

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Kajian Numerik Terhadap Kinerja Link Geser dengan Pengaku Diagonal pada Struktur Rangka Baja Berpenopang Eksentrik (EBF)

Yurisman

Program Doktor Bidang Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung / Staf Pengajar Politeknik Negeri Padang, Kampus Politeknik Limau Manis Padang
E-mail: yurisman_pdg@yahoo.com

Bambang Budiono

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132
E-mail: b.budiono@lapi.itb.ac.id

Muslinang Moestopo

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132
E-mail: moestopo@si.itb.ac.id

Made Suarjana

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132
E-mail: msuarjana@si.itb.ac.id

Abstrak

Makalah ini menyajikan hasil studi numerik yang meneliti perilaku link geser dengan menggunakan pengaku diagonal pada bagian badan untuk meningkatkan kinerjanya, pada sistem struktur baja berpengaku eksentrik (EBF). Penelitian ini bertujuan untuk meneliti perilaku link geser dengan menggunakan pengaku diagonal pada bagian badan dibawah pembebanan statik monotonik dan siklik dengan kontrol perpindahan, riwayat pembebanan yang diberikan dalam pengujian ini sesuai dengan standar pembebanan AISC 2005. Analisis dilakukan dengan pendekatan elemen hingga Non-Linier dengan menggunakan perangkat lunak komputer MSC/NASTRAN. Link dimodelkan sebagai elemen shell yang ditumpu pada kedua ujungnya sedangkan beberapa nodal pada posisi pembebanan diperbolehkan untuk bertranslasi dalam satu arah saja (sumbu-y). Beberapa parameter penting yang dianggap berpengaruh secara signifikan terhadap kinerja link geser telah dianalisa mencakup: tebal sayap, tebal badan, tebal dan jarak pengaku badan, tebal pengaku diagonal dan geometrik pengaku diagonal. Perilaku link geser dengan pengaku diagonal badan dibandingkan dengan perilaku link standar yang direncanakan sesuai dengan ketentuan AISC 2005. Hasil analisis menunjukkan bahwa pengaku diagonal badan dapat meningkatkan kinerja link geser dalam hal: kekuatan kekakuan dan dissipasi energi dalam menahan beban lateral. Namun, perbedaan nilai daktilitas antara link geser dengan pengaku diagonal badan dan link geser yang direncanakan sesuai standar AISC tidak begitu signifikan. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa ketebalan pengaku diagonal dan model geometrik pengaku tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap kinerja link geser.

Kata-kata Kunci: Link geser, pengaku diagonal, beban monotonik, beban siklik, kekuatan, kekakuan, dissipasi energi, daktilitas.

Abstract

This paper presents a numerical study to investigate the behaviour of shear link in case of enhancement of the shear link performance of Eccentrically Braced Frames (EBF) of steel structures by using diagonal web stiffener. This research aims to investigate the behaviour of shear link with diagonal stiffener under monotonic and cyclic of loading with displacement control, the loading hystory is applied to the model of link accordance with standard of AISC 2005. Non-Linier Finite Element Method is applied using the computer software of MSC/NASTRAN. Link is modeled as shell element and fixed at its both ends except for degree of

freedom of the vertical displacement (y -direction) at the one end where the load is applied. Several important parameters of shear link has been investigated: the thickness of flange, web and web stiffener, the space of web stiffener, the thickness of diagonal web stiffener and its geometric. The behaviour of shear link with diagonal web stiffener is compared to the behaviour of the link designed in accordance with the AISC 2005 Standard Code of Practice. The results of the analysis show that the diagonal web stiffener increases the performance of the shear link in terms of strength, stiffness, energy dissipation to resist lateral load. However, the difference between the ductilities of the link with diagonal web stiffener and standard link of AISC Code is not significant. Parameters which are significantly influencing the performance of the shear link are the thickness of diagonal web stiffener and its geometry.

Keywords: Shear link, diagonal web stiffener, monotonic loading, cyclic loading, strength, stiffness, ductility, energy of dissipations.

1. Pendahuluan

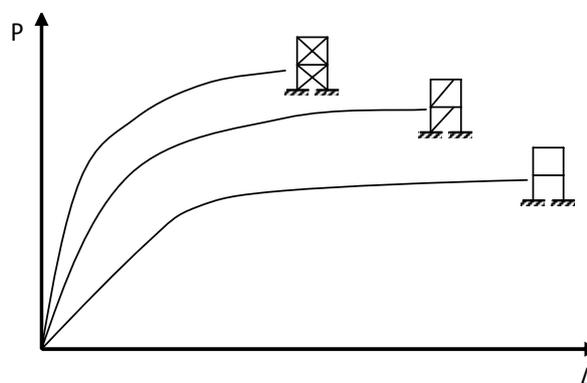
Mengingat kondisi geografis Indonesia yang terletak di daerah dengan tingkat kejadian gempa bumi tektonik yang relatif tinggi maka perlu dilakukan berbagai upaya untuk memperkecil resiko yang ditimbulkannya. Dalam beberapa kejadian gempa besar di Indonesia jumlah korban yang paling banyak terutama disebabkan oleh keruntuhan bangunan. Oleh karena itu desain bangunan tahan gempa berdasarkan pada konsep: bahwa akibat gempa besar bangunan diperbolehkan mengalami rusak berat tetapi manusia yang ada di dalamnya harus selamat. Berdasarkan Standard Nasional Indonesia (SNI) gempa yang berlaku saat ini, struktur bangunan tahan gempa pada umumnya direncanakan dengan mengaplikasikan konsep daktilitas. Dengan penerapan konsep ini, pada saat gempa kuat terjadi elemen-elemen struktur tertentu yang dipilih diperbolehkan untuk mengalami plastifikasi (kerusakan) sebagai sarana untuk pendissipasian energi gempa yang diterima oleh struktur. Namun demikian struktur diharapkan tidak runtuh (*collapse*). Agar struktur tidak runtuh maka elemen-elemen tertentu tersebut harus direncanakan sedemikian rupa agar dapat mengalami deformasi inelastis secara stabil selama terjadinya gempa kuat.

Struktur baja merupakan salah satu sistem struktur tahan gempa dengan kinerja yang sangat bagus, karena material baja mempunyai karakteristik yang unik dibandingkan dengan material struktur lainnya, dengan mengandalkan pada sifat daktilitas dan kekuatannya yang tinggi maka struktur baja sangat cocok digunakan untuk daerah-daerah dengan tingkat seismisitas yang tinggi. Dari hasil-hasil riset yang pernah dilakukan telah didapatkan tiga sistem struktur baja tahan gempa yang umum digunakan yaitu: (1) Rangka penahan momen (*Moment Resisting Frame / MRF*), (2) Rangka berpengaku konsentrik (*Concentrically Braced Frame / CBF*), (3) Rangka berpengaku eksentrik (*Eccentrically Braced Frame / EBF*). (Bruneau, 1998). Rangka baja penahan momen (*MRF*) mempunyai kemampuan dissipasi energi yang cukup untuk dapat memberikan daktilitas yang diperlukan (*required ductility*) tetapi struktur ini kurang kaku sehingga memerlukan ukuran penampang yang lebih besar dan

panel zone pelat ganda yang mahal untuk memenuhi persyaratan drift (*drift requirements*). Pada sisi lain sistem rangka berpengaku konsentrik (*CBF*) secara efisien dapat memenuhi batas-batas lendutan melalui aksi rangkanya tetapi tidak memberikan suatu mekanisme yang stabil dalam dissipasi energi (Popov, dkk., 1983-1986). Perbedaan perilaku ketiga system struktur baja tersebut diperlihatkan dalam **Gambar 1**. Karena keterbatasan kedua sistem struktur tersebut maka dikembangkan suatu sistem struktur baru yang disebut struktur berpengaku eksentrik (*EBF*).

2. Maksud dan Tujuan

Maksud dilakukannya penelitian ini adalah dalam rangka mendapatkan sistem struktur EBF yang mempunyai kinerja maksimum melalui peningkatan kinerja elemen link. Untuk mencapai maksud tersebut penelitian ini bertujuan untuk: 1) Memahami mekanisme penyerapan energi gempa pada struktur rangka baja berpengaku eksentrik, 2) Melakukan pengkajian terhadap parameter – parameter apa saja yang berpengaruh secara signifikan terhadap perilaku elemen link dalam sistem struktur rangka baja berpengaku eksentrik, 3) Melakukan pengkajian terhadap keterkaitan parameter – parameter tersebut antara satu dengan yang lainnya dalam menghasilkan link dengan kinerja yang lebih baik, 4) Melakukan pengkajian terhadap penggunaan pengaku badan yang dipasang secara diagonal pada elemen link, dalam rangka peningkatan kinerja link dalam sistem EBF.



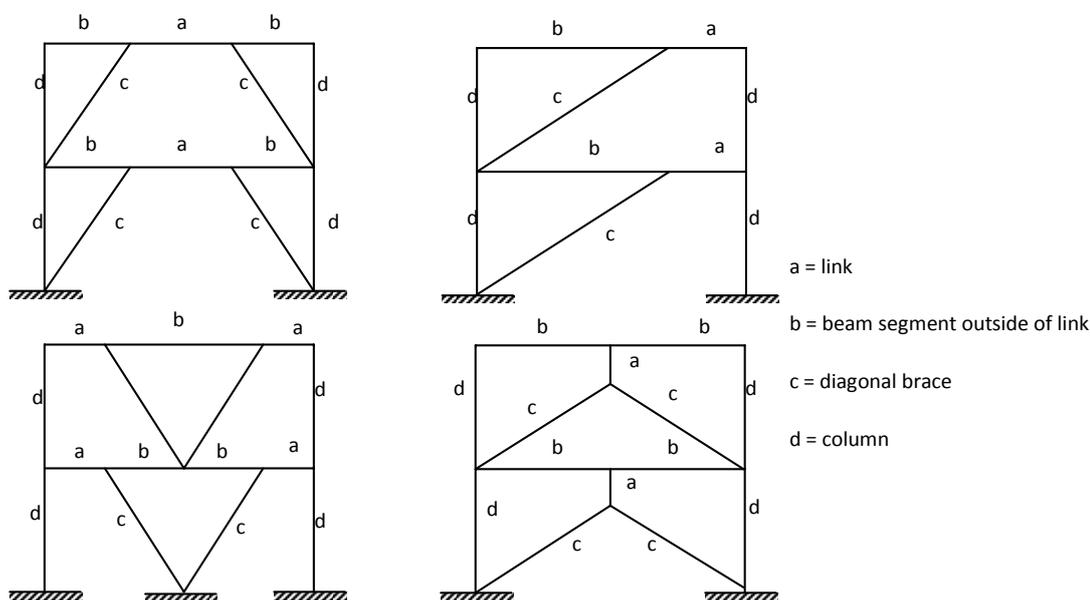
Gambar 1. Perbedaan perilaku tiga model sistem struktur baja (Moestopo, M., dkk, 2006)

3. Studi Literatur

3.1 Tinjauan umum terhadap sistem struktur berpenopang eksentrik (EBF)

Sistem struktur berpenopang eksentrik (EBF) merupakan pengembangan dari dua sistem struktur penahan gaya lateral yang ada sebelumnya yaitu: MRF dan CBF. Sistem ini dikembangkan untuk menyempurnakan sistem MRF dan CBF, dimana sistem MRF memiliki nilai daktilitas dan kapasitas dissipasi energi yang besar dan stabil namun memiliki nilai kekakuan yang rendah, disisi lain CBF memiliki kekakuan yang lebih besar namun mempunyai kapasitas dissipasi energi yang lebih rendah. **Gambar 2** memperlihatkan beberapa bentuk sistem EBF yang umum digunakan (AISC, 2005).

Sistem EBF dapat menggabungkan masing-masing keuntungan dari kedua sistem struktur tersebut, serta memperkecil kelemahan yang dimilikinya. Secara spesifik EBF mempunyai beberapa karakteristik antara lain: 1) mempunyai kekakuan elastik yang tinggi, 2) mempunyai respon inelastik yang stabil dibawah pembebanan lateral siklik, 3) mempunyai kemampuan yang sangat baik dalam hal daktilitas dan dissipasi energi.

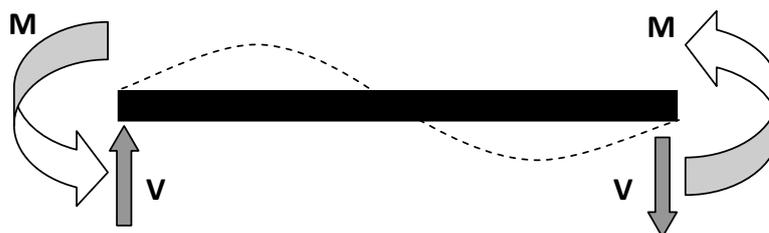


Gambar 2. Beberapa konfigurasi *eccentrically braced frames* (AISC, 2005)

Pada sistem EBF penyerapan energi gempa dilakukan melalui mekanisme pembentukan sendi plastis pada elemen link. Elemen link adalah merupakan bagian dari balok yang direncanakan untuk mendissipasi energi pada saat terjadinya gempa kuat. Kelehan yang terjadi pada elemen link dapat berupa kelelahan geser atau kelelahan lentur. Tipe kelelahan ini sangat tergantung pada panjang link tersebut.

3.2 Karakteristik elemen link dalam sistem EBF

Link adalah salah satu elemen yang terdapat dalam sistem EBF yang berperilaku sebagai balok pendek yang pada kedua sisinya bekerja gaya geser dengan arah yang berlawanan serta momen lentur yang diakibatkan oleh gaya geser tersebut. Karena gaya geser yang berlawanan arah maka momen yang bekerja pada ujung-ujung elemen link mempunyai besar dan arah yang sama seperti yang diperlihatkan dalam **Gambar 3**. Plastifikasi yang terjadi pada elemen link disebabkan oleh kedua gaya tersebut di atas, oleh karena itu maka perilaku elemen link secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua tipe yaitu: 1) link lentur (*moment link*) dan 2) link geser (*shear link*) (Popov, Engelhardt, 1992). Link dikatakan sebagai link geser apabila kelelahan yang terjadi disebabkan oleh gaya geser, dan dikatakan sebagai link lentur apabila kelelahan yang terjadi disebabkan oleh momen lentur.



Gambar 3. Gaya-gaya pada elemen link (Yurisman, dkk., 2009)

Deformasi paska leleh sebuah balok link disebabkan oleh: kelelahan geser, kelelahan lentur atau kombinasi dari keduanya. Dengan menggunakan sebuah model analitis sederhana dapat ditentukan suatu batasan yang tepat antara mekanisme lentur dan mekanisme geser. Batasan ini dapat digambarkan dengan menggunakan sebuah bentangan geser yang leleh secara serempak dalam kondisi lentur dan geser (Englekirk, 1994).

Bentangan geser (*shear span*) adalah perbandingan antara momen dengan geser pada suatu titik atau jarak antara titik $M = 0$ (*inflection point*) dengan titik momen maksimum dimana tidak terjadi penambahan beban antara kedua titik tersebut. Bentangan geser dalam bentuk yang paling sederhana digambarkan sebagai balok kantilever yang dibebani pada ujungnya, seperti yang diperlihatkan dalam **Gambar 4**. Perilaku link dalam sistem EBF pada kondisi mekanisme digambarkan dengan konsep yang sama yakni sebuah bentangan geser sederhana seperti pada **Gambar 4**. Perbandingan kekuatan yang seimbang (*balance strength ratio*) tercapai saat bentangan geser mengalami kelelahan lentur dan geser secara serempak.

$$a = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Dimana a = panjang bentang geser balok kantilever, M = momen yang bekerja pada balok, V = gaya geser yang bekerja pada balok. Sedangkan panjang kantilever dalam kondisi kekuatan seimbang dinyatakan dengan rumus :

$$a_b = \frac{M_p}{V_p} \quad (2)$$

dimana :

$$M_p = Z_x \cdot F_y$$

$$V_p = 0,6 \cdot F_y \cdot d \cdot t_w$$

a_b = perbandingan kekuatan dalam kondisi seimbang (*balance strength ratio*).

M_p = momen plastis, V_p = gaya geser plastis, Z_x = modulus penampang arah-x, d = tinggi penampang balok profil WF, t_w = tebal badan penampang profil WF, F_y = tegangan leleh material baja.

Balok kantilever tersebut akan leleh akibat geser bila panjang kantilever kurang dari a_b dan akan leleh akibat lentur bila panjang kantilever melebihi a_b . Dari perspektif kriteria disain link dianggap sebagai balok yang terkekang pada kedua ujungnya, panjang link dalam kondisi seimbang (*balance link length*) dinyatakan dengan formula :

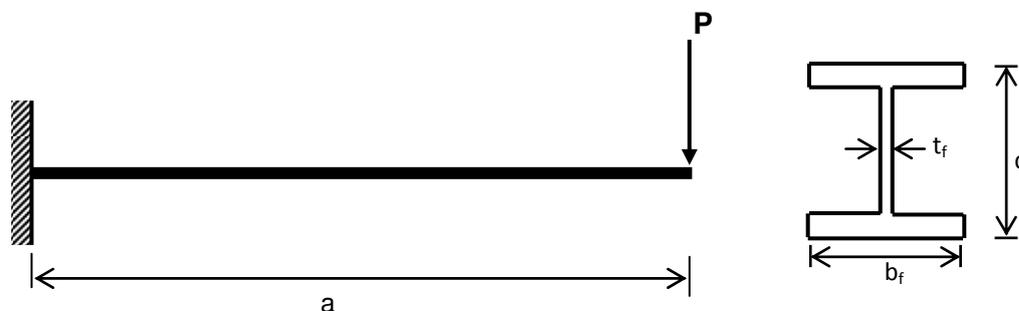
$$e_b = 2 \cdot a_b = 2 \cdot \frac{M_p}{V_p} \quad (3)$$

dimana : e_b = *balance link length*.

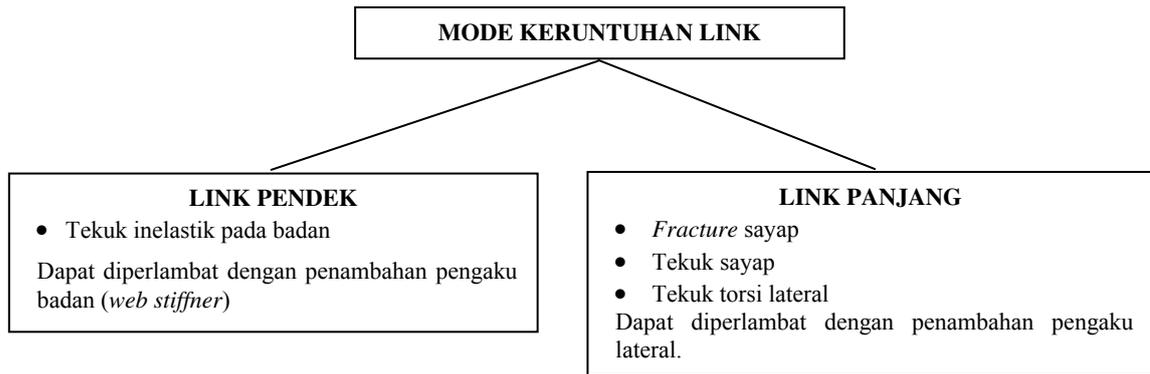
Berdasarkan mekanisme kelelahan yang terjadi pada balok link maka link dibagi dalam dua jenis yaitu: link yang leleh akibat momen dinamakan link lentur dan link yang leleh akibat geser dinamakan link geser. Namun tidak terdapat suatu batasan yang jelas antara kelelahan lentur dan kelelahan geser. Untuk mengidentifikasi sebuah link leleh akibat lentur atau akibat geser dapat dilakukan melalui pengujian-pengujian.

Kondisi geser murni (*pure shear*) dianggap terjadi saat panjang link (e) maksimum 80 % dari panjang bentang geser dalam kondisi seimbang (e_b). Jadi $e \leq 80\% e_b = 0,8 \cdot 2a_b = 1,6M_p/V_p$. Sedangkan kondisi lentur murni dianggap terjadi saat panjang link (e) lebih dari $5M_p/V_p$.

Perilaku balok link diantara dua kondisi tersebut digambarkan dengan menggunakan strength ratio M_p/V_p sebagai berikut : 1) link geser murni bila : $e < 1,6M_p/V_p$, 2) link dominan geser bila $1,6M_p/V_p < e < 2,6M_p/V_p$, 3) link dominan lentur bila : $2,6M_p/V_p < e < 5,0M_p/V_p$, 4) link lentur murni bila : $e > 5M_p/V_p$.

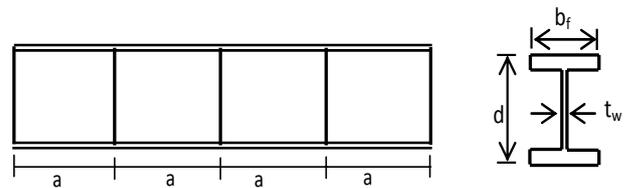


Gambar 4. Bentang geser dan penampang balok kantilever sederhana (Yurisman, dkk.. 2009)



Gambar 5. Perbedaan mode keruntuhan antara link lentur dan geser (Bruneau, M., 2009)

Untuk link yang sangat pendek gaya geser link mencapai kapasitas geser plastis $V_p = 0,55 \cdot h_w \cdot t_w \cdot F_y$ dan link leleh akibat geser membentuk sebuah sendi geser. Untuk link yang lebih panjang, momen ujung mencapai M_p membentuk sendi-sendi lentur sebelum terjadinya kelelahan geser. Perbedaan antara mode keruntuhan link geser dan link lentur diperlihatkan dalam Gambar 5.



Gambar 6. Link geser dengan pengaku badan (web stiffner) (Kasai dan Popov, 1986)

3.3 Pengaruh pengaku badan (web stiffner) terhadap kinerja link geser

Karena tingginya kebutuhan daktilitas (*ductility demand*) pada link pendek maka bagian sayap dari penampang link tersebut (profil WF) kemungkinan akan mengalami tekuk, oleh karena itu pengaku-pengaku badan harus dipasang jika tidak tekuk pada sayap dapat menyebabkan terjadinya *prematur torsional buckling* yang besar pada badan yang selanjutnya dapat menyebabkan terjadinya *lateral torsional buckling* pada link. Gambar 6 memperlihatkan link geser profil WF dengan jarak pengaku badan sebesar a. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan oleh Ghobarah (Ghobarah, dkk., 1991) terhadap link pendek terbukti bahwa link dengan pengaku badan menghasilkan kemampuan geser yang lebih besar dengan loop hysteretic yang lebih gemuk dan stabil. Beberapa peneliti lain seperti Kasai dan Popov (1986) telah menetapkan beberapa ketentuan sederhana tentang hubungan antara jarak pengaku badan (*web stiffner spacing*) dengan sudut rotasi inelastik maksimum (γ_p) hingga awal terjadinya tekuk badan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 a &= 29t_w - d/5 & \gamma_p &= \pm 0,09 \text{ rad.} \\
 a &= 38t_w - d/5 & \gamma_p &= \pm 0,06 \text{ rad.} \\
 a &= 29t_w - d/5 & \gamma_p &= \pm 0,03 \text{ rad.}
 \end{aligned}$$

a = jarak antar pengaku badan, d = tinggi balok, t_w = tebal badan.

Peraturan terakhir yang mengatur jarak pengaku badan dicantumkan dalam AISC 2005, jarak pengaku badan (*intermediate web stiffner*) untuk link geser tidak boleh kurang dari $(30t_w - d/5)$ dan ketebalan pengaku tidak boleh kurang dari t_w atau 10 mm.

4. Kajian Numerik Pengaruh Pengaku Badan Terhadap Kinerja Link Geser

Penelitian ini dilakukan dengan dua metode yaitu: studi numerik dan studi eksperimental. Studi numerik dilakukan sebagai langkah awal untuk melihat perilaku elemen link sebagai balok yang terkekang pada kedua ujungnya. Selanjutnya hasil studi numerik ini akan divalidasi secara eksperimental, studi eksperimental sedang dilakukan di Laboratorium Mekanika Struktur PAU-ITB.

Dalam makalah ini peneliti menyajikan beberapa parameter yang diamati yaitu: jarak pengaku badan (*web stiffner*), tebal pengaku badan, tebal pengaku diagonal badan (*diagonal web stiffner*) dan beberapa model geometrik pengaku badan. Studi numerik dilakukan dengan pendekatan elemen hingga, link dimodelkan sebagai elemen shell CQUAD dengan menggunakan perangkat lunak komputer MSC/NASTRAN dan dijepit pada kedua ujungnya dalam 6 DOF: 3 rotasi (R_x, R_y, R_z) dan 3 translasi (T_x, T_y, T_z). Pada salah satu ujung balok (tepatnya pada nodal dimana posisi tumpuan) diberi beban perpindahan secara bertahap (*incremental*). Terdapat dua tipe pembebanan yang diberikan dalam penelitian ini yaitu: statik monotonik dan kuasi statik (siklik). Panjang balok link diambil 400 mm, profil baja yang digunakan dalam analisis ini adalah: IWF 200.100. Data material didapatkan dari hasil uji tarik di laboratorium dan dinyatakan dalam bentuk kurva tegangan – regangan.

Uji tarik dilakukan terhadap profil baja yang akan diuji, standar pembuatan spesimen untuk uji tarik disesuaikan

dengan standar JIS Z 2201 tentang *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials*, JIS Z 2241 tentang *Method of Tensile Test for Metallic Materials* dan JIS G 3101 tentang *Rolled Steels for General Structure*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin UTM (*Universal Testing Machine*) di Laboratorium Mekanika Struktur PAU-ITB. Pengujian dilakukan terhadap material bagian sayap (*flange*), badan (*web*), pengaku badan dan pengaku diagonal. **Gambar 6** memperlihatkan bentuk benda uji untuk uji tarik dan proses uji tarik di laboratorium.

Gambar 7 memperlihatkan proses uji tarik baja yang dilakukan dengan mesin UTM, pada benda uji dipasang alat ukur regangan (*strain gage*) tipe *post yield* dan ekstensiometer, keduanya dihubungkan ke data logger dan hasil pengujian langsung direkam di komputer. Data hasil pengujian ini berupa kurva tegangan – regangan yang dijadikan sebagai data masukan dalam studi numerik. Kurva hasil pengujian ini diperlihatkan dalam **Gambar 8** sampai **11**.

Kurva tegangan-regangan pada **Gambar 8a** sampai **11a** adalah kurva hasil uji tarik baja yang didapatkan dari hasil pengujian, nilai regangan didapatkan dari hasil pembagian antara beban (dibaca dari data logger) dengan luas penampang spesimen sedangkan nilai regangan didapat melalui alat ukur regangan (*strain gage*). Kurva tegangan-regangan pada **Gambar 8b** sampai **11b** adalah kurva yang digambarkan dengan mengambil beberapa titik dari gambar a, data-data tegangan dan regangan pada kurva **Gambar b** akan dijadikan sebagai data masukkan dalam analisis nonlinier *finite element* dengan bantuan perangkat lunak komputer komputer MSC/NASTRAN. Berdasarkan kurva-kurva tersebut dapat diketahui nilai-nilai tegangan leleh, regangan leleh, tegangan ultimit, regangan ultimit dan modulus elastis baja yang digunakan dalam pengujian.

Tipe pembebanan yang diberikan terhadap benda uji adalah: statik monotonik dan kuasi statik (siklik) dengan kontrol perpindahan (*displacement control*). Standard pembebanan yang diberikan mengacu pada ketentuan AISC 2005. **Gambar 12** memperlihatkan model pembebanan siklik yang diberikan pada benda uji link.

4.1 Analisa sensitivitas terhadap model elemen hingga benda uji

Analisa sensitivitas (uji konvergensi) bertujuan untuk mengetahui jumlah elemen/jumlah nodal yang paling sesuai yang digunakan dalam model elemen hingga benda uji. Sebelum dilakukan penelitian terhadap parameter-parameter yang berpengaruh secara signifikan terhadap kinerja elemen link terlebih dahulu dilakukan analisis konvergensi terhadap model elemen hingga benda uji. Hasil analisis konvergensi tersebut diperlihatkan dalam **Gambar 13a** dan **Gambar 13b**.

Kurva pada **Gambar 13a** adalah kurva hubungan beban vs jumlah elemen yang didapatkan dari hasil uji sensitivitas terhadap link geser yang menggunakan pengaku diagonal badan, dari kurva tersebut didapatkan jumlah elemen yang digunakan dalam model elemen hingga link geser berkisar 1500 sampai 2000 elemen, walaupun kondisi konvergen didapatkan lebih dari 2500 elemen tetapi karena keterbatasan kemampuan komputer maka diambil 1500 elemen. Demikian juga halnya kurva pada gambar 13b adalah hasil uji sensitivitas terhadap link geser tanpa pengaku diagonal badan, berdasarkan hasil analisa tersebut ditetapkan bahwa jumlah elemen yang digunakan dalam pemodelan link geser tanpa pengaku diagonal badan berkisar 2500 sampai 3000 elemen.

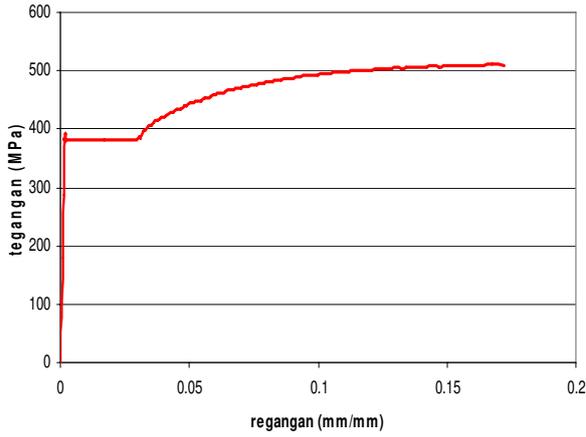


(a) Mesin uji tarik baja (UTM) dan posisi penempatan benda uji (posisi ellips)

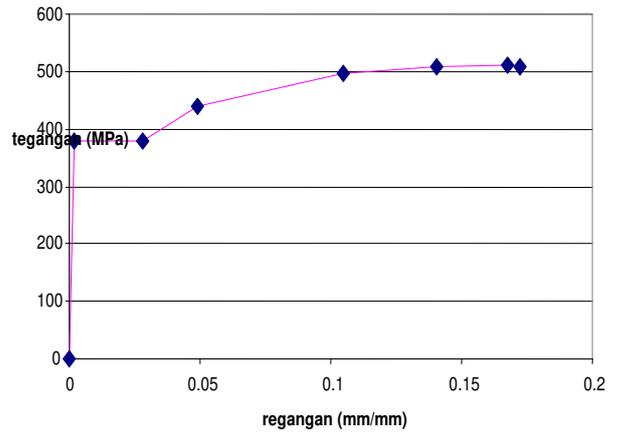
(b) Benda uji sedang dalam pengujian dengan menggunakan mesin UTM

Gambar 7. Uji tarik baja (*coupon test*) dilakukan sesuai standar JIS dengan mesin UTM

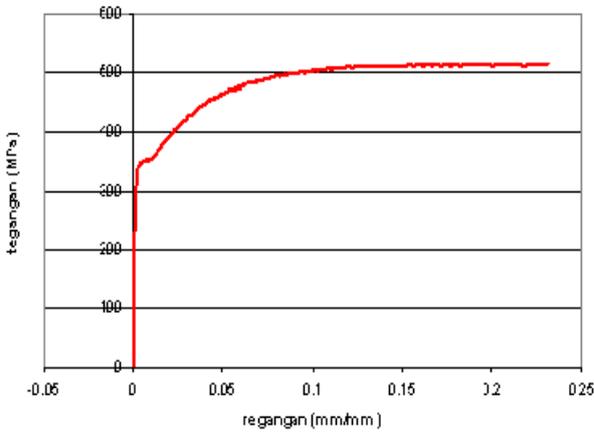
Sumber: Dokumentasi eksperimen di Laboratorium Mekanika Struktur Pusat Rekayasa Industri ITB



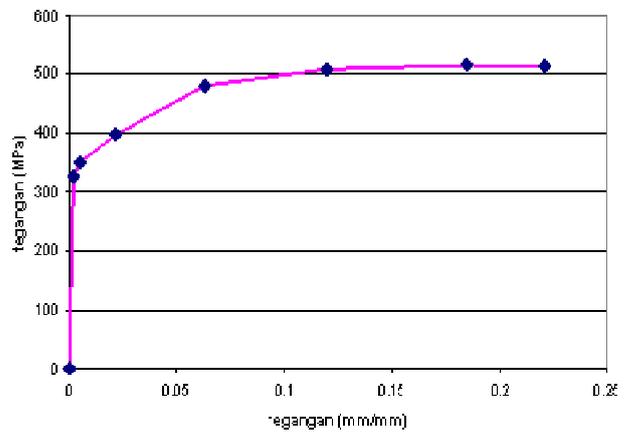
Gambar 8a. Kurva hasil uji tarik bagian badan



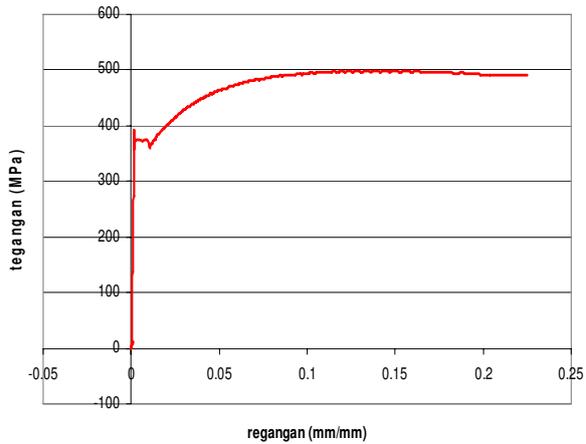
Gambar 8b. Model kurva untuk input data ke komputer



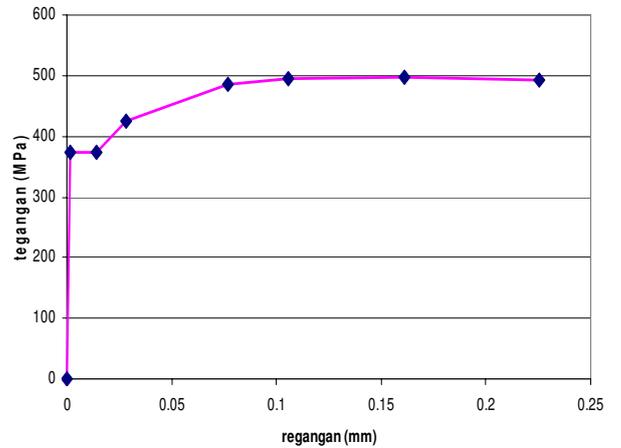
Gambar 9a. Kurva hasil uji tarik bagian badan



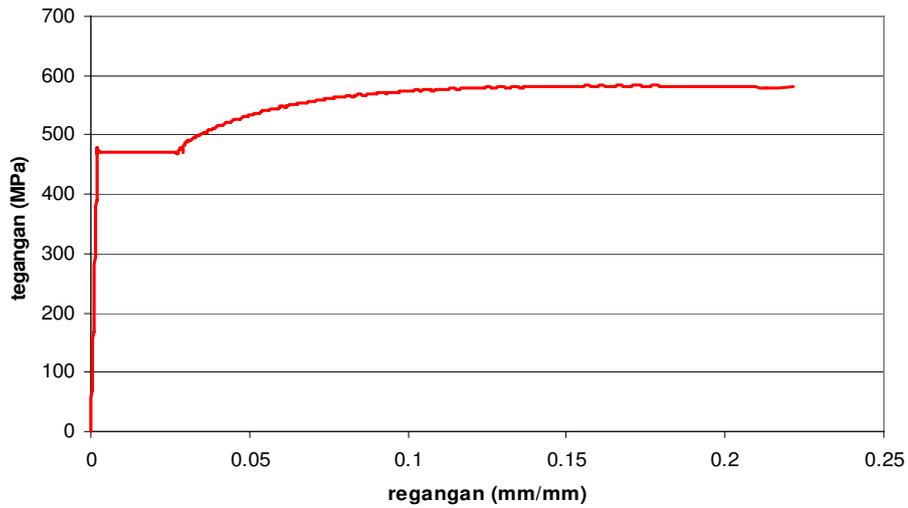
Gambar 9b. Model kurva untuk input data ke komputer



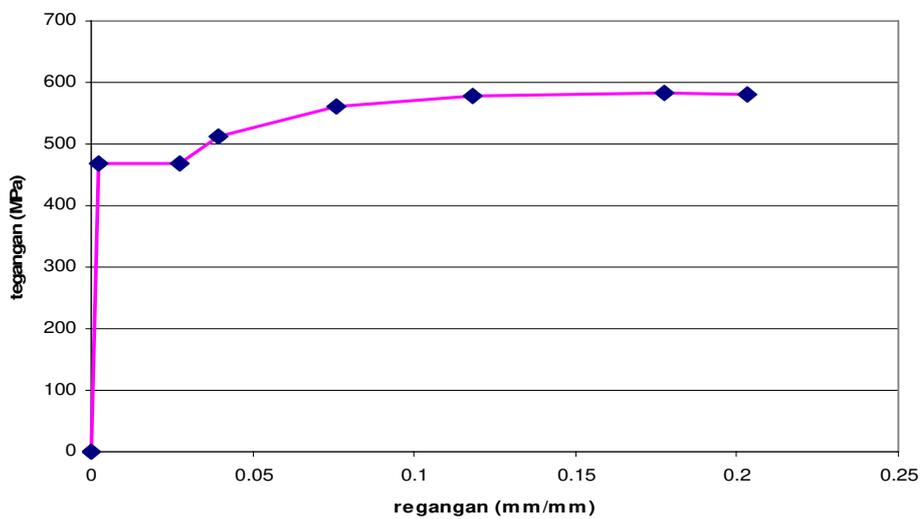
Gambar 10a. Kurva hasil uji tarik bagian badan



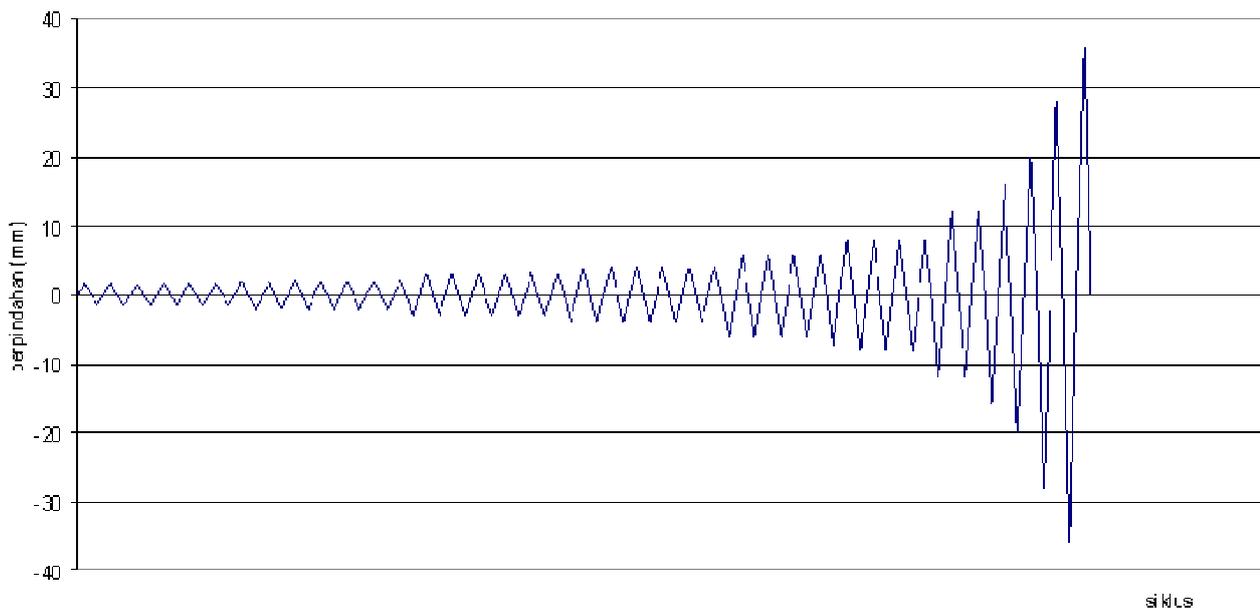
Gambar 10b. Model kurva untuk input data ke komputer



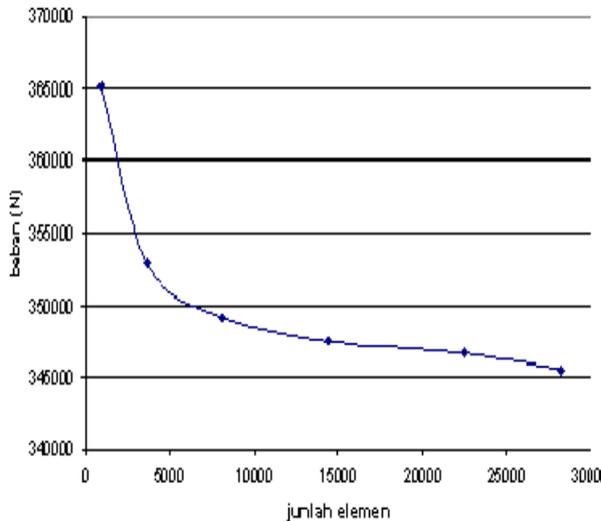
Gambar 11a. Kurva hasil uji tarik bagian pengaku diagonal



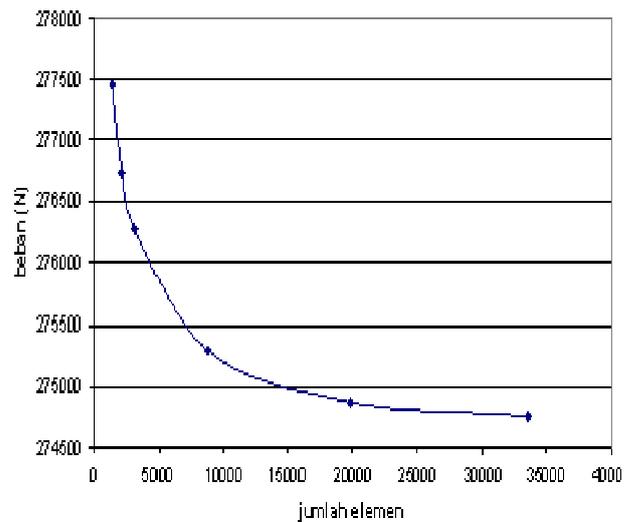
Gambar 11b. Model kurva untuk input data ke komputer



Gambar 12. Pola pembebanan siklik yang digunakan dalam analisis non linier dan eksperimental pengujian



Gambar 13a. Hasil analisa sensitivitas terhadap model link dengan pengaku diagonal



Gambar 13b. Hasil analisa sensitivitas terhadap model link tanpa pengaku diagonal

Sumber: Hasil analisis sensitivitas dengan perangkat lunak MSC/NASTRAN (13a, 13b)

4.2 Pengaruh pengaku badan (*web stiffener*) terhadap kinerja link geser

AISC 2005 mengatur jarak pengaku badan (*intermediate web stiffener*) untuk link geser tidak boleh kurang dari $(30t_w - d/5)$ dan ketebalan pengaku tidak boleh kurang dari t_w atau 10 mm, dalam penelitian ini diambil jarak pengaku sebesar 100 mm dan tebal pengaku 10 mm. Selanjutnya untuk mengamati bagaimana pengaruh jarak dan ketebalan pengaku terhadap kinerja link geser, dilakukan pengamatan terhadap tiga variasi jarak pengaku yaitu 200 mm (2 spasi), 133,3 mm (3 spasi) dan 100 mm (4 spasi). Ketebalan pengaku diambil tiga variasi yaitu: 4 mm, 6 mm dan 10 mm. Hasil analisis nonlinier dinyatakan dalam bentuk kurva hubungan beban vs perpindahan. **Gambar 14** memperlihatkan model elemen hingga link yang dianalisa.

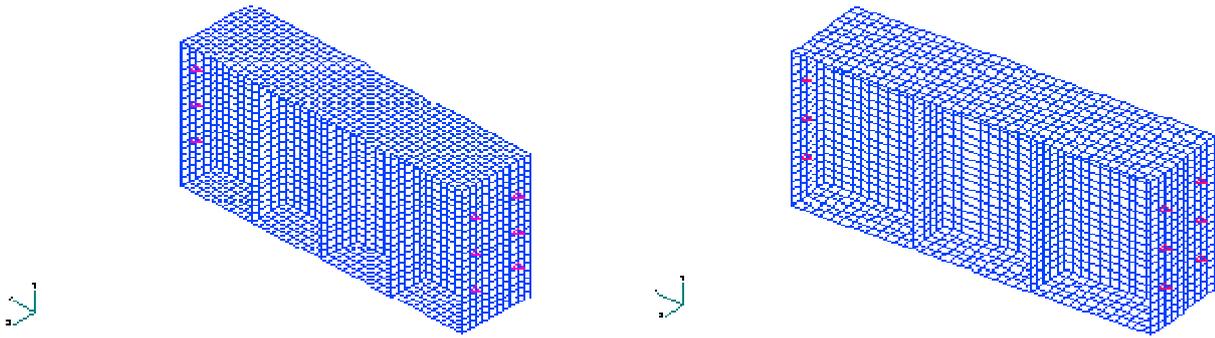
Kurva hubungan beban vs perpindahan pada **Gambar 15** memperlihatkan pengaruh jarak pengaku badan terhadap kinerja link geser. Hasil analisis nonlinier tersebut menunjukkan bahwa jarak pengaku tidak mempunyai pengaruh yang signifikan, karena pengaku vertikal yang dipasang pada bagian badan profil IWF hanya berfungsi untuk memperlambat terjadinya tekuk lokal pada badan. Umumnya profil – profil IWF yang ditemui di pasaran mempunyai karakteristik penampang yang kompak sehingga sehingga dapat mengurangi pengaruh tekuk lokal yang terjadi pada penampang. Sama halnya dengan jarak pengaku, variasi tebal pengaku juga tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja link geser. Kurva pada **Gambar 16** memperlihatkan pengaruh ketebalan pengaku terhadap kinerja link geser.

4.3 Peningkatan kinerja link geser melalui pemasangan pengaku diagonal

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan di atas, tidak terdapat suatu pengaruh yang signifikan perubahan variasi ketebalan pengaku dan jarak pengaku badan terhadap kinerja link geser, meskipun ketentuan-ketentuan tentang ketebalan pengaku dan jarak pengaku badan telah diatur dalam AISC 2005 serta dari beberapa penelitiannya sebelumnya.

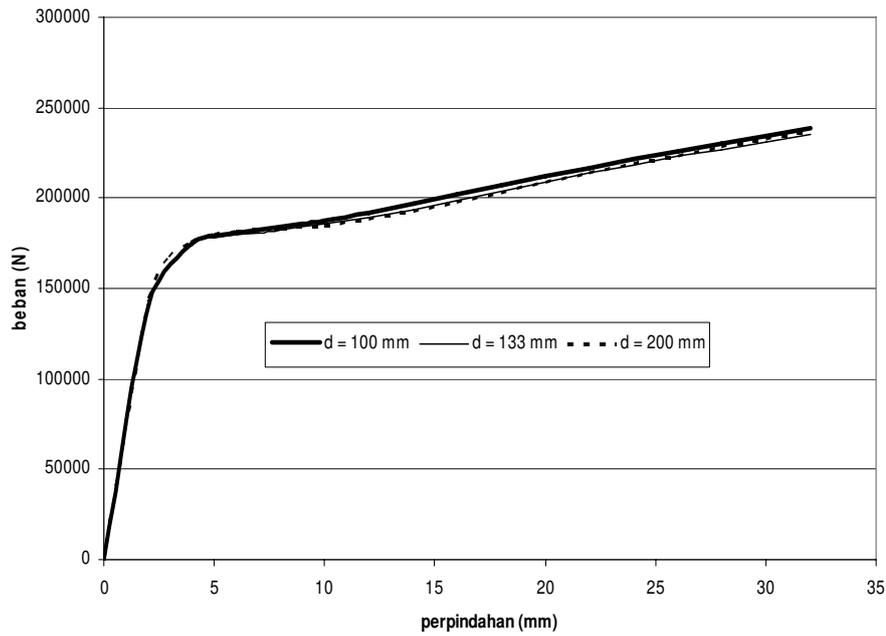
Dalam analisis ini peneliti mencoba melakukan suatu inovasi untuk meningkatkan kinerja link geser melalui pemasangan pengaku secara diagonal pada bagian badan. Penelitian ini dilakukan dengan dasar pemikiran bahwa pemasangan pengaku secara diagonal maka terjadi perubahan pada properti penampang (peningkatan momen inersia dan bidang geser) dan juga menghambat terjadi tekuk lokal pada elemen link. Walaupun belum terdapat suatu ketentuan (*code*) ataupun hasil-hasil penelitian sebelumnya yang mengatur perencanaan pengaku diagonal pada link, peneliti mencoba melakukan studi secara numerik dan eksperimental untuk meneliti lebih jauh tentang perilaku link geser dengan pengaku diagonal pada badan.

Berdasarkan hasil studi awal yang telah dilakukan secara numerik, peneliti menemukan suatu indikasi bahwa pemasangan pengaku diagonal pada bagian badan elemen link profil WF dapat meningkatkan kemampuan link dalam menahan gaya lateral, dan meningkatkan kemampuan link dalam dissipasi energi. Indikator kemampuan link geser dalam dissipasi energi dinyatakan dalam bentuk kurva hysteric hubungan gaya vs perpindahan yang diperoleh dari hasil pembebanan kuasi statik (siklik).



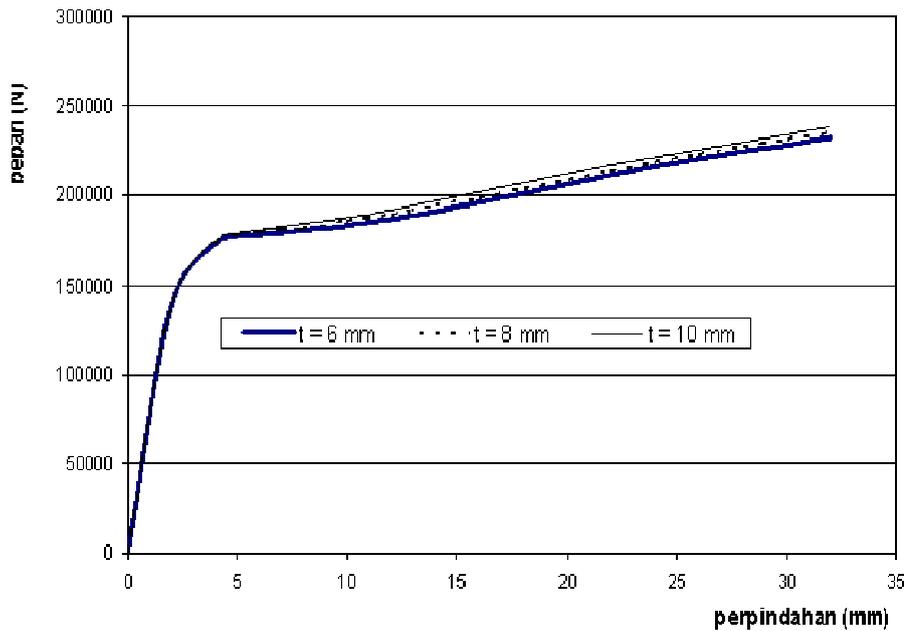
Gambar 14. Model elemen hingga link geser

Sumber: Hasil pemodelan benda uji dengan menggunakan perangkat lunak MSC/NASTRAN



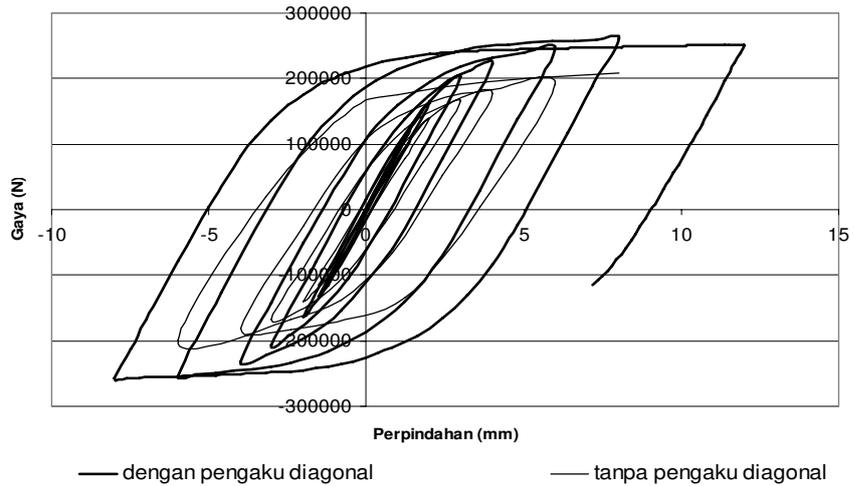
Gambar 15. Pengaruh jarak pengaku badan terhadap kinerja link geser

Sumber: Hasil analisis nonlinear dengan menggunakan pendekatan elemen hingga.

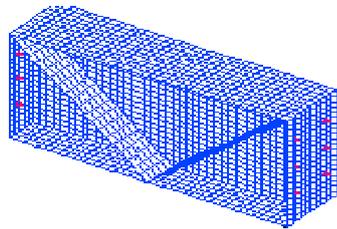


Gambar 16. Pengaruh tebal pengaku badan terhadap kinerja link geser

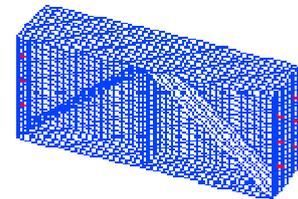
Sumber: Hasil analisis nonlinear dengan menggunakan pendekatan elemen hingga.



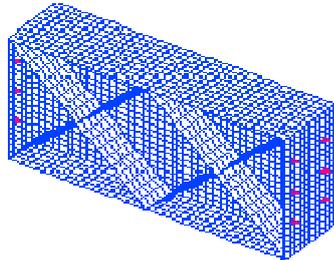
Gambar 17. Kurva hysteretic link geser dengan dan tanpa pengaku diagonal badan
 Sumber: Hasil analisis nonlinear dengan menggunakan pendekatan elemen hingga



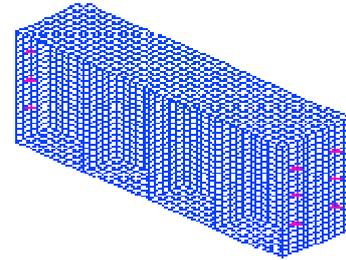
Gambar 18a. Link geser model DSGL6



Gambar 18b. Link geser model TVS1

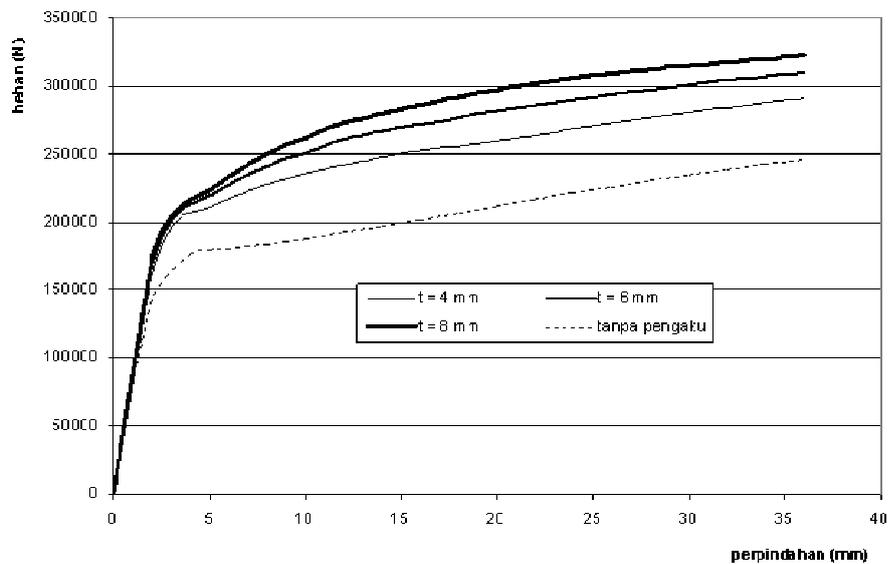


Gambar 18c. Link geser model TVD2



Gambar 18d. Link geser model D100A

Sumber: Hasil pemodelan benda uji dengan menggunakan perangkat lunak MSC/NASTRAN



Gambar 19. Pengaruh ketebalan pelat pengaku diagonal terhadap kinerja link geser
 Sumber: Hasil analisis nonlinear dengan menggunakan pendekatan elemen hingga

Kurva hysteric pada **Gambar 17** menunjukkan perbedaan perilaku link geser dengan dan tanpa pengaku diagonal dalam hal dissipasi energi dan kekuatan. Berdasarkan fenomena inilah maka peneliti ingin meneliti lebih jauh bagaimana pengaruh pengaku diagonal terhadap perilaku dan kinerja link geser sebagai salah satu elemen struktur dalam sistem struktur EBF.

Dalam analisis selanjutnya dibuat beberapa model konfigurasi pengaku diagonal pada link geser, beberapa model konfigurasi tersebut diperlihatkan dalam **Gambar 18a-d**, adapun penamaan yang diberikan terhadap tiap model link hanyalah untuk mempermudah membedakannya satu sama lain.

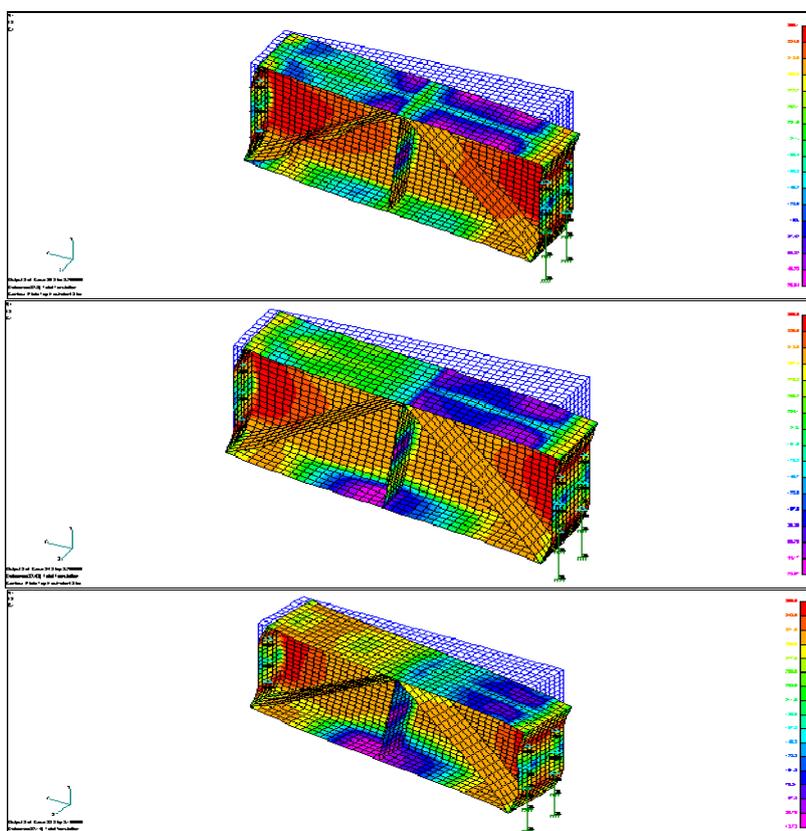
4.4 Pengaruh variasi geometrik konfigurasi pengaku diagonal

Pengaku diagonal yang dipasang pada bagian badan tidak hanya berfungsi untuk menghambat terjadinya tekuk lokal pada badan tetapi juga meningkatkan kekuatan dan kekakuan elemen link. Hasil analisis memperlihatkan ketebalan pengaku diagonal mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja elemen link. Analisis nonlinier untuk meneliti pengaruh tebal pengaku diagonal dilakukan terhadap model link TVS1. Profil yang digunakan sama dengan model

sebelumnya yaitu: IWF 200.100.5,5.6.8 panjang link 400 mm, diambil tiga variasi ketebalan pengaku yaitu: 4 mm, 6 mm dan 8 mm. Dari tiga variasi ketebalan tersebut didapatkan link geser dengan kinerja yang berbeda. **Gambar 19** memperlihatkan perbedaan kinerja link geser dengan tiga variasi ketebalan pelat pengaku diagonal.

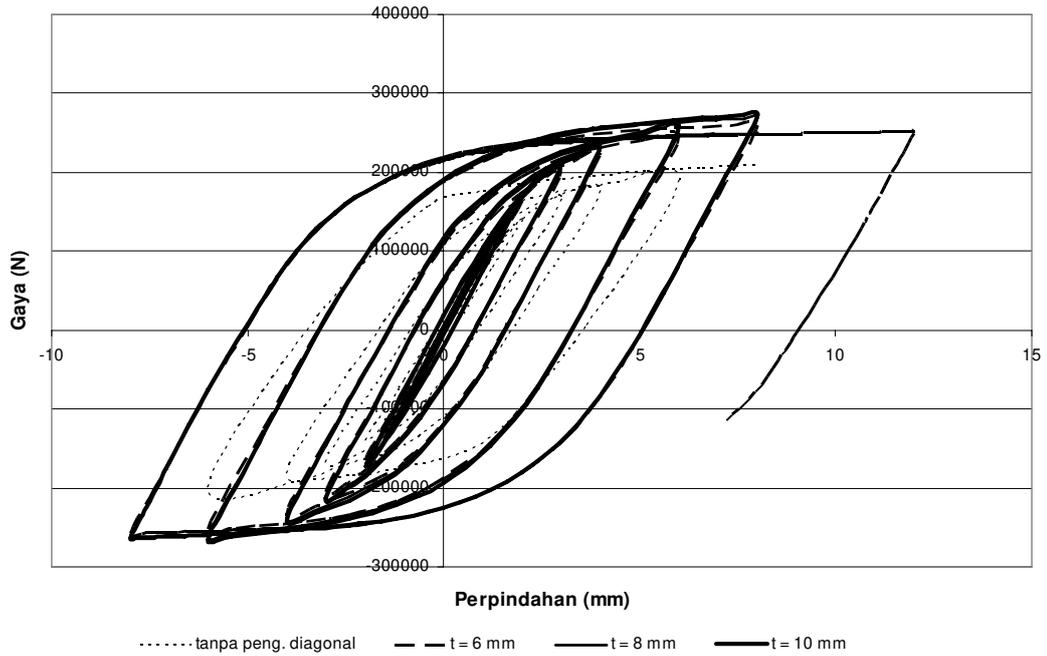
Berdasarkan hasil analisis nonlinier seperti yang diperlihatkan dalam **Gambar 20**, link dengan pengaku diagonal badan mempunyai perilaku yang lebih stabil dibandingkan dengan link tanpa pengaku diagonal. Fenomena ini dapat dilihat dari karakteristik kurva yang dihasilkan, link dengan pengaku diagonal mempunyai kurva yang lebih stabil. Untuk mendapatkan link dengan kinerja yang lebih optimal, ketebalan pengaku diagonal pada badan harus diperhitungkan agar tidak menghambat proses plastifikasi yang terjadi pada badan.

Kondisi yang paling baik adalah dimana terjadi proses inelastis secara bersamaan antara plat pengaku diagonal dan plat badan. Berdasarkan gambar kontur tegangan yang diberikan dalam **Gambar 20** terlihat bahwa pelat pengaku diagonal mengalami proses inelastis bersamaan dengan pelat badan, hal ini menunjukkan bahwa keberadaan pelat pengaku diagonal cukup efektif dalam peningkatan kinerja link

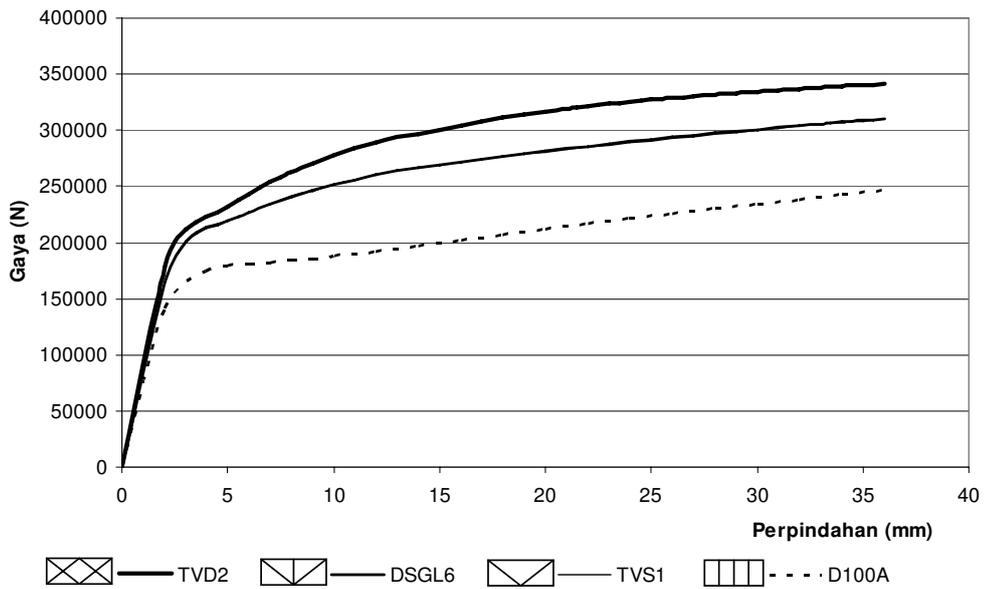


Gambar 20. Bentuk deformasi dan kontur tegangan Von Mises yang memperlihatkan perbedaan perilaku link geser dengan tebal pelat pengaku diagonal 4 mm, 6 mm dan 8 mm saat rotasi 0,08 rad

Sumber: Hasil analisis non linear dengan menggunakan perangkat lunak MSC/NASTRAN.



Gambar 21. Kurva hysteretic link geser dengan variasi ketebalan pengaku diagonal badan
 Sumber: Hasil analisis nonlinear dengan menggunakan pendekatan elemen hingga



Gambar 22. Pengaruh geometrik konfigurasi pengaku diagonal terhadap kinerja link geser
 Sumber : Hasil analisis nonlinear dengan menggunakan pendekatan elemen hingga

5. Kesimpulan

Makalah ini memaparkan suatu hasil studi pendahuluan yang dilakukan secara numerik dengan pendekatan elemen hingga terhadap perilaku link geser dengan menggunakan pengaku yang dipasang secara diagonal pada bagian badan profil IWF. Berdasarkan hasil studi ini dapat diambil beberapa kesimpulan sementara sebagai berikut :

1. Didapatkan suatu indikasi bahwa pengaku diagonal badan (*diagonal web stiffener*) mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja elemen link. Kinerja tersebut mencakup: kemampuan link dalam menahan beban geser, kekakuan inelastis dan dissipasi energi. Dalam analisis ini telah ditunjukkan bahwa tebal dan jarak pengaku vertikal tidak mempunyai pengaruh yang signifikan dalam peningkatan kinerja link geser sekalipun ketentuan tentang tebal dan jarak pengaku tersebut telah diatur dalam ketentuan AISC 2005.
2. Hasil analisis juga memperlihatkan bahwa pengaruh ketebalan dan konfigurasi pengaku diagonal juga mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja link geser. Makin tinggi nilai ketebalan pengaku diagonal maka kemampuan link dalam menahan gaya geser semakin meningkat begitu juga dalam hal dissipasi energi. Disamping itu juga diperlihatkan bahwa dengan menghilangkan pengaku vertikal tidak mempunyai pengaruh terhadap kinerja elemen link.

Makalah yang kami sajikan ini adalah hasil studi awal dan belum mempunyai suatu kesimpulan yang valid. Studi secara eksperimental sedang dilakukan di laboratorium Mekanika Struktur Pusat Rekayasa Industri ITB. Dan kami sangat mengharapkan masukan-masukan dari teman-teman Peneliti, Praktisi dan Mahasiswa untuk kesempurnaan penelitian ini.

6. Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada LPPM ITB yang telah membiayai penelitian ini melalui program Riset KK ITB tahun 2009, Kontrak No: 077.A/K01.10/KP/2009 dan Bantuan Hibah Program Doktor No.418/K01.12/KU/2009.

Daftar Pustaka

- American Institute of Steel Construction, 2005, *Seismic Provision for Structural Steel Buildings*, AISC, Inc.
- Bruneau M, Uang, C.M., Whittaker, A., 1998, *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw-Hill.
- Engelhardt, M.D., and Popov, E.P., 1992, Experimental Performance of Long Links in Eccentrically Braced Frames. *Journal of Structural Engineering*. Vol.118, No.11:3067-3088. November, ASCE.
- Englekirk, R., 1994, *Steel Structures: Controlling Behaviour Through Design*, John Wiley and Son, Inc.
- Gobarah, A., and Ramadan, T., 1991, Seismic Analysis of Links of Various Lengths in Eccentrically Braced Frames, *Can. Journal of Civil Engineering*, 140-148.
- Kasai K., and Popov, E.P., 1986, General Behaviour of WF Steel Shear Link Beams, *Journal of the Structural Division*. Vol. 112, No.2:362-382. February, ASCE.
- Moestopo, M., and Aulia, M., 2006, *Kinerja Link dengan Sambungan Baut Pada Struktur Rangka Berpengaku Eksentrik*, Seminar Haki, Agustus, Jakarta.
- Popov, E.P., 1983, Recent Research on Eccentrically Braced Frames, *Journal of Engineering Structures*. 5(1): 3-9.
- Yurisman, Budiono, B., Mustopo, M., Made, S., 2009, *Perilaku Link Geser Dengan Pengaku Diagonal Badan Pada Sistem Struktur Rangka Baja Berpenopang Eksentrik (EBF)*, Seminar Nasional Perkembangan Mutakhir Pemanfaatan Material Baja dalam Industri Konstruksi, Universitas Katolik Parahyangan Bandung Fakultas Teknik Jurusan Sipil.