembangan zaman dan teknologi, persamaan dan pemodelan kompleks dapat diselesaikan oleh komputer dengan metode numerik. Metode ini mentransformasi persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar yang diproses oleh komputer. Dengan metode ini, persamaan diferensial yang sangat sulit dengan hasil eksak dapat diselesaikan dengan aproksimasi atau pendekatan (Reddy, 2015).

Analisis struktur nonlinear

Untuk analisis struktur secara nonlinear, matriks kekakuan tidak konstan dan urutan pembebanan akan memengaruhi hasil akhir. Penyelesaian secara nonlinear dengan program komputer akan menerapkan konsep peningkatan (*incremental*) dan iterasi (*iteration*) yang akan berpengaruh pada waktu analisis dan sumber daya yang dibutuhkan (Dewobroto & Harapan, 2013). Peningkatan dapat berupa faktor beban (*load factor*) yang akan dikalikan terhadap satuan nilai gaya (*force*) maupun satuan nilai perpindahan (*displacement*). Iterasi dilakukan hingga analisis pada suatu faktor beban telah didapatkan hasil yang mencapai atau melewati batas konvergen.

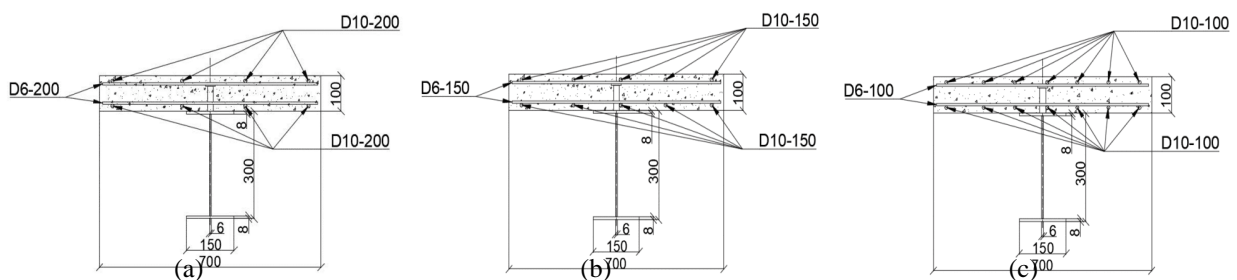
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara bertahap dengan dimulai dari studi pustaka yang bertujuan untuk mencari referensi jurnal pengujian laboratorium. Jurnal penelitian yang dijadikan sebagai acuan berdasarkan Wang et al. (2017). Model pengujian dan data material dalam jurnal tersebut dijadikan sebagai acuan dengan modifikasi pada jenis pengujian beban dan elemen benda uji yang disertai dengan batasan penelitian. Tahap-tahap penelitian ini dirangkum dalam diagram alir pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram alir penelitian

Dilakukan penelitian terhadap enam model benda uji, tiga benda uji berdasarkan model ST-M-RC dan tiga benda uji lainnya berdasarkan model ST-S-RC dengan tinggi kolom komposit untuk seluruh model sesuai dengan model ST-M-RC berdasarkan Wang et al. (2017). Modifikasi dilakukan dengan penambahan jumlah tulangan utama dan pembagi yang terletak pada baris atas dan bawah pelat beton. Untuk penelitian ini, model ST-M-RC dinamakan sebagai model RW-M. RW berarti inisial peneliti, Richard Widjaya, dan M berarti titik sisi tengah (*middle*) hubungan balok-kolom yang merujuk pada model ST-M-RC dan mewakili perilaku kapasitas struktur terhadap momen positif (*sagging*). Selain itu, model ST-S-RC dinamakan sebagai model RW-S. RW berarti inisial peneliti, Richard Widjaya, dan S sebagai titik sisi pinggir (*side*) hubungan balok-kolom yang merujuk pada model ST-S-RC dan mewakili perilaku kapasitas struktur terhadap momen negatif (*hogging*). Model RW-M-1 dan RW-S-1 dibuat dengan jarak tulangan utama dan pembagi sebesar 200 mm sesuai dengan Wang et al. (2017). Desain jarak tulangan utama dan pembagi untuk model RW-M-2 dan RW-S-2 sebesar 150 mm dan untuk model RW-M-3 dan RW-S-3 sebesar 100 mm.



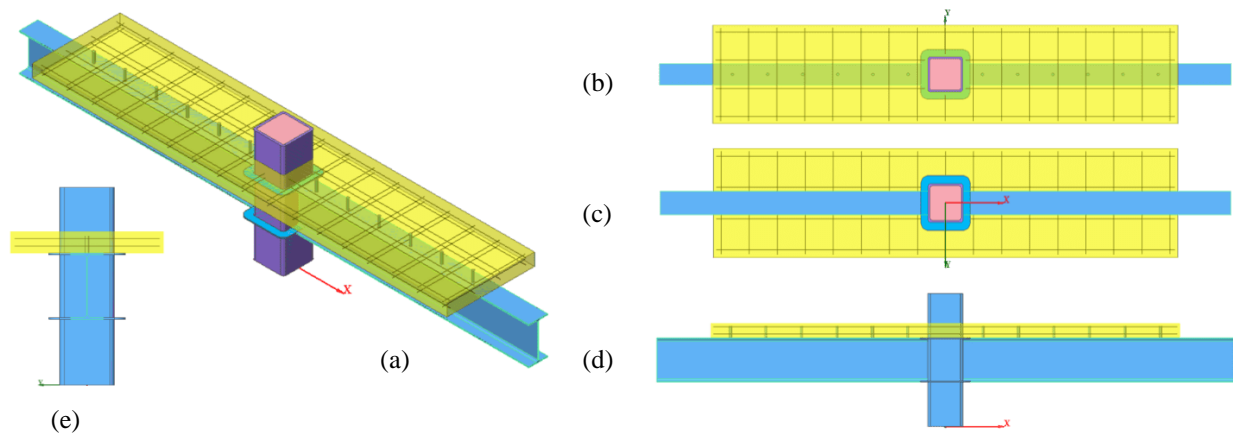
Gambar 9. Model benda uji (a) RW-M-1 dan RW-S-1; (b) RW-M-2 dan RW-S-2; (c) RW-M-3 dan RW-S-3

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

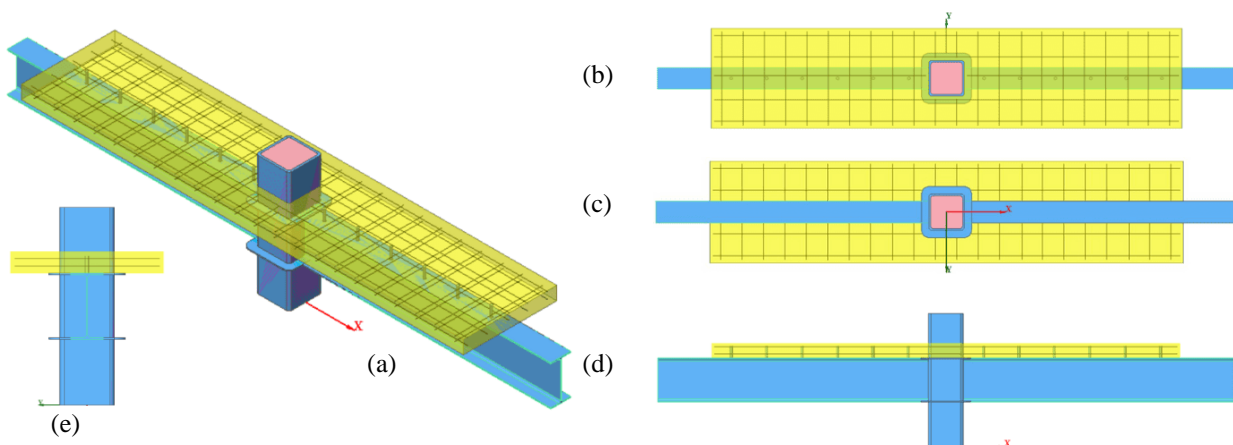
Geometri balok, kolom, dan pelat dimodelkan sebagai elemen padat (*solid*), sedangkan geometri tulangan dimodelkan sebagai elemen garis (*curve*). Diskretisasi (*meshing*) pada elemen garis digunakan pilihan *edge* dan elemen ruang digunakan pilihan *solid*. Bentuk elemen secara tetrahedron (limas) dengan empat nodal. Untuk elemen garis (*edge*), metode pembagian (*seeding method*) dilakukan dengan panjang interval (*interval length*) dan jumlah pembagian (*number of divisions*) setiap 50 mm. Elemen garis dibuat dengan penulangan (*reinforcement*) bar in solid. Selain itu, untuk elemen solid, metode pembagian dilakukan dengan ukuran elemen (*element size*) dan jumlah pembagian (*number of divisions*) setiap 25 mm. Pembebanan berupa load set perpindahan (*displacement*) 1 satuan

sebesar 25 mm dengan nilai positif menunjukkan arah ke atas untuk model RW-M-1, RW-M-2, dan RW-M-3 dan nilai negatif menunjukkan arah ke bawah untuk model RW-S-1, RW-S-2, dan RW-S-3.

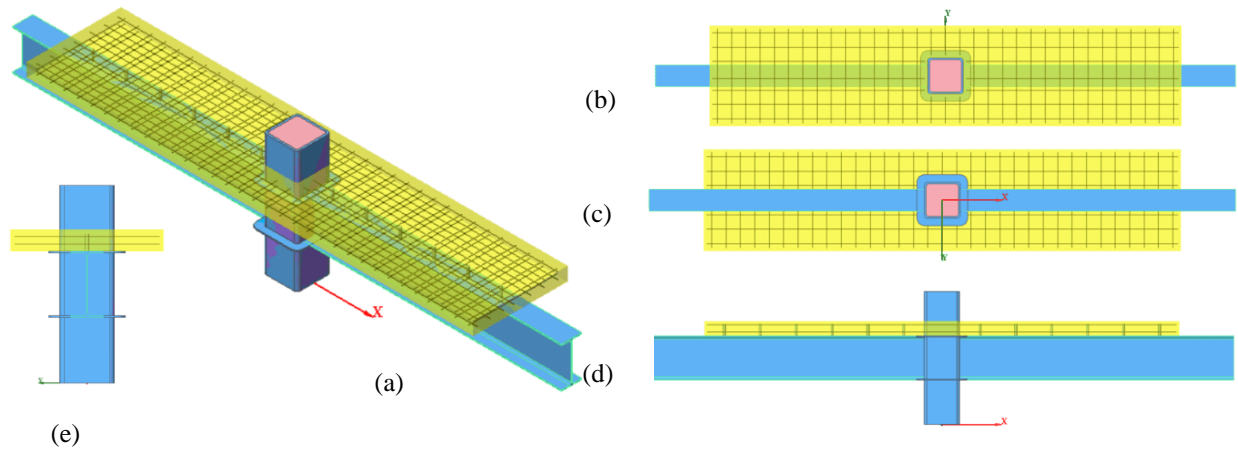
Analisis dilakukan secara statik nonlinear. Statik berarti peningkatan beban secara linear dan bertahap sesuai dengan nilai peningkatan (*increment*) faktor beban (*load set*) yang dimasukkan. Nonlinear berarti analisis perilaku material hingga mengalami keruntuhan sehingga hubungan tegangan-regangan tidak hanya ditinjau secara elastis (linear), tetapi juga ditinjau secara plastis (nonlinear) yang dilakukan secara iterasi hingga mencapai nilai konvergen. Nilai batas konvergen ditetapkan sebesar 0,001 (10^{-3}) untuk kondisi yang digunakan, yaitu *energy norm* dan *displacement norm*.



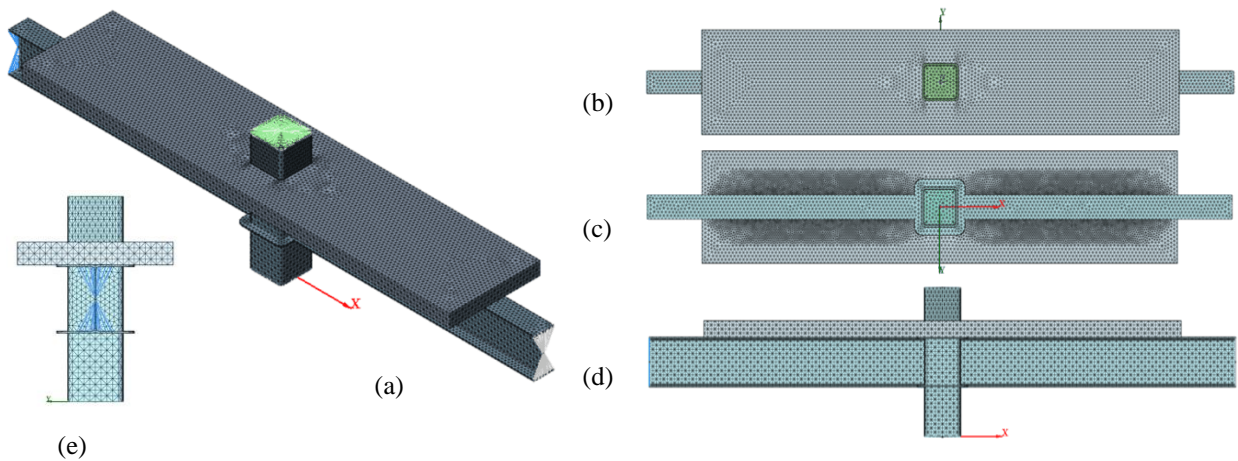
Gambar 10. Geometri model RW-M-1 dan RW-S-1 (a) sumbu global, (b) tampak atas (sumbu Z), (c) tampak bawah (sumbu Z), (d) tampak samping (sumbu X), dan (e) tampak samping (sumbu Y)



Gambar 11. Geometri model RW-M-2 dan RW-S-2 (a) sumbu global, (b) tampak atas (sumbu Z), (c) tampak bawah (sumbu Z), (d) tampak samping (sumbu X), dan (e) tampak samping (sumbu Y)

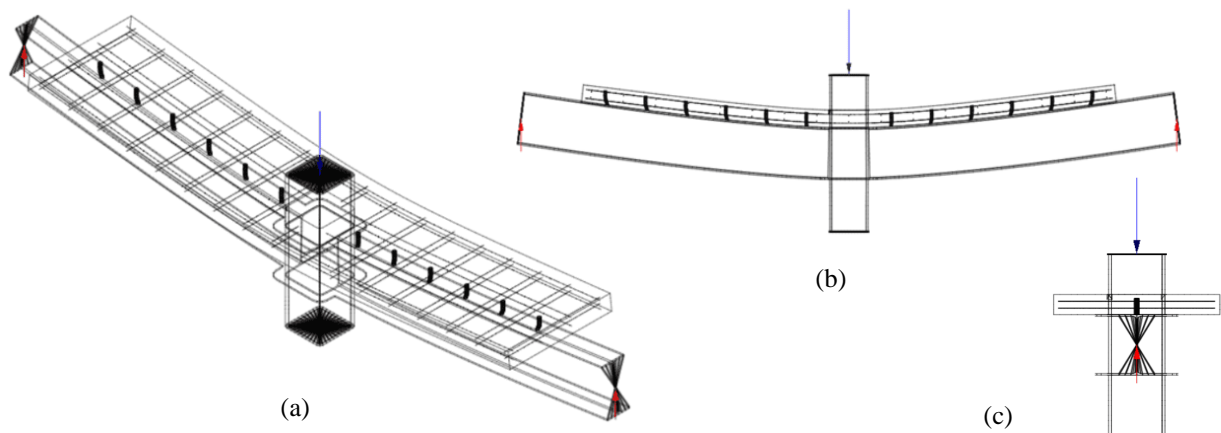


Gambar 12. Geometri model RW-M-3 dan RW-S-3 (a) sumbu global, (b) tampak atas (sumbu Z), (c) tampak bawah (sumbu Z), (d) tampak samping (sumbu X), dan (e) tampak samping (sumbu Y)

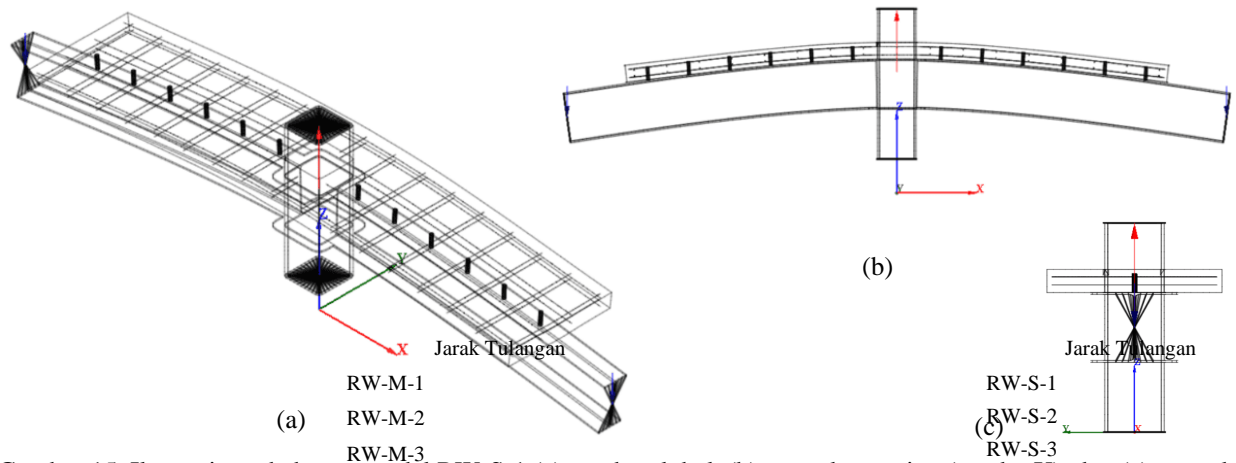


Gambar 13. Tampilan diskretisasi elemen model RW-M dan RW-S (a) sumbu global, (b) tampak atas (sumbu Z), (c) tampak bawah (sumbu Z), (d) tampak samping (sumbu X), dan (e) tampak samping (sumbu Y)

Analisis dilakukan dengan pembebanan arah ke bawah (*down load*) untuk model RW-M yang merepresentasikan perilaku struktur terhadap momen positif (*sagging*) dan pembebanan arah ke atas (*up load*) untuk model RW-S yang merepresentasikan perilaku struktur terhadap momen negatif (*hogging*). Ilustrasi pembebanan untuk model RW-M-1 ditunjukkan pada Gambar 14 dan untuk model RW-S-1 ditunjukkan pada Gambar 15.

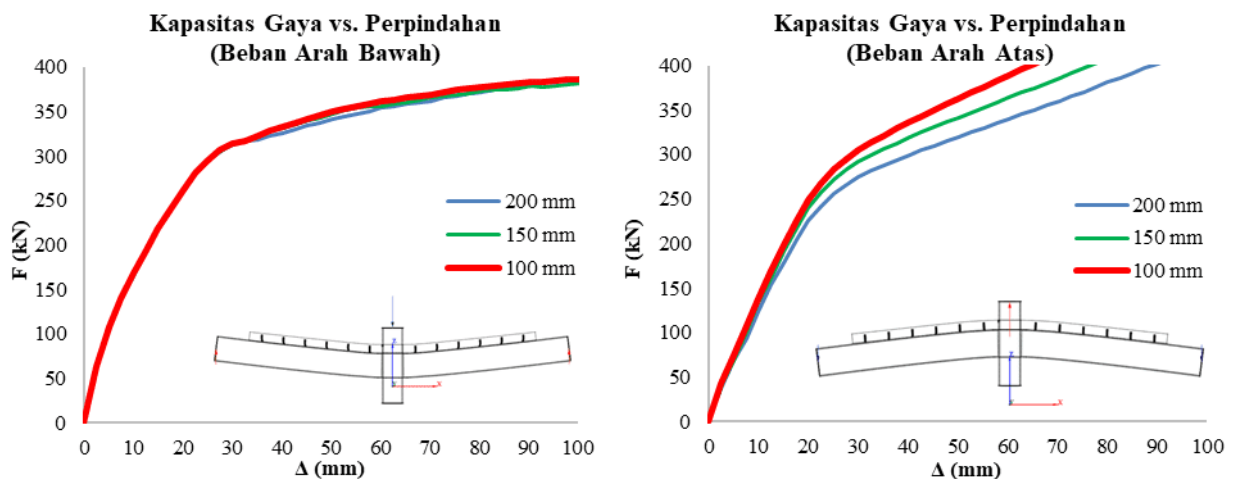


Gambar 14. Ilustrasi pembebanan model RW-M-1 (a) sumbu global, (b) tampak samping (sumbu X), dan (c) tampak samping (sumbu Y)



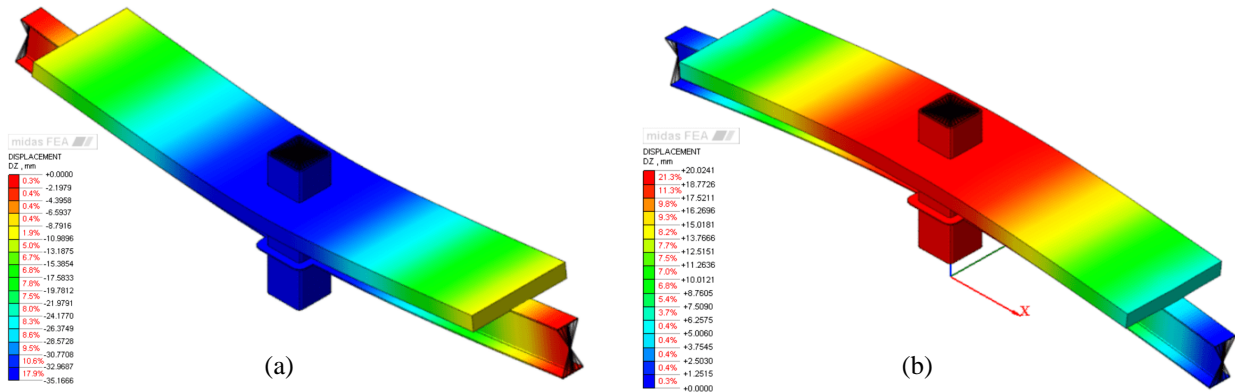
Gambar 15. Ilustrasi pembebanan model RW-S-1 (a) sumbu global, (b) tampak samping (sumbu X), dan (c) tampak samping (sumbu Y)

Keruntuhan ditinjau dari bagian pelat beton bertulang yang sudah retak, terutama di sekitar stud dan tersebar ke seluruh stud, sehingga aksi komposit sudah tidak berlaku. Hasil analisis struktur komposit dengan pembebanan arah ke bawah (*down load*) dan pembebanan arah ke atas (*up load*) dengan menggunakan aplikasi MIDAS FEA ditunjukkan dalam bentuk kurva kapasitas hubungan antara gaya (*force*) dan perpindahan (*displacement*) pada Gambar 16.

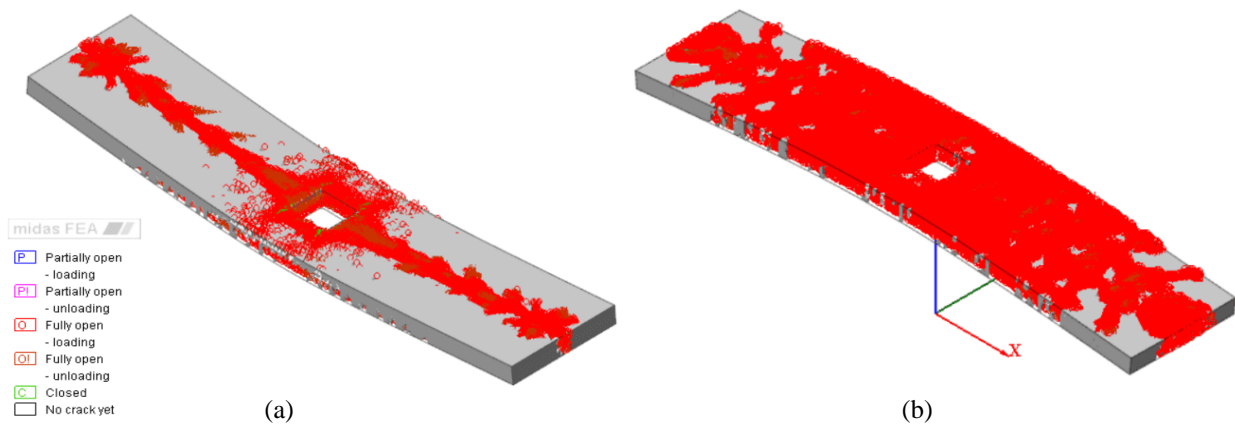


Gambar 16. Grafik kapasitas gaya vs. perpindahan untuk (a) gaya beban arah bawah dan (b) gaya beban arah atas

Hasil analisis berdasarkan model RW-M-1 dan RW-S-1 untuk perpindahan (*displacement*) saat kapasitas ditunjukkan pada Gambar 17 dan status retak (*crack status*) pelat beton ditunjukkan pada Gambar 18.



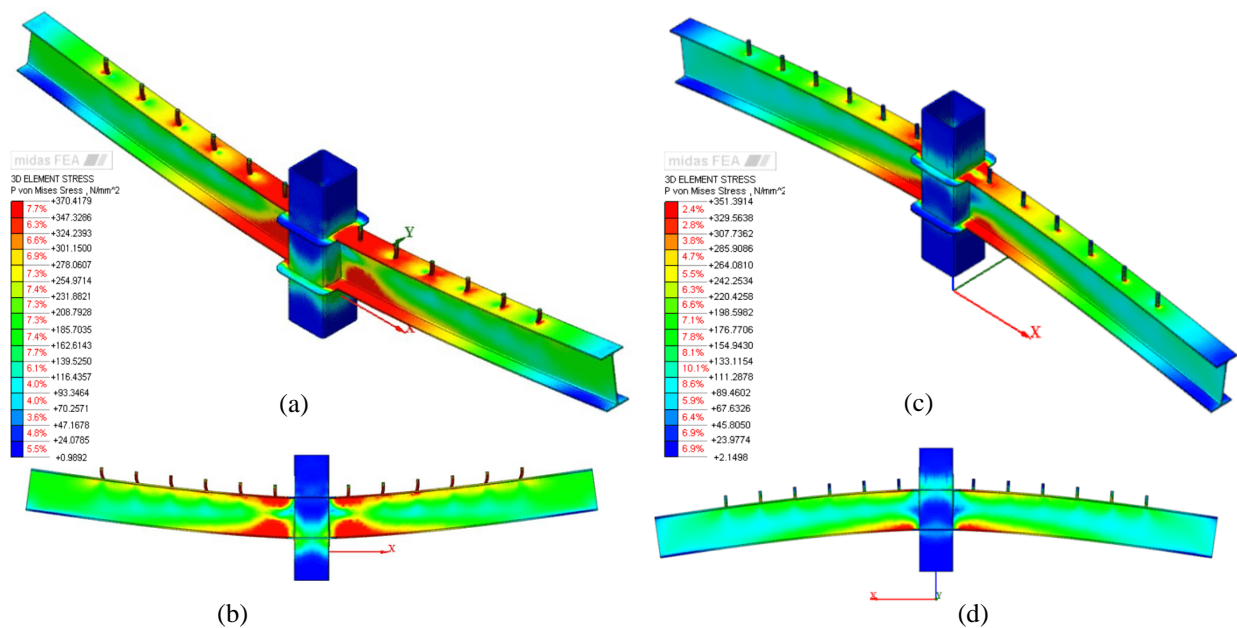
Gambar 17. Perpindahan (*displacement*) pada nilai kapasitas untuk model (a) RW-M-1 dan (b) RW-S-1



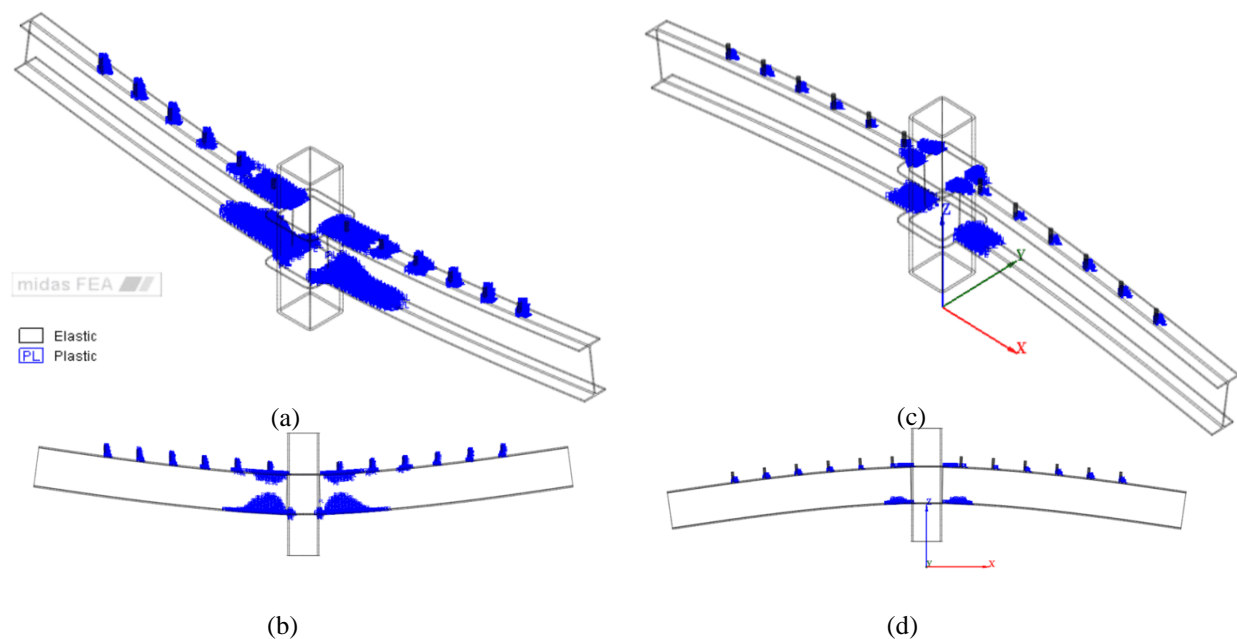
Gambar 18. Status retak (*crack status*) pada pelat beton untuk model (a) RW-M-1 dan (b) RW-S-1

Pada Gambar 18, diperlihatkan untuk model RW-M-1 dengan arah beban ke bawah, retak pada pelat terletak pada serat bawah pelat beton dan terletak menjalar dari satu lubang stud ke lubang stud lainnya. Selain itu, retak juga terletak di sekitar lubang kolom komposit. Untuk model RW-S-1, retak pada pelat hampir terjadi di seluruh bagian pelat beton. Semakin dekat dengan titik beban, retak yang timbul pada pelat semakin penuh. Pada kondisi ini, untuk seluruh model, aksi komposit yang dihasilkan dari penyaluran tegangan geser antara pelat beton dan balok baja sudah tidak berlaku.

Untuk material daktail, tegangan elemen baja profil ditunjukkan pada Gambar 19 dan status plastisitas (*plasticity status*) ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 19. Tegangan von Mises elemen baja profil untuk model (a) RW-M-1 dan (b) RW-S-1



Gambar 20. Status plastisitas (*plasticity status*) elemen baja profil untuk model (a) RW-M-1 dan (b) RW-S-1

Berdasarkan Gambar 19 dan Gambar 20 diperlihatkan untuk model RW-M-1 dengan beban ke bawah pada nilai kapasitas, semakin mendekati kolom maka terjadi peningkatan tegangan pada balok profil hingga hampir seluruh bagian badan balok profil pada titik tersebut bersifat plastis. Selain itu, seluruh stud seluruhnya dalam kondisi tegangan tinggi hingga plastis. Selain itu, untuk model RW-S-1 dengan beban ke atas pada nilai kapasitas, terjadi peningkatan tegangan pada titik hubungan balok kolom dan stud hingga mencapai batas plastis. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pada kondisi kegagalan kolom yang dimodelkan monolit terhadap balok profil, terdapat distribusi tegangan pada bagian hubungan balok kolom hingga diafragma sisi bawah untuk model RW-M dengan beban ke bawah dan terdapat distribusi tegangan pada bagian hubungan balok kolom hingga diafragma sisi atas untuk model RW-S dengan beban ke atas. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun elemen kolom dianggap mengalami kegagalan, bagian ini masih berperan dalam menyalurkan tegangan akibat beban kapasitas yang bekerja.

Perbandingan nilai kapasitas yang didapatkan antara MIDAS FEA dan data pengujian laboratorium berdasarkan Wang et al. (2017) untuk model dengan arah beban ke bawah (*down load*) ditunjukkan pada Tabel 1 dan model dengan arah beban ke atas (*up load*) ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Perbandingan nilai kapasitas untuk model dengan beban arah bawah (*down load*)

Model	Jarak tulangan pelat (mm)	Kapasitas, P (kN)	
		MIDAS FEA	Uji laboratorium (Wang et al., 2017)
RW-M-1	200	318,57	308
RW-M-2	150	322,46	-
RW-M-3	100	323,05	-

Tabel 2. Perbandingan nilai kapasitas untuk model dengan beban arah atas (*up load*)

Model	Jarak tulangan pelat (mm)	Kapasitas, P (kN)	
		MIDAS FEA	Uji laboratorium (Wang et al., 2017)
RW-M-1	200	226,61	210
RW-M-2	150	257,48	-
RW-M-3	100	282,76	-

Perbandingan nilai peningkatan kapasitas untuk model dengan arah beban ke bawah (*down load*) ditunjukkan pada Tabel 3 dan model dengan arah beban ke atas (*up load*) ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Perbandingan nilai peningkatan kapasitas untuk model dengan beban arah bawah (*down load*)

Model	Kapasitas, P (kN) hasil MIDAS FEA	Peningkatan nilai (kN)	Persen peningkatan (%)
RW-M-1	318,57	3,89	1,22
RW-M-2	322,46		
RW-M-3	323,05		
		1,19	0,36

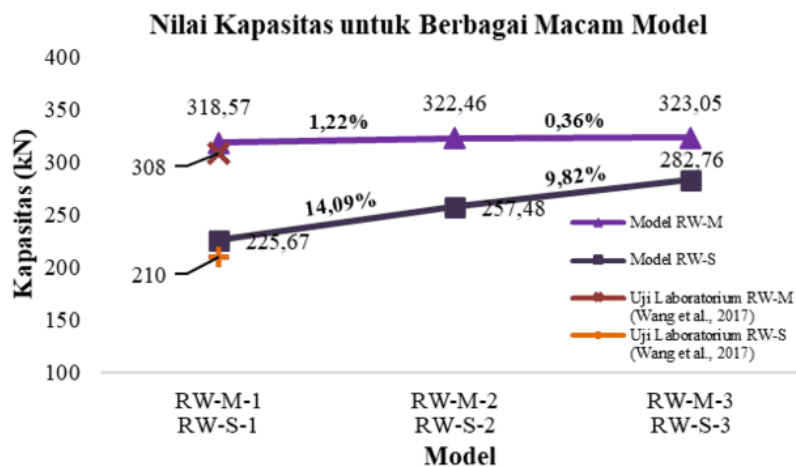
Tabel 4. Perbandingan nilai peningkatan kapasitas untuk model dengan beban arah atas (*up load*)

Model	Kapasitas, P (kN) hasil MIDAS FEA	Peningkatan nilai (kN)	Persen peningkatan (%)
RW-M-1	226,61	30,87	13,62
RW-M-2	257,48		
RW-M-3	282,76		
		25,28	9,82

Pada model RW-M dengan beban ke bawah yang merepresentasikan perilaku struktur komposit terhadap momen positif, kapasitas tekan dipikul oleh pelat beton bertulang, sedangkan kapasitas tarik dipikul oleh balok baja. Berdasarkan perilaku material, beton yang kuat tekan mampu memikul tekan hingga keruntuhan material beton tercapai. Material daktail berupa balok baja profil akan memikul tarik dan belum tercapai keruntuhan meskipun nilai kapasitas telah terlampaui. Akibat keruntuhan tekan pada pelat beton bertulang terutama di daerah dengan konsentrasi tegangan yang tinggi, seperti lubang stud dan di sekitar lubang kolom, tegangan geser antara stud dan pelat beton tidak tersalurkan sehingga aksi komposit pada struktur komposit tidak berlaku. Hal inilah yang menyebabkan penambahan material tulangan yang bersifat memikul tarik tidak berkontribusi secara signifikan dalam peningkatan kapasitas struktur komposit.

Pada model RW-S dengan beban ke atas yang merepresentasikan perilaku struktur komposit terhadap momen negatif, kapasitas tekan dipikul oleh serat bawah balok baja, sedangkan kapasitas tarik dipikul oleh serat atas balok baja dan tulangan pelat. Material beton tidak memikul tegangan tarik dalam jumlah besar sehingga keruntuhan pelat beton lebih cepat terjadi. Akan tetapi, kapasitas tarik masih dipikul oleh material daktail berupa serat atas balok baja dan tulangan pelat. Dengan adanya penambahan jumlah tulangan pada pelat, hal ini akan meningkatkan rasio tulangan dan kapasitas tarik. Namun, sistem struktur komposit lebih cepat mencapai kapasitas akibat keruntuhan getas beton yang mengakibatkan aksi komposit tidak berlaku meskipun keruntuhan daktail material baja belum tercapai. Penambahan tulangan pelat dapat meningkatkan kapasitas tarik struktur komposit yang memikul beban ke atas atau momen negatif (*hogging*).

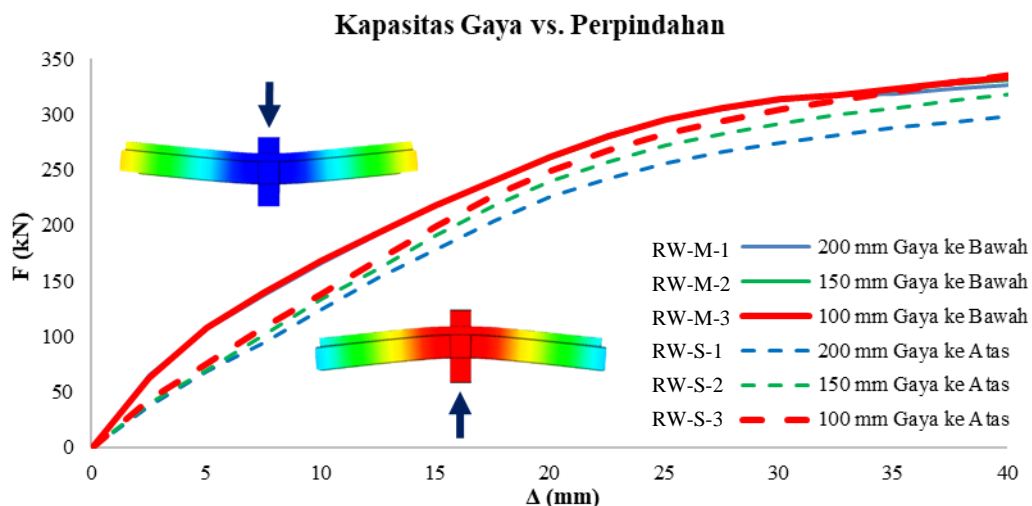
Grafik perbandingan nilai kapasitas dan persen peningkatan untuk setiap model dengan beban arah bawah (*down load*) dan beban arah atas (*up load*) ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Grafik perbandingan nilai kapasitas dan persen peningkatan untuk seluruh model

Kapasitas struktur komposit model RW-M dengan arah gaya ke bawah lebih besar daripada model RW-S dengan arah gaya ke atas. Dengan modifikasi model berupa penambahan jumlah tulangan utama dan pembagi pada baris atas dan baris bawah pelat beton untuk kondisi beban ke bawah, didapatkan hasil bahwa kapasitas struktur komposit untuk memikul momen positif lebih besar, tetapi penambahan jumlah tulangan tidak memberikan kenaikan kapasitas secara signifikan. Selain itu, untuk kondisi beban ke bawah, didapatkan hasil bahwa kapasitas struktur komposit untuk memikul momen negatif lebih kecil dengan penambahan jumlah tulangan dapat memberikan kenaikan kapasitas cukup signifikan.

Kurva hubungan antara kapasitas gaya vs. perpindahan untuk keenam model dengan beban arah bawah (*down load*) dan beban arah atas (*up load*) ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Grafik kapasitas gaya vs. perpindahan untuk seluruh model

Jika dibandingkan untuk model yang sama dengan jarak tulangan tertentu, nilai selisih dan persennya terhadap kapasitas untuk model RW-M dengan beban arah bawah (*down load*) dan model RW-S dengan beban arah atas (*up load*) ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai dan persen selisih kapasitas antarmodel dengan jarak tulangan yang sama

Model	Jarak tulangan (mm)	Kapasitas, P (kN)	Selisih nilai kapasitas (kN)	Persen selisih (%) terhadap model	
				RW-M	RW-S
RW-M-1	200	318,57	91,96	28,87	40,58
RW-S-1		226,61			
RW-M-2	150	322,46	64,98	20,15	25,24
RW-S-2		257,48			
RW-M-3	100	323,05	40,29	12,47	14,25
RW-S-3		282,76			

Perbandingan selisih nilai dan persen kesalahan antara data pengujian laboratorium berdasarkan Wang et al. (2017) dan hasil analisis dengan program MIDAS FEA ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Selisih nilai dan persen kesalahan antara hasil uji laboratorium (Wang et al., 2017) dan MIDAS FEA

Model	Jarak tulangan (mm)	Kapasitas, P (kN)		Selisih nilai (kN)	Persen selisih (%)
		MIDAS FEA	Uji laboratorium (Wang et al., 2017)		
RW-M-1	200	318,57	308	10,57	3,43
RW-S-1		226,61	210	16,61	7,91

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk model RW-M-1 (jarak tulangan pelat 200 mm dan arah beban ke bawah), nilai uji laboratorium didapatkan sebesar 308 kN dan MIDAS FEA didapatkan sebesar 318,57 kN dengan persen selisih nilai sebesar 3,43%.
2. Untuk model RW-S-1 (jarak tulangan pelat 200 mm dan arah beban ke atas), nilai uji laboratorium didapatkan sebesar 210 kN dan MIDAS FEA didapatkan sebesar 226,61 kN dengan persen selisih nilai sebesar 7,46%.
3. Untuk model RW-M-2 (jarak tulangan pelat 150 mm dan arah beban ke bawah), analisis kapasitas dengan MIDAS FEA didapatkan sebesar 322,46 kN. Peningkatan nilai kapasitas terhadap model RW-M-1 sebesar 1,22%.
4. Untuk model RW-S-2 (jarak tulangan pelat 150 mm dan arah beban ke atas), analisis kapasitas dengan MIDAS FEA didapatkan sebesar 257,48 kN. Peningkatan nilai kapasitas terhadap model RW-S-1 sebesar 14,09%.
5. Untuk model RW-M-3 (jarak tulangan pelat 100 mm dan arah beban ke bawah), analisis kapasitas dengan MIDAS FEA didapatkan sebesar 323,05 kN. Peningkatan nilai kapasitas terhadap model RW-M-2 sebesar 0,36%.
6. Untuk model RW-S-3 (jarak tulangan pelat 100 mm dan arah beban ke atas), analisis kapasitas dengan MIDAS FEA didapatkan sebesar 282,76 kN. Peningkatan nilai kapasitas terhadap model RW-S-2 sebesar 9,82%.

DAFTAR PUSTAKA

- Dewobroto, W. (2016). *Steel structure–Behavior, analysis & design–AISC 2010*. Yogyakarta: Pelita Harapan University.
- Dewobroto, W., & Harapan, U. P. (2013). *Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP2000*. Lumina, Jakarta.
- Garrison, P. (2016). *Basic structures* (3rd ed.). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Geschwindner, L. F., Liu, J., & Carter, C. J. (2017). *Unified design of steel structures* (3rd ed.). Providence Engineering Corp.
- Li, L., Wang, W., Chen, Y., & Lu, Y. (2013). Experimental investigation of beam-to-tubular column moment connections under column removal scenario. *Journal of constructional steel research*, 88, 244-255.
- Liu, J., Ding, F.-x., Liu, X.-m., Yu, Z.-w., Tan, Z., & Huang, J.-w. (2019). Flexural capacity of steel-concrete composite beams under hogging moment. *Advances in civil engineering*, 1-13.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Structural Steel Design* (5th ed.). New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Nguyen, H. T., & Kim, S. E. (2009). Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), 1909-1920.

- Reddy, J. N. (2015). *An introduction to nonlinear finite element analysis: With applications to heat transfer, fluid mechanics, and solid mechanics* (2nd ed.). Oxford: Oxford University Press.
- Roeder, C. W., Chmielowski, R., & Brown, C. B. (1999). Shear connector requirements for embedded steel sections. *Journal of structural engineering*, 125(2), 142-151.
- Setiawan, A. (2008). *Perencanaan struktur baja dengan metode LRFD (berdasarkan SNI 03-1729-2002)* (1st ed.). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Soegiarso, R. (n.d.). *Composite structures*. Jakarta: Universitas Tarumanagara.
- Tamboli, A. (2017). *Handbook of structural steel connection design and details* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Wang, W., Wang, J., Sun, X., & Bao, Y. (2017). Slab effect of composite subassemblies under a column removal scenario. *Journal of constructional steel research*, 129, 141-155.
- Zandonini, R., Baldassino, N., Freddi, F., & Roverso, G. (2019). Steel-concrete frames under the column loss scenario: An experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105527.

