

## Validasi Pemodelan Kurva Histeristis dan Kapasitas Disipasi Energi Portal *Vertical Eccentrically Braced Frames* (V-EBF) Menggunakan Profil WF *Shear Link* dengan Metode Elemen Hingga

Arina Desye Hariyanti<sup>1</sup>, Budi Suswanto<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>  
Koresponden\*, Email: [arina.hariyanti@gmail.com](mailto:arina.hariyanti@gmail.com)

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	04 Agustus 2023	<i>This study discusses about the behavior of using VSL (Vertical Shear Link) in EBF, the method that will be used in this research is the Finite Element Method (FEM) with the ABAQUS auxiliary program for sub-assembly modeling. As a reference for model validation and auxiliary programs, specimens were taken Previous experimental study by Bouwkamp. The modeling is limited to one span only and uses the connection of two separate surfaces in order to prevent relative movement between both tie constraint. For loading given lateral cyclic method with displacement control. From the analysis using the finite element method with the Abaqus program, then comparing the hysteretic curves and their energy dissipation capacity, then the validation results obtained for the link elements that experience melting and reach plastic conditions first while other elements such as beams, columns, and bracing are still in elastic condition so that they meet the requirements for Eccentrically Braced Frame (EBF). The difference between the numerical modeling results and the experimental results is below 5%, it is accurate sufficient to be used as a basis for modeling the Eccentrically Braced Frame (EBF) structure.</i>
Diperbaiki	15 Agustus 2023	
Disetujui	18 Agustus 2023	

Keywords: *eccentrically braced frame, link, vertical shear link, validation, Abaqus*

### Abstrak

Penelitian jurnal ini terkait studi perilaku penggunaan VSL (*Vertical Shear Link*) pada EBF, metode yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu *Finite Element Method* (FEM) dengan program bantu ABAQUS untuk pemodelan *sub-assembly*. Sebagai acuan untuk validasi model dan program bantu, spesimen diambil dari studi penelitian yang dilakukan secara eksperimental sebelumnya oleh Bouwkamp. Untuk pemodelan nya terbatas pada satu bentang saja dan menggunakan sambungan dua permukaan terpisah sehingga tidak ada gerakan relatif di antara keduanya (*tie constraint*). Untuk pembebanan diberikan metode siklik lateral dengan displacement control. Dari analisa menggunakan metode elemen hingga dengan program Abaqus, kemudian dilakukan validasi dengan membandingkan kurva histeristis dan kapasitas disipasinya, didapatkan hasil validasi elemen *link* yang mengalami pelelehan dan mencapai kondisi plastis terlebih dahulu sedangkan elemen lain seperti balok, kolom dan bracing masih dalam kondisi elastis sehingga memenuhi persyaratan untuk *Eccentrically Braced Frame* (EBF). Selisih antara hasil pemodelan numerik dengan hasil eksperimental di bawah 5% sehingga cukup valid bisa digunakan sebagai dasar untuk memodelkan struktur *Eccentrically Braced Frame* (EBF).

Kata kunci: *eccentrically braced frame, link, vertical shear link, validasi, Abaqus*

### 1. Pendahuluan

Saat merancang struktur tahan gempa, dua persyaratan dasar harus dipenuhi. Pertama, struktur harus tetap dapat diservis selama penerapan beban gempa normal dan intensitasnya sering. Hal ini biasanya dilakukan dengan mendesain struktur agar tetap elastis dan memberikan kekakuan yang cukup untuk membatasi kendor. Persyaratan kedua adalah untuk menghindari hilangnya korban jiwa akibat keruntuhan pada gempa besar. Untuk kejadian ekstrem seperti itu, regangan inelastis yang signifikan biasanya diperbolehkan. Oleh karena itu, struktur harus memiliki keuletan dan stabilitas inelastis yang cukup untuk menahan kejadian

ekstrem ini. Studi terbaru menunjukkan bahwa struktur rangka yang diperkuat secara eksentrik menawarkan potensi yang cukup besar sebagai struktur tahan gempa. Mereka sangat kaku dan dapat dengan mudah memenuhi batas penyimpangan fase (*drift story*), dan dapat direkayasa untuk memberikan perilaku inelastis dan sifat disipasi energi yang sangat baik. Salah satu konsep desain seismik adalah sistem *Eccentrically Braced Frames* (EBF) yang merupakan kombinasi dari *Moment Resisting Frame* (MRF) dan *Concentrically Braced Frame* (CBF) dan telah banyak diterapkan pada konstruksi berbasis lahan. Sistem ini merupakan pengembangan bersama antara MRF dan CBF [1]. Dalam sistem EBF, gaya lateral

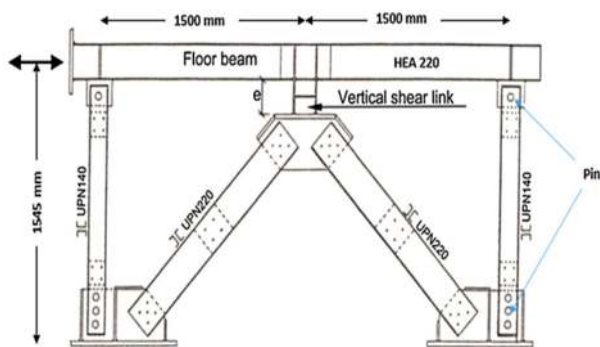
dilawan oleh kombinasi gaya lentur, geser, dan longitudinal pada komponen struktur rangka. Rangka penguat eksentrik (EBF) pada dasarnya adalah sistem hibrid, di mana kekakuan lateralnya kira-kira sama dengan kekakuan rangka penguat konsentris dan daktilitasnya kira-kira sama dengan kekakuan rangka penahan momen. Konsep umumnya adalah membuat garis tengah elemen pendukung bertepatan dengan perpindahan sambungan balok-kolom di satu ujung, sementara memotong balok dari kolom di ujung lainnya. Bagian dari balok yang mentransmisikan bagian memanjang dari penyangga yang terhubung secara eksentrik ke kolom atau ke penyangga yang berdekatan disebut “link”. Penggunaan EBF lebih ekonomis jika link yang rusak akibat gempa dapat diganti tanpa perlu mengganti komponen struktur lainnya seperti balok, kolom dan bracing yang masih kuat menahan beban gravitasi. Dengan membuat link lebih lemah daripada batang struktural lainnya, diharapkan untuk memproyeksikan kerusakan plastis pada link dan memperkirakan bahwa batang selain link akan mengalami kerusakan non-plastisitas, seperti tekuk pada bracing [2]. *Eccentrically braced frames (EBF)* biasanya memiliki 2 jenis: EBF dengan sambungan horizontal (H-EBF) dan EBF dengan sambungan vertikal (V-EBF). *Eccentrically Braced Frame (EBF)* dengan link horizontal (H-EBF), link menjadi satu kesatuan dengan balok sehingga perbaikan atau penggantian link yang rusak pada H-EBF pasca gempa yang besar sangat sulit dan mengganggu sistem struktur lainnya [3]. Kelemahan lainnya pada link horizontal dalam penggunaan bangunan pembangkit listrik, balok digunakan untuk menopang beban berat dan peralatan yang sangat sensitif, untuk memastikan keakuratan peralatan kerja, elemen pendukung seperti balok dan kolom harus dalam keadaan elastis. Berdasarkan kelemahan dari link tersebut, maka digunakan link vertikal (V-EBF). V-EBF adalah sistem bresing eksentrik dimana link dipasang secara vertikal menghubungkan bresing ke balok dimana link vertikal (V-EBF) digunakan untuk memperbaiki dan/atau mengganti komponen link yang rusak akibat gempa besar tanpa mengganti atau mengubah bagian dari balok [4]. Selain itu, *vertical shear link (VSL)* tidak ada dalam struktur internal dan dapat dengan mudah diganti. Jadi, setelah gempa, jika kita mengasumsikan bahwa struktur lain bersifat elastis, maka cukup mengganti VSL (*Vertical Shear Link*), dan akhirnya struktur akan kembali ke fungsi semula [2]. Metode elemen hingga (FEM) adalah metode untuk menyelesaikan masalah bidang secara numerik dan matematis. Metode elemen hingga (FEM) digunakan untuk memecahkan masalah fisik dalam analisis dan desain teknik, termasuk proses analisis elemen hingga. Pendekatan pertama, yang dikenal sebagai metode gaya atau fleksibilitas, adalah mencari gaya dalam yang nilainya tidak diketahui. Untuk

mendapatkan persamaan terjadi, persamaan yang seimbang digunakan dan kemudian persamaan tambahan diperlukan untuk menghasilkan persamaan yang kompatibel. Pendekatan kedua, disebut metode perpindahan atau kekakuan, mengasumsikan bahwa perpindahan simpul adalah titik masalah yang akan di-pelajari.

Ada banyak pendekatan untuk mempelajari perilaku sambungan pada struktur baja, termasuk eksperimental, aritmatika, dan teoritis. Studi tentang perilaku struktur biasanya dilakukan dengan menggunakan hasil percobaan laboratorium. Karena kendala biaya dan waktu untuk mempelajari perilaku baja, analisis elemen hingga adalah metode numerik yang menyediakan alat yang dapat mensimulasikan perilaku struktur secara akurat. Metode elemen hingga digunakan untuk menentukan perilaku keseluruhan struktur dalam desain struktural dan kemudian membaginya menjadi beberapa elemen sederhana, masing-masing dengan sifat fisik dan mekaniknya sendiri alasan yang jelas berbeda. ABAQUS adalah salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk *Computer Aided Engineering (CAE)*. Saat ini Abaqus biasa disebut dengan Abaqus FEA karena Abaqus merupakan *software* yang digunakan untuk analisis desain dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Dengan program ini, analisis struktural terbukti lebih cepat dan sangat efisien daripada analisis empiris. Berdasarkan penelitian [3], verifikasi eksperimental akan dilakukan pada model kerangka kerja pada **Gambar 1** dan dijadikan sebagai dasar pemodelan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak Abaqus CAE 2017. *Material properties* pada eksperimental Bouwkamp yang digunakan sebagai parameter pemodelan sebagaimana di **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Material Properti Eksperimental Bouwkamp

Material	Properties Material Baja			
	Steel Type	Yield, $f_y$ (MPa)	Ultimate, $f_u$ (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Profil Balok & Kolom	ST 37	240	370	210
Vertical Shear Link	ST 37	240	370	210
Bracing	ST 37	240	370	210



**Gambar 1.** Model *Frame* Eksperimental V-EBF oleh Bouwkamp [3]

## 2. Metode

Langkah awal pemodelan numerik mengacu pada penelitian Bouwkamp [3] perlu dilakukan agar mengetahui apakah input permodelan seperti material yang digunakan, *boundary condition*, dan interaksi yang dipilih sudah sesuai dengan hasil penelitian sehingga mampu menunjukkan hasil yang mendekati dengan eksperimental.

Adapun langkah-langkah pemodelan dengan Abaqus lebih lanjut dijelaskan di bawah ini:

### a. *Part, Extrude*

Melakukan pemodelan geometri benda yang akan diuji pada modul ini. Profil yang digunakan oleh Bouwkamp [3] dalam pengujian eksperimental digunakan spesifikasi sebagai berikut:

- Balok : HEA-220
  - h : 210 mm
  - b : 220 mm
  - s : 7 mm
  - t : 11 mm
  - W : 50,5 kg/m
  - A : 64,3 cm<sup>2</sup>
- *Vertical Shear Link* : HEA-180
  - h : 171 mm
  - b : 180 mm
  - s : 6 mm
  - t : 9,5 mm
  - W : 35,5 kg/m
  - A : 45,3 cm<sup>2</sup>
- Kolom : UPN 140 (*Double*)
  - h : 140 mm
  - b : 60 mm
  - s : 7 mm
  - t : 10 mm
  - W : 16 kg/m
  - A : 20,4 cm<sup>2</sup>
- *Bracing* : UPN 220 (*Double*)

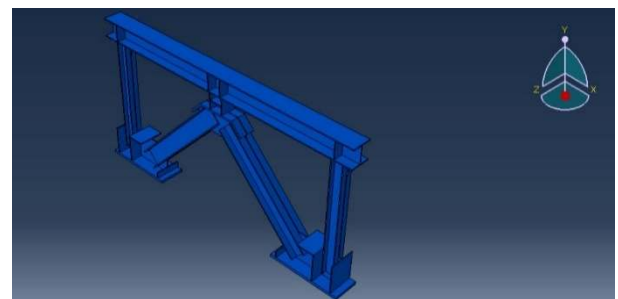
h	: 220 mm
b	: 80 mm
s	: 9 mm
t	: 12,5 mm
W	: 29,4 kg/m
A	: 37,4 cm <sup>2</sup>

### b. *Material*

Dalam pengujian secara *finite element* ini digunakan beberapa material yang sesuai secara pengujian eksperimental dimana digunakan baja dengan spesifikasi  $f_y = 240$  MPa dan  $f_u = 370$  MPa pada semua penampang. Modulus elastisitas yang diambil untuk analisis numerik ini digunakan 200.000 MPa. Sedangkan *elongation* maksimum untuk baja *solid extrusion*. Untuk *input property* material mulai dari massa jenis, perilaku elastis, dan perilaku plastis, massa jenis baja digunakan 7.850 kg/m<sup>3</sup>, perilaku elastis dengan modulus *young* 200.000 MPa, dan *poisson ratio* 0,3. Pada perilaku elastis dan plastis tipe *Hardening* digunakan *Isotropic*. *Isotropic Hardening* umumnya dianggap sebagai model yang cocok untuk masalah di mana tegangan plastis melampaui keadaan hasil awal di mana efek Bauschinger terlihat. Karena pemodelan hanya menggunakan pembebanan satu kali, pengerasan *Isotropic* dapat diterima. Ini juga seringkali paling mudah untuk diimplementasikan ke dalam model. Model pengerasan *Kinematic* memungkinkan perilaku siklik penuh, tetapi melewatkan efek *hardening* dan pelunakan siklik.

### c. *Assembly Instance*

Setelah menentukan material, dilakukan perakitan model, dimana perakitan disesuaikan dengan sampel awal dengan *translate* dan *rotate instance*. Hasil *assembly* dengan program ABAQUS adalah seperti terlihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Hasil *Assembly* Pemodelan 3D

### d. *Seed, Mesh Instance*

*Mesh* merupakan fasilitas untuk melakukan pembagian dan penentuan *element type part* ataupun *assembly*. Dalam pengujian ini *meshing* dilakukan pada *part dependent*. Semua *mesh* dibentuk secara heksagonal menggunakan teknik terstruktur, jika *part* tidak dapat dibentuk, maka di-

lakukan partisi dengan bidang pemotongan yang ditentukan (*datum plane*). Saat melakukan meshing, penting untuk memastikan ukuran elemen yang sesuai digunakan. Ini sangat penting ketika meninjau hasil tegangan di daerah dengan gradien tinggi karena elemen besar umumnya akan *under-predict* tegangan (karena gaya lokal didistribusikan ke area yang lebih luas). Di sisi lain apabila *mesh* terlalu kecil terdapat keterbatasan waktu dan kemampuan software untuk memprosesnya. Mesh dibuat untuk detail besar 25 mm se-perti kolom, balok, dan pengaku. Untuk pelat buhul yang menghubungkan *bracing* ke link 15 mm dan 10 mm untuk pelat sudut yang memperkaku balok dengan kolom. Meshing adalah salah satu langkah paling penting dari proses FEA (*Finite Element Analysis*). Mesh yang berkualitas rendah akan sangat memengaruhi keakuratan dan keandalan hasil analisa.

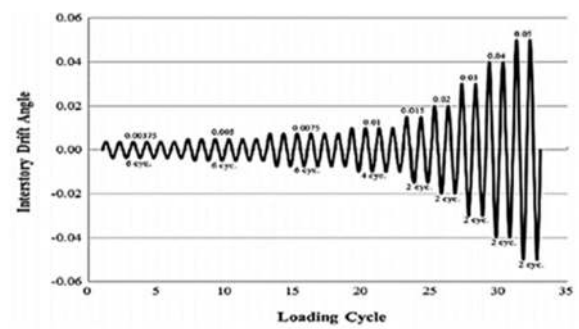
#### e. Loads

Abaqus menyediakan beberapa jenis pilihan pembebanan disesuaikan dengan kondisi awal dengan beban kerja seperti: mekanis, termal, akustik, fluida, listrik /*magnetic*, *mass diffusion* dan beban lainnya. Dalam kasus beban umum yang mempengaruhi struktur, bisa jadi diklasifikasikan sebagai beban mekanis. Beban mekanis didistribusikan lebih lanjut beban terkonsentrasi atau beban terkonsentrasi, beban momen, tekanan, gravitasi dan beban lainnya. Pengujian siklik adalah suatu cara pengujian yang dilakukan dengan cara memberikan pembebanan statik sistem dua arah yaitu bolak-balik (*quasi-static* berganti arah) pada benda uji sampai benda uji tersebut mengalami keruntuhan (*fatigue*). Pembebanan siklik adalah penerapan tegangan, regangan, atau intensitas tegangan yang berulang atau berfluktuasi ke lokasi pada komponen struktural. Degradasi yang mungkin terjadi di lokasi disebut sebagai degradasi kelelahan (*Fatigue Degradation*). Pembebanan bolak-balik (siklik) akan menghasilkan kurva beban dengan simpangan bolak-balik yang disebut *hysteretic curve*. *Envelope curve* dapat dibuat dari *hysteretic curve* yang diambil dari masing-masing beban puncak tiap siklus pembebanan baik pada kondisi *initial* maupun kondisi *stabilized*. *Loading protocol* yang diberikan ketika analisis pada Abaqus CAE mengacu pada AISC 341-16 [5]. Pembebanan diberikan secara bertahap dan dimulai dengan beban aksial 0,00375 rad. Total beban siklik yang diberikan selama analisis adalah 32 siklus, meliputi 32 dorong dan 32 tarikan, rincian *loading protocol* sebagaimana digambarkan di **Gambar 3**.

#### f. Boundary Condition

Untuk pemodelan ini dikarenakan untuk mempelajari perilaku elemen *link* secara *sub-assembly* (dilakukan

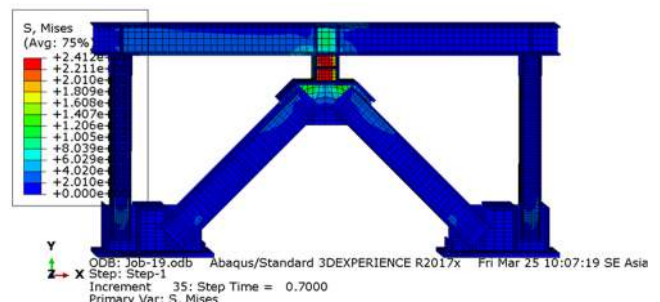
pemisahan dari rangka induknya) dan dalam analisisnya dianggap sebagai balok tunggal, sehingga elemen *link* dimodelkan sebagai balok yang dijepit pada kedua ujungnya dan diberi perpindahan *transversal* pada salah satu ujungnya [6], maka *boundary condition* yang dipilih adalah *tie constraints surface to surface* sebagai pengganti sambungan las. *Tie constraints* mengikat dua permukaan yang terpisah menjadi satu sehingga tidak ada gerakan relatif di antara keduanya. *Boundary condition* ini memungkinkan untuk menggabungkan dua wilayah bersama meskipun meshing yang dibuat pada permukaan wilayah mungkin berbeda. *Tie constraints* cukup universal dalam kode FEA, meskipun sering diberi nama lain, seperti 'lem'. Ini digunakan untuk membuat ikatan translasi dan rotasi antara *node* dalam model struktural.



**Gambar 3.** Loading Protocol [1]

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pemodelan Abaqus berupa kurva tegangan *Von-Mises* dan kurva histeresis yang sesuai dengan penelitian eksperimental yaitu *force-displacement*. Pada Penelitian ini, dilakukan validasi dengan merencanakan dimensi dan modifikasi V-EBF. Spesimen model yang dirancang mengacu pada spesimen nomor 1 yang diuji oleh [3]. Untuk pemodelan validasi dapat dilihat pada **Gambar 4**.

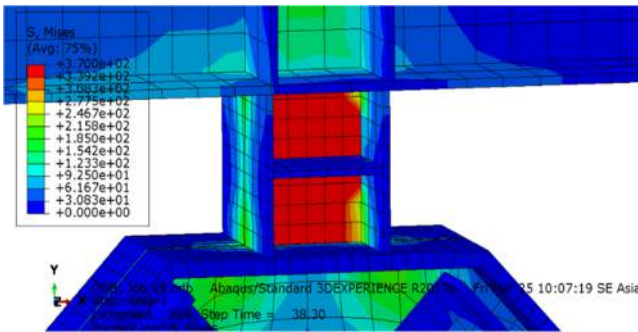


**Gambar 4.** Pemodelan dengan ABAQUS – leleh pertama

Dari pemodelan spesimen *frame* V-EBF, terlihat elemen *link* pada *frame* mencapai tegangan leleh pertama dengan nilai maksimum sebesar 241,2 MPa dengan deformasi sebesar 12,601 mm atau setara dengan 0,00815 rad, dan menyerap gaya sebesar 304 kN. Elemen lain seperti balok,

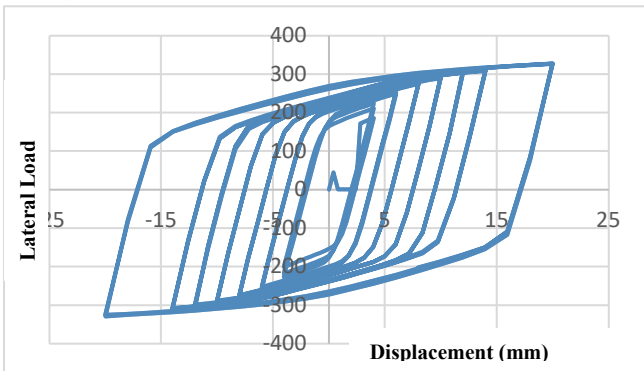


kolom, dan *bracing* belum mengalami pelelehan dengan tegangan maksimum sebesar 241 MPa. Pada hasil analisis ini elemen *link* mengalami pelelehan dan mencapai kondisi plastis terlebih dahulu, untuk elemen lain seperti balok, kolom, dan *bracing* masih dalam kondisi elastis, sesuai dengan persyaratan untuk *Eccentrically Braced Frames* (EBF). Pada pembebanan ultimate 370 MPa sebagian besar penampang *link* terlihat sudah mengalami leleh dibandingkan dengan elemen lainnya seperti terlihat pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** *Link* mengalami pelelehan pada kondisi *ultimate*

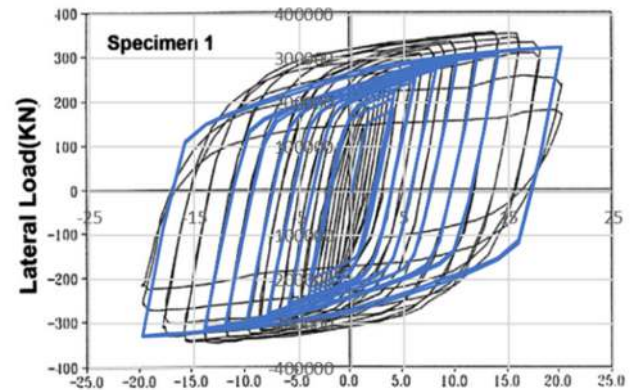
Kurva histeresis didapatkan dengan mengkombinasikan nilai *Displacement* ( $u$ ) pada sumbu  $x$ , dan *Reaction Force* (RF) pada sumbu  $y$ , seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6**. Kurva histeresis pada hasil analisis spesimen 1 terlihat bahwa gaya maksimum yang diserap oleh spesimen adalah sebesar 313 kN pada kondisi *displacement control* 18 mm, atau 0,0116 rad.



**Gambar 6.** Kurva Histeritis Permodelan Numerik – *Isotropic Hardening* (Model 1)

Pemodelan dapat dikatakan akurat apabila hasil momen-kurvatur pemodelan menunjukkan kemiripan dengan hasil eksperimental seperti pada **Gambar 7**, garis biru adalah hasil pemodelan sedangkan garis hitam adalah hasil eksperimental Bouwkamp [3]. Dengan membandingkan kurva histeresis pemodelan numerik dengan hasil eksperimental ternyata memiliki kemiripan bentuk dan selisih puncak-puncak kurva diantara keduanya di bawah 5% yaitu 3,99% pada seperti

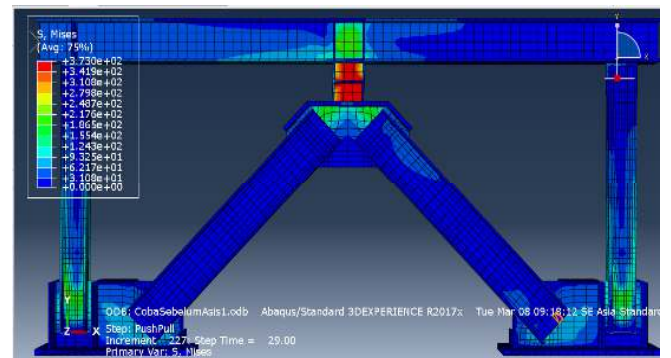
terlihat di **Tabel 2**, sehingga hasil validasi cukup valid dan dapat digunakan sebagai dasar permodelan untuk EBF.



**Gambar 7.** Kurva Momen-Kurvatur Hasil Eksperimental Bouwkamp [3] dan Pemodelan Numerik *Isotropic* (Model Validasi 1)

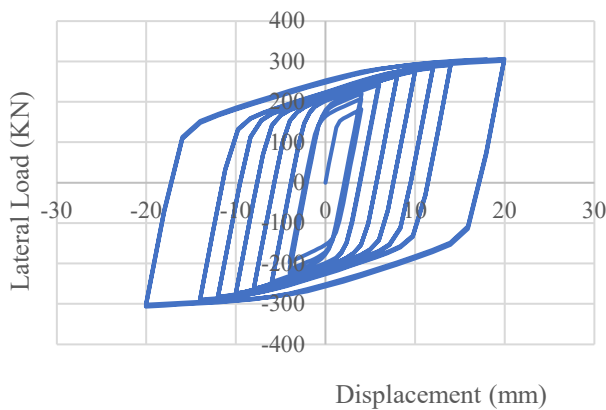
**Tabel 2.** Perbandingan kurva histeritis numerik vs eksperimental

Pemodelan	Displ. (mm)	Lateral Load (kN)	Selisih (%)
Eksperimental	18	313	
Model Validasi 1	18	326	3,99
Model Validasi 2	18	309	1,27
Model Validasi 3	18	309	1,27

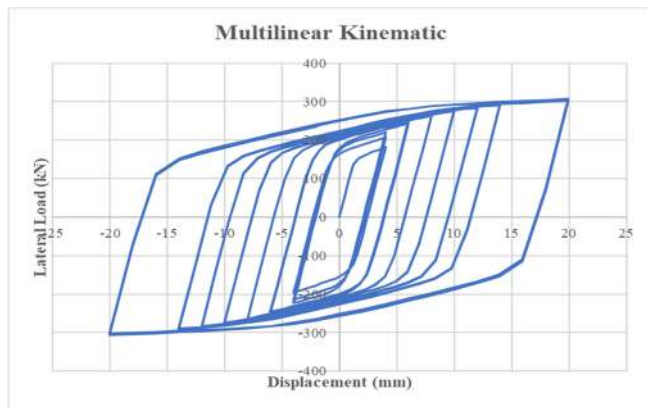


**Gambar 8.** Kondisi Seluruh Portal saat *link* mencapai tegangan *ultimate*

Kurva histeritis di **Gambar 6** diatas menggunakan pengerasan *Isotropic*. Pengerasan *Isotropic* dan *Kinematic* adalah dua model plastisitas yang paling umum digunakan untuk bahan logam yang daktil. Pengerasan *Kinematic* (*Kinematic Hardening*) memprediksi kekuatan luluh tekan yang lebih rendah daripada pengerasan *Isotropic*. *High tensile yield strength* ini pada akhirnya mengorbankan hasil tekan yang lebih rendah disebabkan oleh efek Bauschinger. Seperti terlihat pada **Gambar 9** didapatkan kurva histeritis pemodelan dengan pengerasan *Kinematic*.



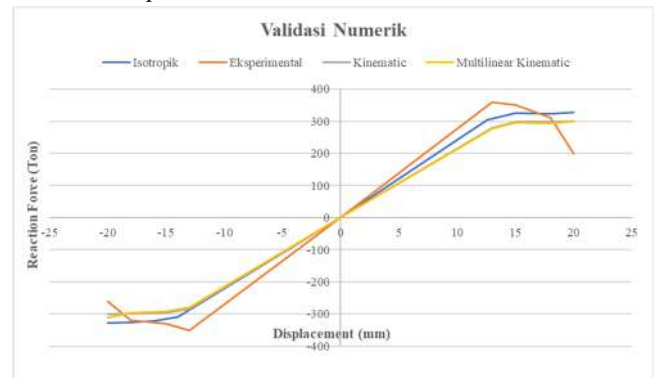
**Gambar 9.** Kurva Histeristis Pemodelan dengan *Kinematic Hardening* (Model Validasi 2)



**Gambar 10.** Kurva Histeristis Permodelan Numerik – *Multilinear Kinematic* (Model Validasi 3)

Seperti terlihat pada kurva histeristis pemodelan menggunakan *Kinematic Hardening* (Model Validasi 2) **Gambar 9** tegangan lelehnya lebih kecil (300 kN) daripada menggunakan *Isotropic Hardening* di **Gambar 6** (313 kN) sedangkan hal yang sama juga terjadi pada kurva histeristis dengan menggunakan *Kinematic Hardening*, hal ini disebabkan adanya efek *Bauschinger* pada **Gambar 10**. Efek *Bauschinger* menunjukkan hilangnya perilaku *Isotropic* dalam perilaku kekuatan-regangan yang dihasilkan akibat deformasi yang dihasilkan dalam baja. Ketika baja dibebani dengan gaya tarik, awalnya berubah bentuk secara elastis, tetapi kemudian menjadi plastis. Deformasi plastis terjadi karena gerakan dislokasi. Ketika arah tegangan dibalik, katakanlah dari tarik ke tekan, gerakan dislokasi dapat dimulai dengan kekuatan yang lebih rendah yang mengakibatkan penurunan kekuatan kompresi. Hal yang sama terjadi pada **Gambar 10**, dimana *Multilinear Kinematic Hardening* (Model Validasi 3) juga menunjukkan puncak yang sama, namun bentuk lekukan garis yang dihasilkan sedikit lebih rendah untuk gaya lateralnya. Sehingga untuk **Gambar 10**, didapatkan gaya disipasi yang lebih kecil.

Kurva *backbone* antara permodelan numerik dengan ABAQUS dan hasil eksperimental seperti terlihat pada **Gambar 11** terdapat kemiripan akan tetapi hasil kurva numerik lebih halus garisnya, sedangkan dari hasil eksperimental terdapat lekukan dan patahan kemungkinan dikarenakan adanya faktor di perletakan (*boundary condition*) seperti terjadi slip atau pergeseran, faktor dimensi material juga mempengaruhi hasil eksperimental. Selain itu bisa juga dipengaruhi faktor pada ABAQUS, tipe *Hardening* digunakan *Isotropic* sedangkan pada eksperimental digunakan gabungan antara *Isotropic* dan *Kinematic*.



**Gambar 11.** Kurva Backbone Permodelan Numerik Vs Eksperimental Bouwkamp [3]

Disipasi energi adalah kemampuan struktur dalam menyerap energi melalui proses leleh pada daerah sendi plastis. Dalam merencanakan suatu struktur gedung tahan gempa bersifat duktail di daerah sendi plastis sehingga diharapkan terjadinya deformasi plastis sebelum keruntuhan. Nilai disipasi energi diambil dari menghitung luasan grafik terluar dari kurva histeristis antara beban lateral dan deformasi, luasan area tertutup menunjukkan besarnya disipasi energi sebagaimana terlihat pada **Tabel 3**, dimana dibandingkan antara hasil eksperimental dan numerik dan mengetahui selisihnya.

**Tabel 3.** Perbandingan Disipasi Energi Numerik vs Eksperimental

Tipe	Disipasi Energi (Ton.mm)	Selisih (%)
Eksperimental	8.428,75	
Model Validasi 1 ( <i>Isotropic</i> )	8.059,57	4,38
Model Validasi 2 ( <i>Kinematic</i> )	7.812,87	7,30
Model Validasi 3 ( <i>Multilinear Kinematic</i> )	7791,35	7,56

Di dalam **Tabel 3**, dapat dilihat bahwa selisih energi disipasi untuk model validasi 1 yang dimodelkan secara *Isotropic* sebesar 4,38%, sedangkan untuk model validasi 2 yang dimodelkan secara *Kinematic* menghasilkan selisih

energi sebesar 7,30%, dan untuk model validasi 3 yang dimodelkan secara multilinear *Kinematic* sedikit lebih rendah dari model validasi 2 yaitu sebesar 7,56%, secara perbandingan didapatkan untuk selisih model validasi 1 dengan menggunakan *Isotropic* memiliki selisih yang tidak terlalu besar yaitu di bawah 5% antara pemodelan numerik dan hasil eksperimental untuk pemodelan secara *Isotropic*, sehingga bisa menunjukkan bahwa pemodelan numerik menggunakan program Abaqus untuk memodelkan struktur V-EBF (*Eccentrically Braced Frame* dengan *Vertical Link*).

#### 4. Simpulan

Dari hasil analisis validasi portal *Vertical Eccentrically Braced Frames* (V-EBF) menggunakan profil WF *shear link* dengan metode elemen hingga menggunakan program Abaqus didapatkan sebagai berikut:

1. Elemen *vertical link* akan mengalami kelelahan dan mencapai kondisi plastis terlebih dahulu sedangkan elemen lain seperti balok, kolom dan *bracing* masih dalam kondisi elastis sesuai dengan persyaratan dari sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF).
2. Validasi spesimen V-EBF menggunakan program ABAQUS secara numerik menghasilkan gaya geser sebesar 326 kN pada saat displacement 18 mm dengan pemodelan secara *Isotropic* pada Model Validasi 1, lalu sebesar 300 kN pada saat displacement 18 mm dengan pemodelan secara *Kinematic* pada Model Validasi 2, dan sebesar 300 kN juga pada saat displacement 18 mm dengan pemodelan secara *Multilinear Kinematic* pada Model Validasi 3, sedangkan hasil eksperimental pada jurnal Vetr et al. menghasilkan gaya geser sebesar 313 kN dan terjadi pada *displacement* 18 mm. Perbedaan ketika membandingkan hasil validasi dengan eksperimental selisihnya sebesar 3,99 % untuk pemodelan *Isotropic* (Model Validasi 1), dan 1,27% untuk pemodelan *Kinematic* (Model Validasi 2) dan multilinear *Kinematic* (Model Validasi 3), sehingga secara keseluruhan untuk validasi perpindahan untuk ketiga model masih di bawah 5% sehingga dapat disimpulkan bahwa ada kemiripan antara keempatnya, sehingga pemodelan ini bisa dianggap *valid* untuk memodelkan struktur V-EBF (*Eccentrically Braced Frame* dengan *Vertical Link*)
3. Disipasi energi ditentukan oleh luasan loop dari kurva beban dengan defleksi, jika kapasitasnya lebih besar menunjukkan kemampuan untuk menyerap energinya juga besar, hasil eksperimental lebih besar disipasi energinya yaitu sebesar 8.428,75 ton.mm, dengan selisih masih di bawah 5% dari pemodelan numerik *Isotropic* (Model Validasi 1) yaitu sebesar 4,38%. Lalu untuk pemodelan *Kinematic* (Model Validasi 2) sebesar 7,30%, dan pemodelan multilinear *Kinematic* (Model Validasi 3) sebesar 7,56%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa disipasi energi untuk *Isotropic* memiliki energi yang paling besar daripada *Kinematic* dan *Multilinear Kinematic*.
4. Adanya selisih dari hasil eksperimental dengan pemodelan numerik bisa disebabkan beberapa faktor diantaranya kesalahan membaca hasil ukur, adanya *slip* atau pergerakan pada perletakan serta dimensi atau pun yang tidak akurat pada *part* (material) yang digunakan sebagai spesimen pada percobaan eksperimental, akan tetapi dikarenakan selisihnya masih di bawah 5% dianggap sudah memenuhi batas toleransi.

#### Daftar Pustaka

- [1] A. K. Sina and C. Topkaya, "A review of research on steel eccentrically braced frames," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, no. 2017, pp. 53-73, 2017.
- [2] Taranath, Bungale S. 2012. *Structural Analysis and Design of Tall Building: Steel and Composite Construction*. CRC Press.
- [3] Bouwkamp, Jack, Mohamad Ghasem Vetr, and Ali Ghamari. 2016a. "An Analytical Model for Inelastic Cyclic Response of Eccentrically Braced Frame with Vertical Shear Link (V-EBF)." *Case Studies in Structural Engineering* 6:31–44. doi: 10.1016/j.csse.2016.05.002.
- [4] Budiono, Bambang, Muslinang Moestopo, and Made Suarjana. 2010. Behavior of Shear Link of WF Section with Diagonal Web Stiffener of Eccentrically Braced Frame (EBF) of Steel Structure. <https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/133> Vol 42 <https://doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2010.42.2.1>
- [5] AISC. 2016. *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings Supersedes the Seismic Provisions for Structural Steel Building*.
- [6] Indira Kumalasari, Aulia, Budi Suswanto, and Hidajat Sugihardjo. 2020. Studi Numerik Terhadap Kinerja Serta Perilaku Elemen Web-Bolted Replaceable Link Pada Eccentrically Braced Frames. <http://iptek.its.ac.id/index.php/jats> Vol. 18
- [7] Hariyanto, Ifarrel Rachmanda, Budi Suswanto, and Ahmad Basshofi Habieb. 2022. Jurnal Aplikasi Teknik Sipil Analisis Numerik Vertical Shear Link (VSL) Secara Sub-Assemblage Menggunakan Program Bantu ABAQUS. <http://iptek.its.ac.id/index.php/jats> Vol 20

**Halaman ini sengaja dikosongkan**