

PEMODELAN BRACING KABEL SERAT KARBON BERDASARKAN VALIDASI LOAD DRIFT EKPERIMEN

P. Adi Yasa¹, Ida Bagus Prastha Bhisama¹, Made Hendra Prayoga¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Denpasar

Email: padiyasa@unud.ac.id

ABSTRAK: Penggunaan *bracing* merupakan salah satu metode perkuatan yang cukup populer diterapkan guna meningkatkan ketahanan lateral suatu bangunan. *Bracing* baja merupakan salah satu yang umum dan memiliki efektivitas baik dalam peningkatan tahanan lateral sehingga menjadi pilihan favorit untuk diaplikasikan. Namun terdapat tantangan yang perlu juga diperhatikan seperti fenomena kegagalan tekuk dan peningkatan massa yang cukup besar akibat berat sendirinya. Salah satu cara mengatasi kegagalan tekuk yakni dengan menggunakan *Buckling Restrained Base*, sedangkan Lee (2015) memanfaatkan kabel komposit serat karbon sebagai *bracing*. Keunggulan *bracing* ini selain tidak mengalami kegagalan tekuk serta ringan, proses pemasangan yang mudah juga menjadi pertimbangan yang menarik. Melalui pengujian Lee didapat bahwa perkuatan dengan memanfaatkan kabel serat efektif meningkatkan tahanan lateral suatu struktur, namun agar bisa mengaplikasikannya pada SAP2000 untuk berbagai ragam struktur diperlukan prosedur memodel *bracing* kabel yang tepat dan tervalidasi sehingga nantinya diperoleh perilaku struktur yang realistis. Dalam proses validasinya dilakukan pemodelan kabel dengan elemen *frame* berupa pipa pejal dengan memodifikasi elastisitasnya, sehingga diperoleh penyesuaian sebagai berikut: Elastitas direduksi 35% dari elastisitas material spesifikasi awal pada jenis sambungan pelat datar, dan reduksi 5% untuk hubungan *protrusion*. Pembebasan momen dan tekan tentunya perlu diaktifkan mengingat kedua kondisi ini tidak terjadi pada *bracing* kabel, sedangkan gaya aksial awal dan total dapat diperoleh dari memodel *bracing* dengan elemen kabel. Elemen kabel SAP2000 sendiri dapat mengakomodasi pengecekan tegangan awal dan total saat beban ultimate. Namun dalam analisis kenerja, elemen kabel tidak direkomendasikan dan diganti dengan elemen *frame* yang telah tervalidasi.

Kata kunci: Kabel komposit serat karbon, *Buckling Restrained Base*, elemen kabel dan *frame*.

MODELING CARBON FIBER CABLE BRACING BASED ON EXPERIMENTAL LOAD DRIFT VALIDATION

ABSTRACT: The application of *bracing* is one of the most popular reinforcement methods applied to improve the lateral resistance of a building. Steel *bracing* is one of the most common and has good effectiveness in increasing lateral resistance, therefore it is a popular choice for application. However, some challenges need to be considered such as the phenomenon of buckling failure and a considerable increase in mass due to its self-weight. One way to overcome buckling failure is using a *Buckling Restrained Base*, while Lee (2015) utilized carbon fiber composite cables as *bracing*. Besides not having buckling failure and being lightweight, this *bracing* has an easy installation process which is also an interesting consideration. Through Lee's research, it was found that fiber cable *bracing* is effective in increasing the lateral resistance of a structure, but to implement it in SAP2000 for a wide variety of structures, a proper and validated cable *bracing* modeling procedure is needed to obtain realistic structural behavior. In the validation process, the cable is modelled with a *frame* element in the form of a solid pipe by modifying its elasticity, so that adjustments are obtained as follows: The elasticity is reduced by 35% from the elasticity of the initial specification material in the flat plate connection type, and 5% reduction for the *protrusion* connection. Moment and compressive release of course need to be enabled since these two conditions do not exist in cable *bracing*, while the initial and total axial forces can be obtained from modeling the *bracing* with cable elements. The cable element in SAP2000 can accommodate

checking the initial and total stresses at the ultimate load. However, in the performance analysis, cable elements are not recommended and are replaced with validated frame elements.

Keywords: *Carbon fiber composite cable, Buckling Restrained Base, cable element and frame element.*

PENDAHULUAN

Fenomena gempa merupakan kejadian merambatnya getaran yang salah satunya diakibatkan oleh pergerakan lempeng tektonik. Indonesia sendiri merupakan daerah yang banyak memiliki patahan akibat pertemuan beberapa lempeng sehingga menjadikannya sebagai Negara yang rawan mengalami gempa bumi. Kendati merupakan daerah yang riskan mengalami gempa bumi, masih dapat ditemukan bangunan-bangunan yang tidak memenuhi syarat tahan gempa baik akibat kesalahan mendesain ataupun bangunan lama yang mengikuti SNI 2002 yang tidak sesuai jika menerapkan beban gempa terbaru SNI, 2012 ataupun SNI 2019 yang semakin berat.

Penggunaan *bracing* merupakan salah satu solusi populer yang dapat digunakan untuk memperkuat struktur terhadap beban lateral seperti gempa. *Bracing* sendiri terdapat beberapa varian dari sisi bentuk dan juga materialnya. *Bracing* baja merupakan salah satu yang umum dan memiliki efektivitas yang baik dalam peningkatan tahanan lateral sehingga menjadi pilihan favorit untuk diaplikasikan. Penggunaan *bracing* baja X secara signifikan meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi simpangan antar tingkat (Viswanath et al., 2010). Namun terdapat tantangan yang perlu juga diperhatikan seperti fenomena kegagalan tekuk dan peningkatan massa yang cukup besar akibat tambahan berat sendirinya. Salah satu cara mengatasi kegagalan tekuk yakni dengan menggunakan *Buckling Restrained Base* (BRB). Penggunaan BRB mampu meningkatkan kekuatan serta kekakuan struktur serta sudah banyak diaplikasikan pada berbagai struktur dan negara di Jepang, US dan cina (Xie, 2005; Zhou et al., 2021). Sedangkan Lee (2015) dalam penelitiannya memanfaatkan kabel komposit serat karbon sebagai *bracing*. Keunggulan *bracing* ini selain tidak mengalami kegagalan tekuk serta ringan, proses pemasangan yang mudah juga menjadi pertimbangan yang menarik.

Kabel komposit serat karbon terbentuk dari kulit *polyester* berpadu dengan *resin thermosetting* dan menggunakan teknologi kopolimer (Tokyo Rope, 2013). Dimana komposit serat karbon ini diklaim memiliki kuat tarik yang tinggi setara dengan strand baja, berbobot $\pm 1/5$ massa strand baja, serta memiliki ketahanan terhadap korosi. Melalui pengujian Lee didapat bahwa perkuatan dengan memanfaatkan kabel serat efektif meningkatkan tahanan lateral suatu struktur. Lee dalam papernya memberikan gambaran pengujian spesimen frame yang diperkuat *bracing* kabel X, namun untuk penerapan pada model struktur belum tersentuh, oleh sebab itu agar model pengaku ini dapat diaplikasikan, diperlukan metode pemodelan *bracing* yang tepat agar memberikan gambaran yang realistis dengan kenyataannya.

Untuk bisa mengaplikasikannya pada SAP2000 pada berbagai ragam struktur, diperlukan prosedur memodel *bracing* kabel yang tepat dan tervalidasi sehingga nantinya memperoleh perilaku struktur yang sesuai kenyataan. SAP2000 dipilih karena aplikasi ini cukup banyak digunakan khususnya Indonesia dalam hal analisis struktur. Dalam proses validasi, model spesimen pengujian langsung yang Lee (2015) gunakan dijadikan acuan untuk memperoleh perilaku yang sesuai antara hasil penelitian dan model 3D.

MATERI DAN METODE

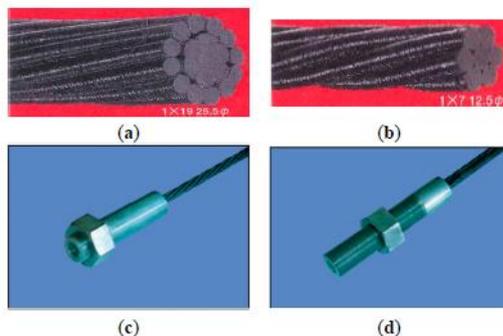
Untuk bisa menghasilkan tahapan memodel *bracing* kabel yang tepat, proses validasi merupakan hal wajib yang perlu dilakukan. Validasi merupakan suatu tindakan verifikasi parameter spesifik berdasarkan eksperimen, dan menunjukkan bahwa parameter tersebut sesuai dengan kriteria yang ditentukan untuk tujuan tertentu. Validasi dilakukan demi menjamin bahwa metode analisis berjalan dan berfungsi sesuai dengan perilaku aslinya.

Kabel Komposit Serat Carbon

Dengan menggunakan serat karbon, *resin thermosetting*, dan kulit *polyester*,

Tokyo Rope menciptakan kabel komposit serat karbon (serat karbon) yang kuat dan ringan. Kabel ini dibuat dengan teknologi komposit baru yang menggabungkan serat karbon menjadi strand kabel. Kabel komposit serat karbon memiliki sifat mekanik yang sama dengan *strand* serat karbon murni, yaitu tidak mudah melar atau mengalami deformasi plastis.

Gambar 1. menunjukkan penampakan kabel komposit serat karbon dan terminal pengikatnya. Terdapat dua kabel serat karbon pada Gambar 1, yaitu 19-strand dengan diameter 25.5 mm (gambar 1a) dan tujuh strand dengan diameter 12.5 mm (gambar 1b). Kabel serat karbon juga dilengkapi dengan terminal *fixer* yang berfungsi untuk menghubungkan kabel dengan struktur lain. Terminal *fixer* ada yang untuk satu kabel (gambar 1c) dan ada yang untuk beberapa kabel (gambar 1d). Kabel komposit serat karbon sangat kuat dan ringan, dengan kekuatan tarik setara dengan *Strand* baja untuk beton prategang, tetapi hanya seberat seperlima dari *Strand* baja. Kabel CFC juga tahan terhadap korosi, baik dari alkali maupun asam (Tokyo Rope, 2013).



Gambar 1. kabel komposit serat karbon dan terminal pengikatnya (Lee, 2015)

Kabel komposit serat karbon telah diaplikasikan dalam berbagai proyek teknik sipil. Misalnya, kabel serat karbon digunakan sebagai tendon untuk menegangkan beton prategang pada jembatan, kabel serat karbon juga diaplikasikan sebagai *cable stay* untuk memperkuat jembatan. Namun, penggunaan kabel serat karbon untuk memperkuat struktur bangunan masih jarang diteliti. Lee (2015) adalah salah satu peneliti yang mencoba menggunakan kabel serat karbon dengan teknik X-bracing untuk memperkuat tahanan lateral (Lee, 2015).

Elemen Kabel (SAP2000)

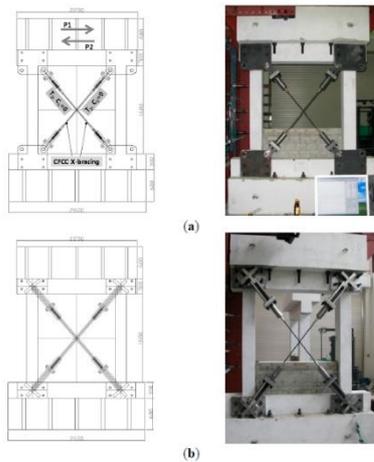
SAP2000 dapat menganalisis perilaku kabel dengan mempertimbangkan berbagai faktor, seperti berat sendiri, temperatur, dan tegangan awal. Untuk melakukan analisis ini, *case type* yang digunakan adalah *nonlinear*, dengan mengaktifkan parameter P-delta yang memperhitungkan deformasi yang besar. Aplikasi ini bisa menyesuaikan kondisi kabel, apakah kendur atau kencang dengan opsi geometri kabel.

Untuk mencegah kabel menjadi kendur dan tidak stabil, perlu diberikan tegangan awal dan beban sendiri pada kabel. Hal ini dilakukan dengan mengubah semua *linier load cases* menjadi *nonlinear*, sehingga kabel dapat menahan beban sendiri dan tegangan tarik sesuai dengan geometri kabel dan *target force*. Jika kabel tidak memiliki tegangan awal dan beban sendiri, SAP2000 akan memberikan tegangan awal yang sangat kecil secara otomatis, tetapi ini tidak disarankan.

Target force adalah beban yang diberikan pada kabel untuk membuatnya memiliki tarik awal. Beban ini bertujuan untuk mengendalikan deformasi kabel saat tarik awal tercapai. Target force harus ditentukan besarnya dan lokasinya, yaitu pada ujung jauh (J-end) atau ujung dekat (I-end) kabel. Target force hanya berlaku untuk analisis *nonlinier* statik, dan tidak akan berpengaruh pada *load case type* lainnya (Computer and Structures, 2015).

Model Spesimen Laboratorium

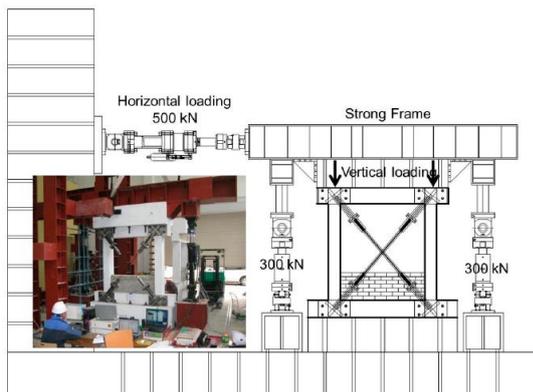
Lee 2015 menguji kinerja seismik rangka beton bertulang yang diperkuat dengan sistem *bracing* kabel komposit serat karbon. Lee membuat tiga spesimen untuk penelitiannya, yaitu rangka beton bertulang tanpa perkuatan, rangka beton bertulang dengan perkuatan *bracing* kabel sambungan pelat datar, dan rangka beton bertulang dengan sambungan jenis *protrusion*.



Gambar 2. Spesimen struktur yang diperkuat dengan *bracing* kabel komposit serat karbon (a) pelat datar dan (b) *protrusion* (Lee, 2015)

Pengujian ini bertujuan untuk melihat ketahanan gempa pada *bracing* kabel dengan meninjau kapasitas beban dan deformasi yang dihasilkan melalui pembebanan lateral.

Persiapan pengujian pembebanan siklik pada spesimen ditunjukkan oleh Gambar 3. Dua aktuator dengan kapasitas 300kN dan 500kN digunakan untuk memberikan beban, selain itu beban vertikal konstan sebesar 219 kN diberikan pada kedua kolom oleh aktuator 300 kN, sedangkan pembebanan siklik dikerjakan aktuator 500 kN.



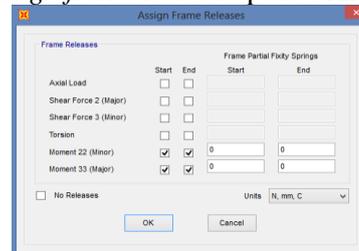
Gambar 3. Pengujian beban siklik (Lee, 2015)

Pemodelan *Bracing* Kabel

Bracing kabel dimodel dengan elemen kabel dan frame, hal ini dilakukan karena dalam proses analisisnya terdapat beberapa batasan. Batasan yang dimaksud adalah, untuk melihat kinerja suatu bangunan tidak bisa dilakukan dengan elemen kabel

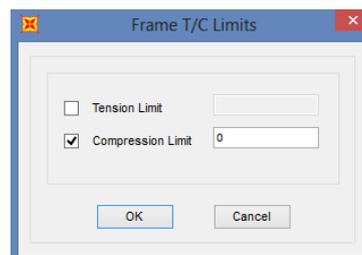
melainkan perlu dimodel sebagai elemen frame. Namun untuk mendapatkan tegangan total yang diterima pada kabel saat beban *ultimate* diperoleh dengan elemen kabel. Oleh sebab itu, pemodelan *bracing* perlu dilakukan dengan dua elemen.

Pemodelan elemen *frame* digunakan sebagai acuan dalam memvalidasi antara model 3D dan hasil eksperimen yang dilakukan Lee (2015). Elemen ini dipilih untuk membandingkan antara *load-drift* eksperimen dengan model 3D melalui analisis *pushover*. *Bracing* elemen frame dimodel dengan pipa pejal dengan diameter 15.2mm dan dibebaskan terhadap momen serta gaya tekan karena mengingat hanya aksial tarik yang mampu ditahan oleh *bracing* kabel. Pembebasan momen dilakukan dengan fitur *assign frame releases* pada SAP2000.



Gambar 4. Fitur *assign frame releases*

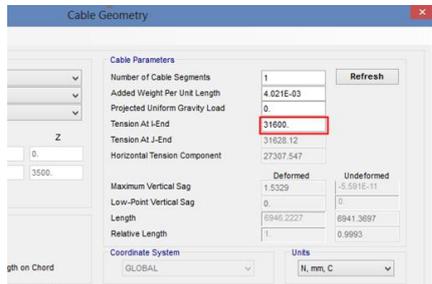
Sedangkan aksial tekan dibebaskan dengan fitur *frame tension or compression limit*. Bagian *compression limit* diisi dengan 0 untuk mengabaikan tekan yang terjadi.



Gambar 5. Fitur *frame tension or compression limit*

Pemodelan *bracing* dengan elemen kabel bertujuan untuk mengetahui tegangan total yang dialami saat beban *ultimate* bekerja. Tegangan total yang dimaksud berasal dari besarnya tegangan awal yang digunakan untuk mengencangkan kabel ditambah dengan tegangan tambahan akibat pembebanan maksimum. Untuk memperoleh tegangan awal saat pngencangan dilakukan *trial-error* dengan mengacu pada simpangan

antar lantai pada model struktur yang telah dianalisis dengan menerapkan *bracing* dengan model elemen frame.



Gambar 6 Fitur untuk memasukkan gaya aksial saat pemberian tegangan awal

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf}$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4 E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{1/4}$$

$$E_{me} = 550 f'm$$

a = Lebar start diagonal

h_{col} = Tinggi kolom antar as

r_{inf} = Panjang strut

E_{me} = Modulus elastisitas dinding

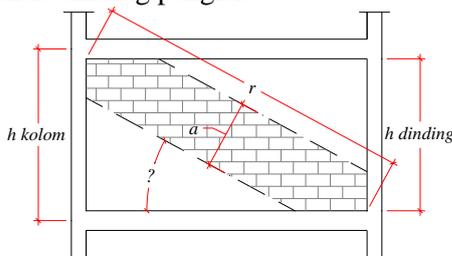
t_{inf} = Tebal dinding dan stat

E_{fe} = Modulus elastisitas kolom

I_{col} = Momen inersia kolom

Model Strat Diagonal

Spesimen pada eksperimen Lee menambahkan dinding pengisi setinggi 48cm, tebal 5.7cm dan mutu 8MPa. Penambahan dinding mengikuti tinjauan salah satu *frame* gedung yang akan diperkuat pada penelitian Lee (2015). Oleh karena dalam validasi mengacu pada spesimen Lee, maka dinding pengisi perlu dimodel. Pemodelan dinding dilakukan dengan model *diagonal strut* berdasarkan FEMA-356. *Diagonal strut* merupakan pemodelan dinding yang sudah umum dan banyak dijadikan acuan. Dinding pengisi dianggap menerima gaya tekan dari rangka struktur yang terkena gaya lateral. Gaya ini ditahan oleh dinding secara diagonal. Oleh karena itu, dinding pengisi dimodel sebagai *strut* yang hanya bisa menerima gaya tekan aksial dan tidak bisa menerima gaya tarik. Karena dinding pengisi terbuat dari material yang tidak homogen maka kuat tariknya diabaikan. Untuk lebar strat, ada banyak rumus yang berkembang. Salah satunya adalah rumus yang digunakan dalam FEMA-356 untuk analisis dinding pengisi.

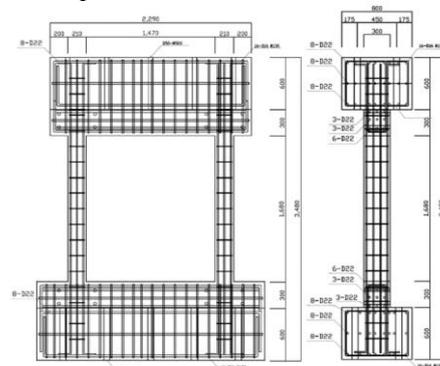


Gambar 7. Model Dinding Pengisi Sebagai Strat Diagonal (Federal Emergency Management Agency, 2000)

Model Validasi

Dalam melakukan validasi terdapat 3 model yang disesuaikan terhadap hasil eksperimen Lee 2015. Model I yakni *frame* dengan dinding pengisi setinggi 48cm yang dimodel dengan *diagonal strut* dan bertujuan untuk menyamakan perilaku awal saat belum diberikannya perkuatan *bracing* kabel. Sedangkan model II dan III memiliki perbedaan pada jenis sambungannya, model II menggunakan pelat datar sedangkan model III dengan *protrusion*.

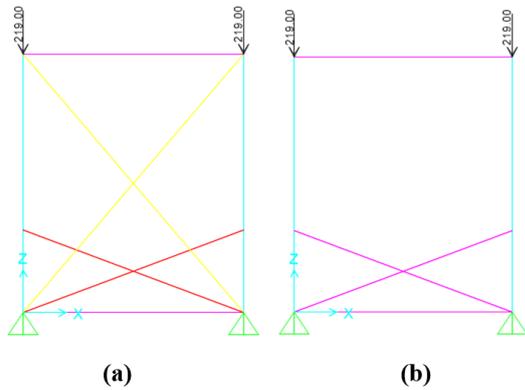
Dimensi yang digunakan pada model validasi mengikuti keterangan ukuran eksperimen Lee pada Gambar 8. Mutu material beton diambil sebesar 24MPa dimana ini adalah mutu rata-rata material beton eksperimen Lee.



Gambar 8. Model Dinding Pengisi Sebagai Strat Diagonal (Lee, 2015)

Terdapat dua jenis pembebanan yang diterapkan pada model validasi yakni beban

tetap vertical pada kedua kolom sebesar 219kN, sedangkan beban horizontal dikerjakan *pushover* dengan kontrol perpindahan yang mengacu pada simpangan maksimal dari hasil eksperimen.

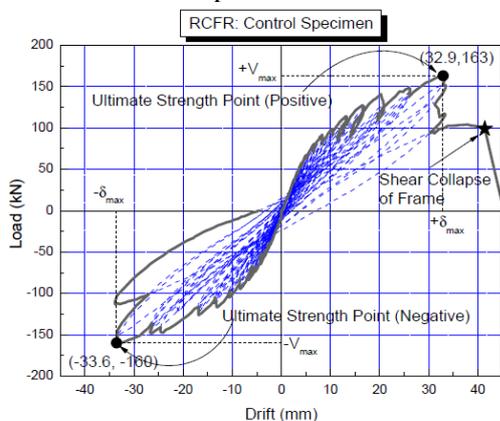


Gambar 9. (a) model validasi dengan perkuatan bracing, dan (b) model validasi tanpa perkuatan

Metode Validasi

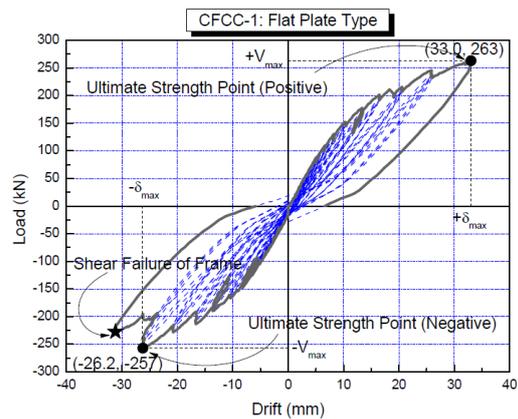
Validasi dibagi menjadi tiga tahapan, yakni Tahap ke-1 melakukan penyesuaian antara model validasi dan eksperimen tanpa perkuatan. Tahap ke-2 menyesuaikan perilaku antara struktur yang telah diperkuat terhadap eksperimen dengan hubungan bracing kabel menggunakan pelat datar, sedangkan tahap ke-3 perkuatan dengan jenis sambungan yang berbeda yaitu *protrusion*.

Validasi Tahap ke-1 dilakukan dengan mengerjakan *pushover* pada *frame* tanpa perkuatan *bracing*, dimana hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan model dibandingkan dengan *load-drift backbone* hasil eksperimen Gambar 10.



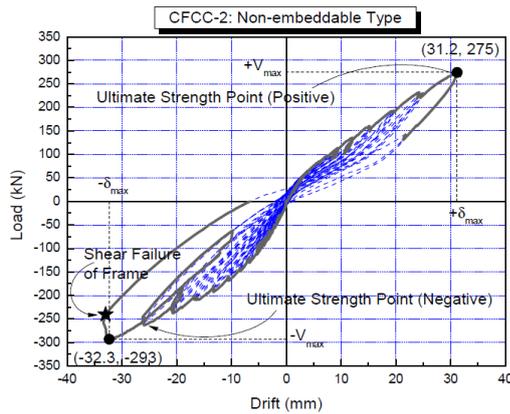
Gambar 10. Kurva hubungan load dan drift eksperimen frame tanpa perkuatan kabel (Lee, 2015)

Setelah kondisi tanpa perkuatan sudah dipastikan memiliki perilaku yang sesuai, maka pemodelan *bracing* kabel karbon dapat dilakukan. Tahap ke-2 validasi antara *bracing* kabel dengan hubungan pelat datar dilakukan dengan memberikan beban serupa seperti tahap satu yakni beban vertikal konstan dan *pushover* secara lateral untuk memperoleh hubungan geser dasar vs *drift* dan dibandingkan dengan eksperimen Gambar 11. Dalam proses penyesuaiannya, elastisitas dari *bracing* kabel disesuaikan dengan *trial and error* untuk mendapat perilaku yang serupa dengan *backbone* dari *load drift* eksperimen. Elastisitas asli kabel serat karbon adalah 155kN/mm², dimana nilai ini nantinya disesuaikan hingga model validasi memiliki perilaku yang sesuai eksperimen.



Gambar 11. Kurva hubungan load dan drift eksperimen frame perkuatan kabel hubungan pelat datar (Lee, 2015)

Pada dasarnya validasi tahap ke-3 serupa dengan tahap ke-2, perbedaannya terletak pada sambungan antara *bracing* kabel dengan struktur beton bertulang. Pada tahap ke-2 sambungannya berupa pelat datar, sedangkan tahap ke-3 berupa *protrusion*. Penyesuaian model validasi ke-3 serupa dengan tahap 2 yakni dilakukan dengan merubah elastisitas material serat karbon. Hasil *backbone* kurva *load vs drift* menjadi acuan dan disandingkan dengan hasil geser dasar dan perpindahan analisis *pushover*.



Gambar 12. Kurva hubungan load dan drift eksperimen frame perkuatan kabel hubungan protrusion (Lee, 2015)

Pemodelan bracing kabel pada model validasi menggunakan *elemen frame* dengan bentuk pipa pejal, hal ini dilakukan mengingat dalam SAP2000 analisis *pushover* hanya dapat dikerjakan pada *elemen frame*. Kabel yang dimodel *elemen frame* memiliki kondisi kencang dan lurus sempurna, namun pada kenyataannya kabel perlu diberikan gaya tarik awal agar memiliki kondisi yang serupa. Oleh sebab itu dalam pemodelan *bracing* dengan *elemen kabel* menjadi pelengkap untuk memperoleh besarnya tegangan awal.

Untuk memperoleh besarnya tegangan awal pada *elemen kabel* dilakukan dengan membandingkan simpangan antara bangunan dengan *bracing* *elemen frame* dengan *elemen kabel* yang telah diberikan perkuatan. Penyesuaian dapat dilakukan dengan *trial and error* untuk memperoleh tegangan tarik awal yang dibutuhkan. Selain untuk mengetahui besarnya tegangan awal, dengan *elemen kabel* kita juga dapat memperoleh tegangan total yang ditahan oleh kabel baja dengan menerapkan beban kombinasi *ultimate*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

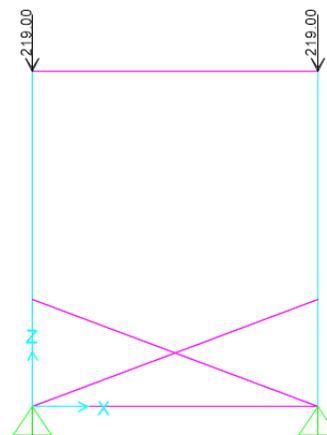
Penyesuaian antara model validasi dan eksperimen dilakukan dengan analisis *nonlinear pushover* pada SAP2000. Analisis *pushover* dapat menggunakan dua jenis kontrol yakni kontrol beban ataupun perpindahan. Dalam model ini dilakukan kontrol perpindahan dengan mengacu pada *load drift* eksperimen yakni sebesar 50mm.

Tujuan dari validasi model dengan eksperimen adalah untuk menemukan cara

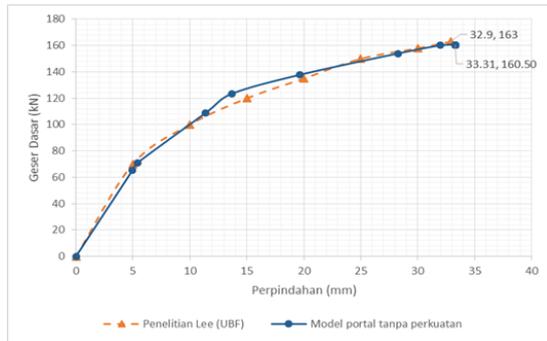
yang tepat memodel *bracing* kabel serat karbon yang bersesuaian dengan eksperimen. Langkah memodel ini diharapkan nantinya dapat diaplikasikan untuk memodel *bracing* pada struktur-struktur yang memerlukan perkuatan.

Validasi

Hubungan gaya geser dasar dan perpindahan model *frame* tanpa perkuatan didapat melalui analisis *pushover* pada SAP2000. Model ini menggunakan *diagonal strut* untuk dinding sesuai dengan FEMA 356 yang dimensi dan mutunya mengacu eksperimen Lee. Gambar 13 menunjukkan *frame* tanpa *bracing* kabel model SAP2000. Gambar 14 memperlihatkan perbandingan *load-drift* eksperimen dengan gaya geser dasar vs perpindahan model tanpa perkuatan. Dimana didapat bahwa kurva hasil model dan eksperimen saling berhimpit dengan beban lateral maksimum lebih kecil 1.5% dan simpangan 1.2% lebih besar dari eksperimen. Dengan kata lain beban lateral yang mampu ditahan model cukup dekat dengan eksperimen yakni 160.5kN sedangkan eksperimen menampilkan 163kN. Simpangan model di angka 33.3 mm dan eksperimen 32.9mm, model lebih besar 0.4mm (1.2%).

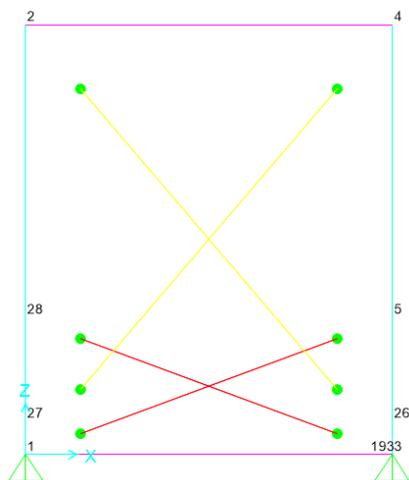


Gambar 13 Model frame tanpa perkuatan bracing kabel



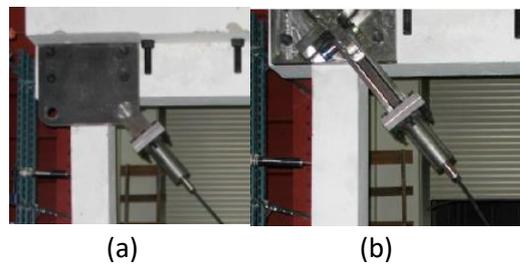
Gambar 14. Perbandingan load-drift eksperimen dan model frame tanpa perkuatan

Model dengan perkuatan breising kabel serat karbon pada SAP2000 ditunjukkan pada Gambar 15. Breising kabel serat karbon dimodel sebagai elemen *frame* yang hanya bisa menerima gaya tarik dan tidak menerima momen pada kedua ujungnya. Selanjutnya model dengan bracing dibandingkan dengan eksperimen Lee (2015), dimana terdapat breising kabel dengan sambungan pelat datar yang tidak terkekang secara momen serta dapat mengalami putaran sudut. Gambar 16a menunjukkan sambungan pelat datar, dimana kondisi seperti ini dapat dimodel dengan *release momen* di SAP2000. Sebagai hasil dari *trial and error* elastisitas pada validasi tahap ke-2 didapat bahwa dengan reduksi 35% dari elastisitas spesifikasi Tokyo Rope, model yang diperkuat *bracing* memberikan perilaku yang sesuai dengan hasil eksperimen.



Gambar 15. Model dengan perkuatan bracing serat karbon

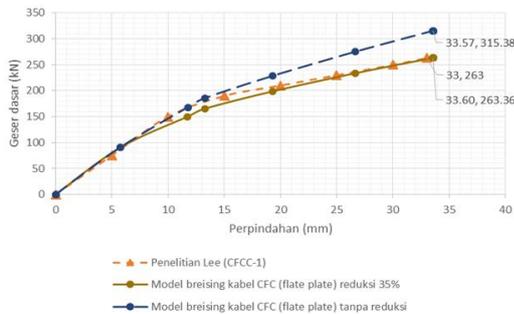
Model dengan perkuatan *bracing* pada tahap ke-2 dan tahap ke-3 memiliki perbedaan pada hubungan antara kebel dan *frame*, dimana pada model tahap ketiga sambungan yang diterapkan adalah jenis *protrusion* seperti yang ditampilkan di Gambar 16b. Bracing kabel dimodel dengan elemen *frame* dan diberikan perilaku yang sama seperti tahap ke-2. Perilaku yang dimaksud adalah pembebasan momen pada kedua ujung kebel dan kebel hanya bisa menahan beban aksial tarik. Besarnya modifikasi elastisitas hasil *trial and error* dengan membandingkan perilaku *load drift* antara model dan eksperimen adalah reduksi sebesar 5% dari elastisitas spesifikasi kabelnya.



Gambar 16. (a) sambungan pelat datar dan (b) sambungan *protrusion* (Lee, 2015)

Hubungan gaya geser dasar dan perpindahan model frame dengan perkuatan *bracing* kabel (sambungan pelat datar) didapat melalui analisis pushover pada SAP2000. Model ini menggunakan *frame* dan dinding pengisi berupa *diagonal strut* yang sudah tervalidasi pada tahap ke-1, sedangkan *bracing* menggunakan elemen *frame* yang direduksi sebesar 35% dari elastisitas spesifikasi awal. Gambar 17 memperlihatkan perbandingan *load-drift* eksperimen dengan gaya geser dasar vs perpindahan model dengan perkuatan kabel. Dimana didapat bahwa kurva hasil model dan eksperimen saling berhimpit dengan beban lateral maksimum lebih besar 0.14% dan simpangan 1.81% lebih besar dari eksperimen. Dengan kata lain beban lateral yang mampu ditahan model cukup dekat dengan eksperimen yakni 263.36kN sedangkan eksperimen menampilkan 263kN. Simpangan model di angka 33.6 mm dan eksperimen 33mm, model lebih besar 0.6mm (1.81%).

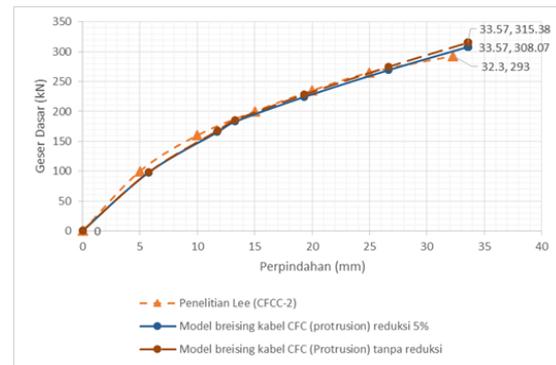
Perbandingan *load drift* antara model bracing tanpa reduksi dan dengan reduksi 35% serta hasil eksperimen ditampilkan pada Gambar 17. Model tanpa reduksi elastisitas kabel hanya sesuai dengan eksperimen sampai pada kondisi elastis. Setelah itu, model menjadi lebih kaku daripada eksperimen Lee. Model tanpa reduksi elastisitas kabel bisa menahan beban lateral maksimum 20% lebih besar dari eksperimen, tetapi simpangan maksimumnya lebih besar 0.03 mm dari eksperimen. Model dengan reduksi elastisitas kabel 35% lebih dekat dengan eksperimen, baik dari segi beban lateral maksimum maupun simpangan maksimum. Simpangan yang terjadi pada kedua model tidak terlalu berbeda, tetapi beban lateral maksimum sangat berbeda.



Gambar 17. Validasi model kekuatan bracing serat karbon dengan sambungan pelat datar (flate plate)

Hubungan gaya geser dasar dan perpindahan model frame dengan kekuatan bracing kabel dan sambungan *protrusion* didapat melalui analisis pushover pada SAP2000. Bracing dimodel dengan elemen frame dan direduksi sebesar 5% dari elastisitas serat kabel. Gambar 18 memperlihatkan perbandingan *load-drift* eksperimen dengan gaya geser dasar vs perpindahan model dengan kekuatan kabel. Dimana didapat bahwa kurva hasil model dan eksperimen saling berhimpit dengan beban lateral maksimum lebih besar 5.1% dan simpangan 3.9% lebih besar dari eksperimen. Dengan kata lain beban lateral yang mampu ditahan model cukup dekat dengan eksperimen yakni 308.07kN sedangkan eksperimen menampilkan 293kN. Simpangan model di angka 33.57mm dan eksperimen 32.3mm, model lebih besar 0.6mm (3.9%).

Gambar 18 menunjukkan bahwa model dengan dan tanpa reduksi memiliki perilaku yang serupa pada kondisi elastis dan plastis. Namun, ada perbedaan yang cukup besar pada beban lateral maksimum yang bisa ditahan oleh kedua model. Model tanpa reduksi menahan beban lateral maksimum 7.31 kN lebih besar dari model dengan reduksi. Oleh karena itu, model dengan reduksi elastisitas material kabel sebesar 5% dipilih karena lebih sesuai dengan eksperimen pada kondisi elastis, plastis maupun beban maksimumnya.



Gambar 18. Validasi model kekuatan bracing serat karbon dengan sambungan protrusion

KESIMPULAN

Dalam memodel kekuatan bracing kabel komposit serat karbon pada SAP2000 dilakukan dengan dua elemen yakni elemen *frame* dan elemen kabel. Penggunaan elemen *frame* dimaksudkan untuk memperoleh kinerja ataupun perilaku struktur pasca kekuatan baik ditinjau deformasi, gaya dalam, kapasitas, serta formasi/konfigurasi dari kekuatan kabel. Sedangkan elemen kabel berfungsi untuk memperoleh tegangan awal saat pengencangan kabel dan tegangan total akibat beban ultimate. Tegangan awal saat pengencangan didapat dengan membandingkan perilaku struktur yang telah diperkuat bracing elemen *frame* dengan elemen kabel, sehingga didapat konfigurasi yang sesuai.

Dalam memodel bracing kabel perlu dilakukan reduksi pada elastisitasnya, yakni sebesar 35% untuk jenis sambungan pelat datar dan 5% untuk jenis sambungan *protrusion*. Dimana angka ini merupakan hasil dari validasi antara model dengan eksperimen yang dikerjakan Lee (2015).

Berdasarkan riset tersebut dapat dijabarkan prosedur memodel bracing kabel:

1. Mendefinisikan material kabel komposit serat karbon, dimana elastisitas direduksi sebesar 35% untuk sambungan pelat datar, dan 5% untuk sambungan *protrusion*.
2. Mendefinisikan *bracing* kabel dengan elemen *frame* berpenampang pipa pejal.
3. Menggambar bracing kabel pada model struktur yang ingin diperkuat.
4. Struktur dianalisis untuk melihat perubahan perilaku akibat penambahan bracing kabel.
5. Jika perkuatan dirasa belum efektif, maka dilakukan lelaran dimana konfigurasi kabel, jenis sambungan dan diameter kabel dimodifikasi sedemikian rupa hingga diperoleh hasil yang diinginkan.
6. Setelah diperoleh konfigurasi, jenis sambungan dan diameter yang tepat, langkah selanjutnya adalah mendefinisikan material dan property kabel dengan elemen kabel.
7. Mendefinisikan tegangan awal kabel dengan fitur *target load*.
8. Menggambar *bracing* dengan elemen kabel sesuai konfigurasi dan dimensi hasil langkah ke-5.
9. *Load case* dimodifikasi menjadi *non-linear* dimana pada pembebanan awal diaktifkan beban mati struktur dan tegangan awal kabel.
10. Perilaku antara model yang diperkuat hasil langkah 5 dibanding, jika perilaku yang diperoleh sudah cukup dekat maka dapat dilanjutkan dengan mengecek gaya dalam aksial total akibat beban *ultimate*.
11. Namun jika perilaku hasil langkah 5 dengan langkah 10 belum sesuai, tegangan awal dimodifikasi lagi hingga mendapat hasil terbaik dan mendekati perilaku struktur yang diperkuat pada langkah 5.

DAFTAR PUSTAKA

Computer and Structures. 2015. *CSI Analysis Reference Manuals*. California 94704 USA: University Avenue Berkeley.
Federal Emergency Management Agency. 2000. *Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings (FEMA 356)*. Washington, D.C: Federal Emergency Management Agency.

Lee, K.S. 2015. An Experimental Study on Non-Compression X-Bracing Systems Using Carbon Fiber Composite Cable for Seismic Strengthening of RC Buildings. *Polymers*, 7: 1716–1731.
SNI. 2002. *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
SNI. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung*. Jakarta : Badan Standardisasi Nasional.
SNI. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan dan Nongedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
Tokyo Rope. 2013. *Catalogue of CFCC-Carbon Fiber Composite Cable*. Tokyo, Japan: Tokyo Rope MFG. Co., Ltd.
Viswanath, K.G., Prakash, K.B., Desai, A. 2010. Seismic Analysis of Steel Braced Reinforced Concrete Frames. *Int. J. Civ. Struct. Eng*, 1: 114–122.
Xie, Q. 2005. State of the Art of Buckling-Restrained Braces in Asia. *J. Constr. Steel Res*, 61: 727–748.
Zhou, Y., Shao, H., Cao, Y., Lui, E.M. 2021. Application of Buckling-Restrained Braces to Earthquake-Resistant Design of Buildings: A Review. *Engineering Structures*, 246.