

NASKAH PUBLIKASI

JURUSAN TEKNIK SIPIL, FAKULTAS TEKNIK, UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH
YOGYAKARTA

STUDI NUMERIK SAMBUNGAN BALOK KOLOM BETON BERTULANG PRACETAK EKSTERIOR DENGAN VARIASI PENAMPANG BALOK MENGGUNAKAN BEBAN STATIK ¹

Eka Riyadini Weningtyas², Bagus Soebandono³, Hakas Prayuda⁴

1. Judul Tugas Akhir
2. Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
3. Dosen Pembimbing Tugas Akhir 1
4. Dosen Pembimbing Tugas Akhir 2

INTISARI

Sambungan balok-kolom pada beton pracetak merupakan bagian yang sangat penting dalam mendistribusikan gaya-gaya yang bekerja antar elemen pracetak, apabila perencanaan tidak dilakukan dengan baik maka sambungan dapat mengubah gaya yang bekerja pada struktur pracetak sehingga dapat terjadi kegagalan struktur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai daktilitas, disipasi energi, kekakuan, tegangan regangan, dan pola retak, sehingga didapatkan hasil sambungan yang efisien dan efektif untuk diaplikasikan di lapangan. Penelitian ini menggunakan dua buah benda uji sambungan eksterior pada tengah bentang, yaitu BU-1 sambungan balok persegi panjang dan kolom persegi dan BU-2 sambungan balok T dan kolom persegi. Penelitian dilakukan dengan permodelan menggunakan software ABAQUS CAE 6.11-2.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas beban lateral maksimum sebesar 40 kN dan BU-2 mempunyai kapasitas beban lateral maksimum sebesar 100 kN. Sehingga dalam aplikasi bisa tidak disarankan untuk digunakan pada gedung yang memiliki gaya geser yang melebihi pengujian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekakuan yang dimiliki BU-1 sebesar 0,460 kN/mm dan BU-2 sebesar 1,015 kN/mm. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan dimensi antara BU-1 dan BU-2 yang signifikan. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai disipasi energi BU-1 sebesar 1201,423 Joule, dan BU-2 sebesar 10522,633 Joule. Dari hasil tersebut diketahui bahwa nilai disipasi energi BU-2 jauh lebih besar daripada BU-1, perbedaan yang cukup jauh yang berarti kemampuan struktur untuk menyerap energi pada BU-2 jauh lebih besar dibandingkan dengan BU-1. Hasil dari penelitian nilai daktilitas untuk BU-1 sebesar 1,917 dan untuk BU-2 sebesar 4,949 Retak pertama terjadi pada beban sekitar 19,317 kN pada BU-1 dan 44,89 kN pada BU-2. Keruntuhan terjadi pada beban maksimum sebesar 40 kN pada benda uji 1 dan 100 kN pada benda uji 2. Tipe keretakan yang terjadi pada kedua benda uji akibat gaya geser, dan bentuk dari retak ini akan membentuk sudut 45° terhadap gaya yang bekerja pada komponen tersebut. Sehingga termasuk kedalam tipe retak geser

Kata kunci: Sambungan balok-kolom, beton pracetak, elemen hingga, ABAQUS, beban statik

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kecepatan dalam pelaksanaan pembangunan sangat dibutuhkan terutama di kota-kota besar. Penggunaan beton pracetak diharapkan dapat memberikan solusi untuk mempermudah pekerjaan. Sambungan balok kolom merupakan bagian yang sangat penting dalam mendistribusikan gaya-gaya yang bekerja antar elemen pracetak. Apabila perencanaan tidak dilakukan dengan baik maka sambungan dapat mengubah gaya yang bekerja pada struktur pracetak, sehingga dapat terjadi kegagalan struktur. Pekerjaan analisis sambungan dapat dilakukan menggunakan permodelan pada *software* salah satunya adalah dengan penggunaan *software ABAQUS CAE 6.11-2*. *ABAQUS CAE 6.11-2* adalah aplikasi perangkat lunak yang berbasis pada metode elemen hingga, yang digunakan untuk permodelan dan analisis komponen mekanis dan rakitan (*pre-processing*) dan memvisualisasikan hasil dari analisis elemen hingga tersebut.

Fokus penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi suatu tipe sambungan dengan beban statik tertentu apakah memenuhi syarat dalam keamanan suatu bangunan. Beban statik digunakan untuk menganalisis beban yang terjadi secara terus-menerus yang bersifat tetap, yaitu beban dari benda uji itu sendiri dan beban yang diberikan kepada benda uji yang sifatnya tetap dalam waktu yang lama. Sehingga dengan pemodelan ini dapat mempermudah analisis tentang sambungan antara balok kolom dengan variasi balok T dan balok persegi yang dibebani oleh beban statik. Keuntungan yang didapat pada penelitian ini antara lain adalah dengan adanya analisis ini memperkecil kegagalan struktur pada sambungan balok kolom karena pada awal perencanaan sudah diketahui kekuatan yang akan dihasilkan dari berbagai jenis sambungan yang dijadikan penelitian, hal ini bisa dijadikan acuan

dalam perancangan suatu sambungan balok kolom sehingga bisa didapatkan hasil yang efektif dan efisien.

B. Rumusan Masalah

1. Berapa nilai daktilitas yang dihasilkan dari hasil hubungan tegangan dan regangan dari benda uji yang terjadi akibat beban statik?
2. Berapa nilai kekakuan dan disipasi energi yang terjadi dari hasil hubungan beban dan lendutan pada benda uji?
3. Bagaimana pola keretakan dari benda uji setelah diberi beban maksimum?

C. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui nilai daktilitas yang dihasilkan dari hubungan tegangan regangan dari benda uji yang terjadi akibat beban statik.
2. Mengetahui nilai kekakuan dan disipasi energi yang terjadi dari hasil hubungan beban dan lendutan pada benda uji.
3. Mengetahui visualisasi dari pola keretakan dari benda uji setelah diberi beban maksimum.

D. Batasan Masalah

1. Penelitian menggunakan analisis numerik sehingga tidak melakukan pengujian laboratorium.
2. Penelitian menggunakan sambungan kolom dengan variasi balok T dan balok persegi dengan tumpuan exterior.
3. Hal-hal yang ditinjau meliputi: nilai daktilitas, nilai disipasi energi, kekakuan yang terjadi, dan pola keretakan akibat beban statik yang terjadi pada benda uji.
4. Penggunaan data sifat mekanik material beton pracetak untuk kolom dan balok.

E. Manfaat Penelitian

Memberikan kajian mengenai perilaku sambungan balok kolom pracetak dengan variasi balok T dan balok persegi akibat beban statik, apakah memenuhi persyaratan kriteria perencanaan, sehingga didapatkan model sambungan yang efisien dan efektif untuk diaplikasikan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tjahjono dan Heru (2004) melakukan studi eksperimental terhadap pengaruh penempatan penyambungan terhadap perilaku rangkaian balok-kolom struktur portal beton pracetak yang diberikan beban siklik. Tiga benda uji, penempatan penyambungannya berada pada daerah pertemuan balok-kolom dan satu benda uji penempatan penyambungan berada di daerah potensi sendi plastis balok. Sambungan tipe A, penyambungan dilakukan pada pertemuan elemen balok dan kolom pracetak dengan adanya penonjolan daerah balok pada sisi luar. Sambungan tipe B, penyambungan di daerah elemen balok sejarak h_b (tinggi balok) dari muka pertemuan balok-kolom. Penyambungan tulangan utama yang keluar dari elemen-elemen pracetak menggunakan media penyambung berupa baja siku L25x25x2,5 yang dilas. Sambungan tipe I, penyambungan dilakukan pada pertemuan elemen kolom dan elemen balok pracetak sampai dengan daerah potensi sendi plastis yaitu $2 h_b =$ dua kali tinggi balok. Sambungan tipe Y, penyambungan dilakukan tepat di daerah pertemuan elemen kolom dan elemen balok pracetak. Dari hasil pengujian keempat benda uji diperoleh kondisi beban-lendutan yaitu sambungan tipe I dapat mencapai beban maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan ketiga tipe sambungan yang lain, hal ini disebabkan daerah sambungan basah yang lebih panjang dibandingkan dengan tipe lainnya. Secara berurutan hasil dari yang terkecil sampai yang terbesar, tipe I = 20,25 kN, tipe Y = 20 kN, tipe A = 19 kN, dan tipe B = 16,4 kN.

Kurniawan (2014) melakukan analisis numerik sambungan balok-kolom pracetak dengan hasil pengujian menunjukkan bahwa beban lateral maksimum benda uji sebesar 4,4 kN. Kekakuan benda uji pada saat leleh sebesar 0,54 kN/mm. Daktilitas benda uji sebesar 1,09 dimana nilai ini lebih kecil dari nilai daktilitas rerata untuk sistem SRPM yaitu sebesar 3 - 4. Disipasi energi sebesar 19,61 kNmm atau sebesar 14 % yang merupakan nilai terendah dibandingkan disipasi energi rerata beton yang umumnya 14 - 20 %. Degradasi kekakuan pada rasio simpangan 0,3 % sebesar 0,77 kN/mm menunjukkan penurunan kekakuan sebesar 29,8 % terhadap rasio simpangan 0,5 %. Hysteresis loop benda uji menunjukkan rasio simpangan yang dicapai sebesar 0,5 % pada beban maksimum tidak memenuhi persyaratan ACI TI. 1-01 rasio simpangan harus mencapai 2,5%. Berdasar

kriteria penerimaan RSNI : “Metode Uji Sistem Struktur Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang Pracetak Untuk Bangunan Gedung”, mensyaratkan nilai disipasi energi relatif tidak kurang dari 1/8 dan nilai kekakuan pada rasio simpangan -0,035 – 0,035 tidak kurang dari 0,05 kekakuan awal sebesar 0,0382 kN/mm dimana benda uji memenuhi syarat karena memiliki disipasi energi relatif sebesar 0,47 dan kekakuan 0,0522 kN/mm. Benda uji mengalami kegagalan tarik pada tulangan negatif 2D19 pada balok B3A. Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa kekuatan benda uji relatif kecil untuk dapat berfungsi sebagai peredam beban siklik sehingga perlu perkuatan daktilitas agar sistem struktur dapat meredam energi gempa

III. LANDASAN TEORI

A. Beton Pracetak

Beton pracetak merupakan elemen atau komponen beton dengan atau tanpa tulangan yang dicetak terlebih dahulu sebelum dirakit menjadi bangunan. Semua komponen pracetak beserta sambungannya harus mampu menahan semua kondisi pembebanan dan kekangan dari pabrikasi awal sampai penggunaan akhir pada struktur, termasuk pembongkaran bekisting, penyimpanan, transportasi, dan ereksi. (SNI 2847:2013)

B. Hubungan Tegangan dan Regangan

1. Tegangan

Tegangan adalah besaran pengukuran intensitas gaya (P) atau reaksi dalam yang timbul per satuan luas (A), gaya umumnya dinyatakan dalam satuan Newton (N) dan luas dalam mm^2 , sehingga tegangan biasanya dinyatakan dalam N/mm^2 (MPa). Tegangan normal dianggap positif jika menimbulkan suatu tarikan (tensile) dan dianggap negatif jika menimbulkan penekanan (compression).

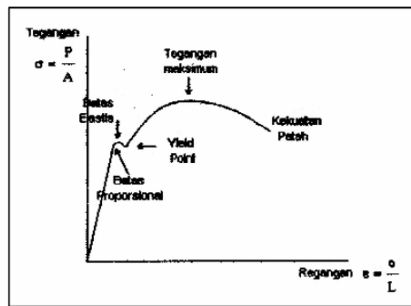
2. Regangan

Regangan adalah perubahan ukuran dari panjang awal sebagai hasil dari gaya yang menarik atau menekan pada material. Batasan sifat elastis perbandingan tegangan regangan akan linier dan akan berakhir sampai pada titik mulur. Hubungan tegangan regangan tidak lagi linier pada saat material mencapai batas fase sifat plastis. Rumus untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan (ϵ) yaitu dengan membagi perpanjangan ($l-l_0$) dengan panjang material

mula-mula (I₀). Regangan tidak mempunyai satuan.

3. Hubungan Tegangan-Regangan

Pada awal pembebanan dimana gaya terus meningkat beton akan mengalami sifat elastis dan kemudian tahap plastis. Konsep ini terdapat pada kurva tegangan regangan pada Gambar 1 daerah plastis terdapat pada garis kurva diatas titik mulur batas tegangan dimana material tidak akan kembali ke bentuk semula bila beban dilepas dan akan mengalami deformasi tetap yang disebut permanen set (Timoshenko dan Goodier, 1986).



Gambar 1 Grafik hubungan tegangan-regangan (Hastomo, 2009)

4. Daktilitas (μ)

Daktilitas adalah kemampuan stuktur atau komponen struktur untuk mengalami deformasi inelastik bolak-balik berulang setelah leleh pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup untuk mendukung bebannya, sehingga struktur tetap berdiri walaupun sudah retak/rusak dan diambang keruntuhan. Daktilitas dapat diperoleh dari hubungan tegangan regangan dengan rumus dibawah ini:

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \dots\dots\dots (1)$$

dengan:

- μ_ε = daktilitas regangan
- ε_u = regangan ultimate
- ε_y = regangan leleh

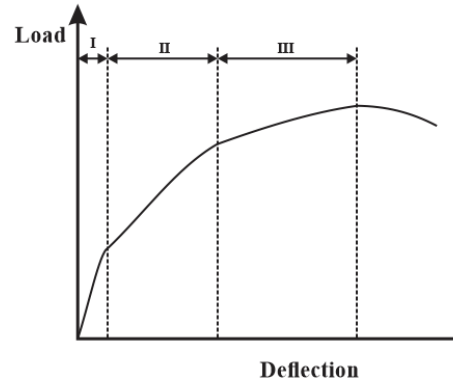
C. Hubungan Beban dan Lendutan

Hubungan Beban-Lendutan balok beton bertulang pada dasarnya terdapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear seperti pada gambar 3.4. Hubungan ini terdiri atas tiga daerah sebelum terjadinya runtuh (Nawy, 2003)

Daerah I : Taraf praretak, dimana batang-batang strukturalnya bebas retak.

Daerah II : Taraf pascaretak, dimana batang-batang strukturalnya mengalami retak terkontrol yang masih bisa diterima, baik dalam segi distribusinya maupun lebarnya.

Daerah III: Taraf pasca-serviceability, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya.



Gambar 2 Hubungan beban-lendutan pada balok (Nawy, 2003)

Dari hubungan beban dan lendutan dapat dihasilkan:

1. Kekakuan

Kekakuan merupakan gaya yang diperlukan untuk menghasilkan unit displacement. Rumus kekakuan dapat dilihat pada Persamaan (2) berikut ini:

$$K = \frac{Py}{\delta y} \dots\dots\dots (2)$$

dengan,

- K = Kekakuan (kN/mm)
- Py = Beban pada saat benda uji leleh/ yield (kN)
- δy = Lendutan yang terjadi pada saat leleh/ yield (mm)

2. Disipasi Energi

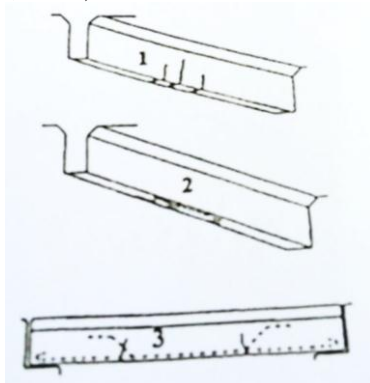
Disipasi energi adalah kemampuan struktur untuk menyerap energi melalui proses leleh pada daerah sendi plastis. Sendi plastis diusahakan bersifat daktail sehingga memungkinkan terjadinya deformasi plastis sebelum keruntuhan. Kemampuan struktur untuk berdeformasi plastis ini harus diperhatikan dalam perencanaan struktur. Pada struktur yang diberikan beban statik ini, energi yang diserap dalam satu kali pembebanan adalah jumlah dari energi yang diserap struktur pada saat menerima beban tarik dan beban tekan. Sehingga total

energi yang terdisipasi selama pembebanan berlangsung merupakan luar daerah beban (P)-Displacement (Aziz, 2010).

D. Pola Keretakan

Retak merupakan jenis kerusakan yang paling sering terjadi pada struktur beton, yang secara visual tampak seperti garis. Retak yang terjadi pada saat beton mulai mengeras (beton belum mampu menahan beban layan) antara lain terjadi karena pembekuan udara dingin (pada daerah dengan musim dingin), susut (*shrinkage*), serta penurunan (*settlement*). Retak yang terjadi saat beton mengeras salah satunya adalah retak struktural. Retak ini terjadi karena adanya pembebanan yang mengakibatkan timbulnya tegangan lentur, tegangan geser, dan tegangan tarik (Aziz, 2014). Pada dasarnya retak yang terjadi pada elemen atau struktur seperti pada Gambar 3.3, terdiri atas tiga jenis, antara lain;

1. Retak Lentur (*flexural crack*)
Retak yang terjadi akibat beban lentur yang jauh lebih besar dari beban geser. Bentuk retak akan berupa garis lurus sejajar dengan arah gaya yang bekerja pada komponen tersebut, mengarah/ menjalar dari bagian tarik menuju bagian tekan (Noiyya, 2012).
2. Retak Arah Memanjang
Retak yang terjadi akibat pelaksanaan tidak baik atau karena selimut beton tidak mencukupi (Triwiyono, 2004).
3. Retak Geser (*shear crack*)
Retak yang terjadi akibat gaya geser, dan bentuk dari retak ini akan membentuk sudut 45° terhadap gaya yang bekerja pada komponen tersebut. Retak ini terjadi pada lokasi yang belum mengalami retak lentur, dan hal ini terjadi karena gaya geser yang ada lebih besar dari momen yang terjadi (Noiyya, 2012).



Gambar 3 Retak pada balok beton bertulang (Aziz, 2014)

E. Permodelan Elemen Hingga

Kurniawan (2014) mengatakan bahwa ABAQUS merupakan program komputer berbasis elemen hingga untuk menganalisis berbagai macam permasalahan nonlinier termasuk beton bertulang. Kemampuan program ini tidak lagi diragukan karena mampu untuk melakukan meshing dengan akurat dengan berbagai pilihan model elemen agar dapat semakin mendekati dengan kondisi sebenarnya serta mampu melakukan analisis dinamik dan siklik loading. ABAQUS memberikan solusi berbagai persamaan konstitutif untuk menyelesaikan permasalahan nonlinier sehingga memudahkan pengguna untuk memilih solusi yang tepat untuk model yang akan dianalisis.. Beberapa parameter awal yang merupakan sifat material, geometri yang tepat dan pemilihan solusi untuk memecahkan masalah menjadi bagian yang penting.

Konsistensi ABAQUS dalam pengembangan *software* memberikan kemajuan dalam ketepatan permodelan material, geometri dan model pembebanan sehingga bisa semakin diperoleh hasil yang eksak dan mendekati kondisi nyata. Dalam permodelan, ABAQUS memberikan banyak pilihan model yang dapat digunakan. Pengguna dapat memilih model sesuai dengan geometri, material, perilaku benda uji yang akan dimodelkan.

1. Model Beton

Dalam permodelannya, beton dimodelkan sebagai *three-dimensional solid part/ continuum element*. Pertimbangannya adalah penggunaan *three-dimensional model* akan memberikan kemungkinan untuk menggunakan kondisi batas yang kompleks dan diharapkan lebih mendekati kondisi aktual sebenarnya dari benda uji. Tipe elemen ini memiliki delapan titik dengan tiga derajat kebebasan pada tiap titiknya dan translasinya pada arah x, y, z. elemen ini mampu untuk melakukan deformasi, retak pada tiga arah sumbu orthogonal dan kemudian hancur.

2. Model Baja Tulangan dan Plat Sambung

Model truss disediakan ABAQUS untuk memodelkan baja tulangan. Diperlukan minimal dua titik untuk dapat menggunakan elemen ini. Tiap titiknya memiliki tiga derajat kebebasan dan translasinya pada arah x, y, z. elemen ini memiliki kemampuan untuk mengalami deformasi plastis.

ABAQUS memberikan dua pilihan untuk mendeskripsikan tulangan diskrit dalam model tiga dimensi. Tulangan dapat didesain sebagai *embedded surface* dengan model rebar layer atau *embedded* dengan menggunakan *truss* elemen. Namun umumnya pada pilihan pertama biasanya digunakan dalam permodelan plat, untuk benda uji berupa balok kolom beton atau joint digunakan *embedded of truss element*. Untuk plat sambung digunakan permodelan *embedded* dalam interaksinya dengan elemen beton. Konsep jika interaksi elemen di definisikan sebagai *embedded* maka akan terjadi interaksi yang sama antara elemen *embedded* dengan *host* elemennya. Translasi derajat kebebasan dari titik *embedded* terkait dengan hasil interpolasi berdasarkan derajat kebebasan dari *host* elemennya. Jadi *host* elemen sebagai *constrain* pada *embedded* elemen, sehingga translasi yang terjadi pada titik *embedded* akan identik dengan *host* elemennya.

3. Model Material Grouting

Material grouting sebagai pengisi memiliki karakter yang sama dengan beton sehingga permodelannya pun menggunakan *three dimensional solid part*. Perbedaannya ada pada interaksi antara beton basah dengan beton pracetak dimana diusulkan oleh Lin Xin (2007) menggunakan *function* dalam permodelannya sehingga terjadi perbedaan perilaku pada daerah pertemuan antara beton pracetak dengan material pengisi.

4. Meshing Beton

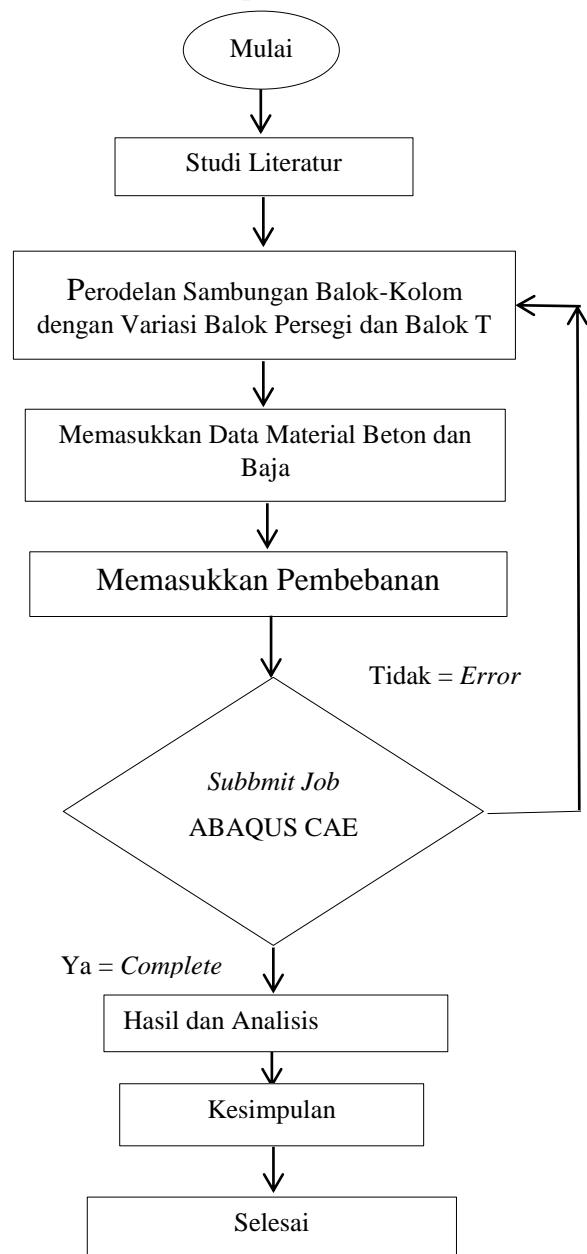
Permodelan elemen hingga pada penelitian ini dibatasi oleh jenis material yang tersedia dalam ABAQUS yang dinamakan *brick elements* sehingga dapat diperoleh distribusi gaya yang paling tepat pada analisis 3 dimensi.

5. Meshing Baja Tulangan

Tulangan merupakan elemen tarik pada beton bertulang, dapat didefinisikan sebagai elemen *truss* tiga dimensi baik secara linear (T3D2) ataupun *quadratic order* (T3D3). Pemilihan elemen ini sebagai *truss*, terkait dengan sifat tulangan yang meneruskan distribusi gaya sepanjang tulangan. Hal ini sesuai dengan sifat elemen *truss* pada ABAQUS yang mendistribusikan gaya sepanjang elemen. Sehingga dapat diperoleh perilaku yang tepat pada baja tulangan.

IV. METODOLOGI PENELITIAN

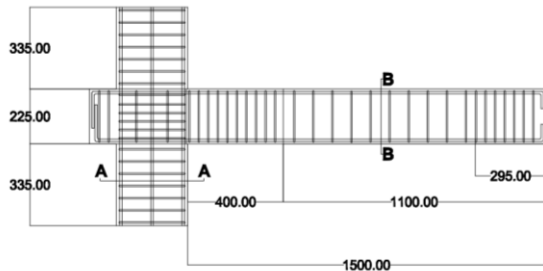
A. Tahapan Penelitian



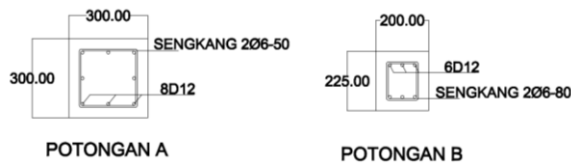
Gambar 4 Bagan alir penelitian

B. Pemodelan 2 Dimensi Benda Uji pada Program AutoCAD

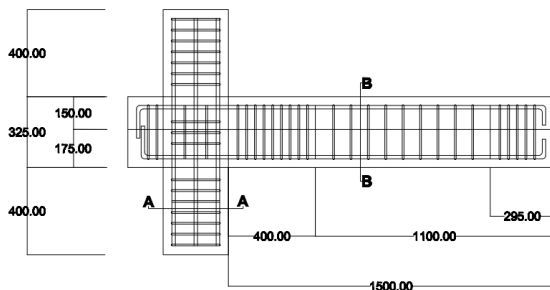
Permodelan benda uji pada software AutoCAD dapat dilihat pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 7.



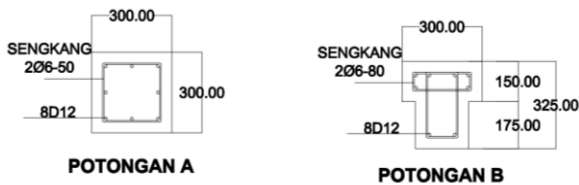
Gambar 5 Detail benda uji 1



Gambar 6 Detail potongan benda uji 1



Gambar 7 Detail benda uji 2



Gambar 8 Detail potongan benda uji 2

C. Input Geometri dan Analisis Benda Uji Menggunakan Software ABAQUS CAE 6.11-2

Pada penelitian ini hasil yang akan dianalisis menggunakan software ABAQUS CAE 6.11-2 adalah hubungan tegangan regangan dan hubungan beban lendutan.

Input geometri pada ABAQUS sesuai dengan ukuran yang telah dimodelkan pada AutoCAD. Kemudian pengisian material pada modul property, adapun data material dapat dilihat pada Tabel 1 sampai Tabel 6.

Tabel 1 Parameter *plasticity* beton (Panduan Pemodelan Struktur Beton Bertulang dengan ABAQUS)

Dilatation angle (Ψ)	Eccentricity	F_{boffco}	K	Viscosity
30	0,1	1,16	0,67	0,005

Tabel 2 *Compressive Behavior* (Panduan Pemodelan Struktur Beton Bertulang dengan ABAQUS)

Yield Stress	Inelastic Strain
11,47417	0
17,67084	0,00039
21,01294	0,00061
26,05119	0,00109
28,47684	0,00159
28,68542	0,00179
28,22981	0,00209
25,53734	0,00259
14,34271	0,00354
6,05362	0,00459
3,49047	0,00559
0,93815	0,00959

Tabel 3 *Concrete compression damage* (Panduan Pemodelan Struktur Beton Bertulang dengan ABAQUS)

Damage Parameter	Inelastic Strain
0	0
0	0,00039
0	0,00061
0	0,00109
0	0,00159
0	0,00179
0,02	0,00209
0,11	0,00259
0,5	0,00354
0,79	0,00459
0,88	0,00559
0,97	0,00959

Tabel 4 *Tensile Behavior* (Panduan Pemodelan Struktur Beton Bertulang dengan ABAQUS)

<i>Yield Stress</i>	<i>Cracking Strain</i>
1,89742	0
2,10825	8,00E-05
1,99877	0,00013
1,94403	0,00015
1,82213	0,0002
1,34192	0,00039
1,01349	0,00052
0,79454	0,00061
0	0,00093

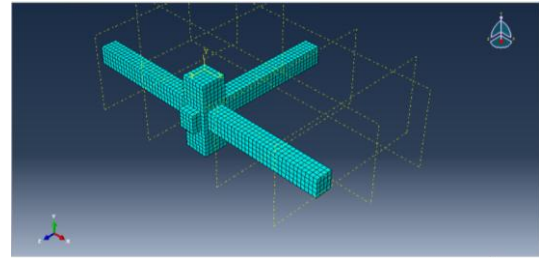
Tabel 5 *Concrete tension damage* (Panduan Pemodelan Struktur Beton Bertulang dengan ABAQUS)

<i>Damaged Parameter</i>	<i>Cracking Strain</i>
0	0
0	8,00E-05
0,05	0,00013
0,08	0,00015
0,14	0,0002
0,36	0,00039
0,52	0,00052
0,62	0,00061
0,99	0,00093

Tabel 6 Tabel *Stress dan Strain* (Panduan Pemodelan Struktur Beton Bertulang dengan ABAQUS)

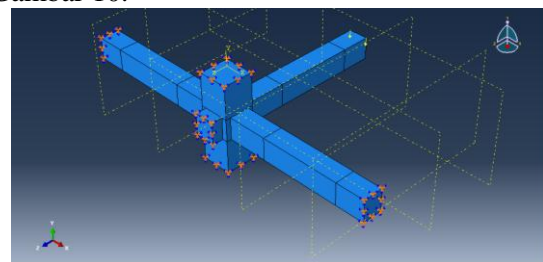
<i>Stress</i>	<i>Strain</i>
420	0
420	0,018
500	0,028
500	0,198

Mesh merupakan fasilitas untuk melakukan pembagian dan penentuan tipe dari *Element* dari *Part* ataupun *Assembly*. Konvergensi dari analisis tergantung dari tingkat keteraturan dan kesesuaian elemn yang digunakan dengan geometrik struktur. Dari hasil konvergensi dipilih selisih yang kurang dari 5% untuk keakuratan data yang dipakai. Dari data tersebut untuk BU-1 digunakan *Mesh* 70 dan untuk BU-2 digunakan *Mesh* 50 Langkah untuk menampilkan fasilitas *Mesh* pilih *Mesh*.



Gambar 9 Mesh pada semua elemen benda uji

Hanya satu bagian balok yang akan dianalisis dan diberi pembebanan pada penelitian ini. Ujung-ujung balok tepi diberi jepit dan ujung-ujung kolom juga diberi jepit serta balok lebih juga diberikan jepit. Tumpuan benda uji merupakan kantilever yang dijepit pada salah satu ujung yang menempel pada balok dan bebas pada ujung lainnya. Besar beban yang diberikan pada BU-1 adalah 100 kN dan BU-2 adalah 40 kN. Pembebanan dilakukan pada dua titik pada sisi ujung balok yang bebas, karena dikehendaki retak pada sambungan. Ilustrasi pembebanan dan penumpuan pada benda uji dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 Ilustrasi pembebanan dan penumpuan benda uji

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

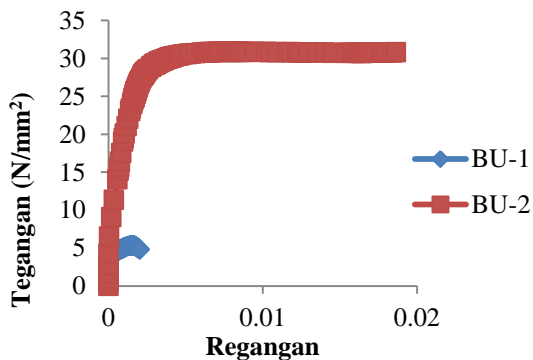
A. Hubungan Tegangan Regangan

Hasil tegangan dan regangan dari penelitian dapat terlihat seperti pada Tabel 7. Tabel tersebut menampilkan nilai tegangan maksimal yang terjadi sebesar 5,33699 N/mm² dengan regangan sebesar 0,0015901 pada BU-1, sedangkan untuk BU-2 didapatkan hasil tegangan maksimum sebesar 30,7865 N/mm² dengan nilai regangan sebesar 0,01863595. Perbandingan hubungan tegangan regangan terlihat dalam grafik pada Gambar 11. Nilai daktilitas ditentukan dari nilai perbandingan antara regangan ultimate (μ_u) dan regangan leleh (μ_y). Dari grafik pada Gambar 12 didapatkan nilai daktilitas untuk BU-1 sebesar 1,917 dan untuk BU-2 sebesar 4,949. Perbandingan dari kedua benda uji tersebut sebesar BU-2 memiliki nilai daktilitas 2,58 kali lebih besar daripada BU-

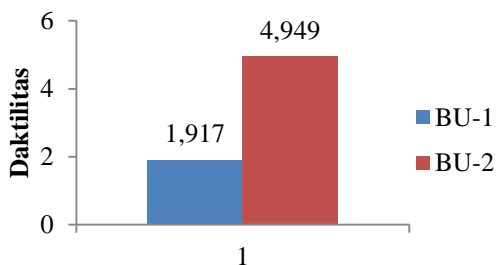
Dari hasil tersebut BU-1 memiliki nilai daktilitas yang lebih kecil daripada BU-2. Hal ini membuktikan bahwa BU-2 memiliki kemampuan struktur untuk menahan kekuatan dan kekakuan untuk mendukung beban yang lebih besar daripada BU-1

Tabel 7 Parameter hubungan regangan dan tegangan

Benda Uji	Yield		Ultimit	
	Regangan	Tegangan (N/mm ²)	Regangan	Tegangan (N/mm ²)
BU-1	0,000829431	4,85551	0,0015901	5,33699
BU-2	0,00376539	29,9321	0,01863595	30,7865



Gambar 11 Grafik hubungan tegangan dan regangan



Gambar 12 Grafik perbandingan nilai daktilitas benda uji

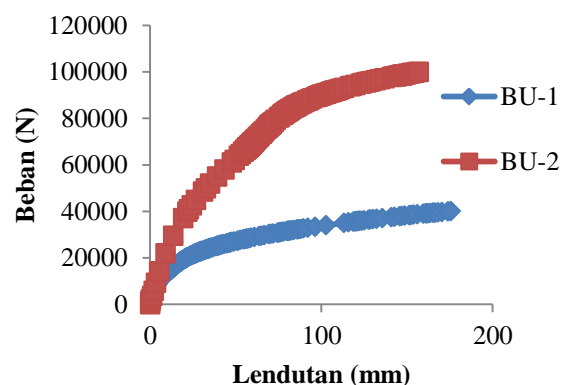
B. Hubungan Beban dan Lendutan

Dari hasil penelitian dapat diketahui nilai perbandingan antara hubungan beban dan lendutan. BU-1 leleh terjadi pada beban 29,2924 kN 63,6618 mm, dan BU-2 leleh pada beban 84,441 kN lendutan sebesar 83,229 mm. Beban maksimum yang diterima BU-1 sebesar 40 kN dengan lendutan sebesar 175,441 mm dan BU-2 beban maksimum yang diterima sebesar 100 kN sebesar 156,771 mm. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan grafik hubungan

beban lendutan dapat dilihat pada Gambar 5.3. Hasil hubungan antara beban dan lendutan dapat diketahui nilai kekakuan dan nilai disipasi energi.

Tabel 8 Parameter hubungan beban dan lendutan

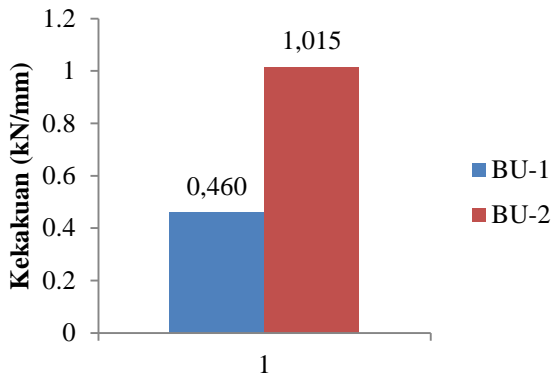
Benda Uji	Yield		Ultimit	
	Beban (N)	Lendutan (mm)	Beban (N)	Lendutan (mm)
BU-1	29292,4	63,6618	40000	175,441
BU-2	84441	83,229	100000	156,771



Gambar 13 Grafik hubungan beban dan lendutan

1. Kekakuan

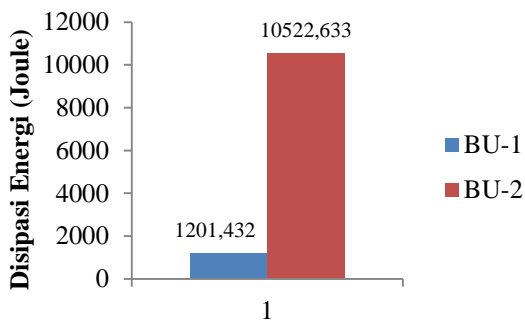
Pada BU-1 pada saat leleh terjadi pada beban 29,2924 kN dengan lendutan 63,6618 mm, sehingga dari parameter tersebut didapatkan hasil kekakuan dari BU-1 sebesar 0,460 kN/mm. Sedangkan pada BU-2 pada saat leleh terjadi pada beban 84,441 kN dengan lendutan sebesar 83,229 mm didapatkan nilai kekakuan sebesar 1,015 kN/mm. Sehingga dari data tersebut BU-2 memiliki kekakuan yang lebih tinggi daripada BU-1. Hal ini membuktikan bahwa BU-1 lebih lentur daripada BU-2. Perbandingan antara BU-2 dan BU-1 dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14 Grafik perbandingan nilai kekakuan benda uji

2. Disipasi Energi

Disipasi energi merupakan kemampuan struktur untuk menyerap energi melalui proses leleh pada daerah sendi plastis. Dari penelitian didapatkan hasil bahwa nilai disipasi BU-1 1201,432 Joule adalah sebesar Nmm, dan BU-2 sebesar 10522,633 Joule. Dari hasil tersebut diketahui bahwa nilai disipasi energi BU-2 lebih besar daripada BU-1, perbedaan yang cukup jauh yang berarti bahwa kemampuan struktur untuk menyerap energi pada BU-2 jauh lebih besar dibandingkan dengan BU-1. Sehingga struktur membutuhkan energi yang banyak untuk menahan beban yang terlalu besar dari BU-2. Perbandingan nilai disipasi energi dapat dilihat pada Gambar 15.

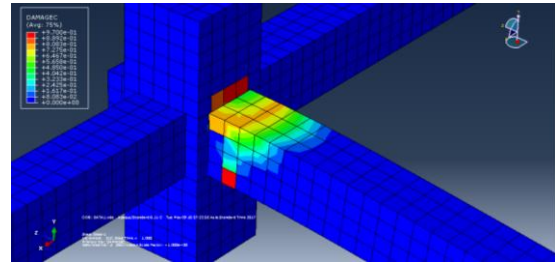


Gambar 15 Grafik perbandingan nilai kekakuan benda uji

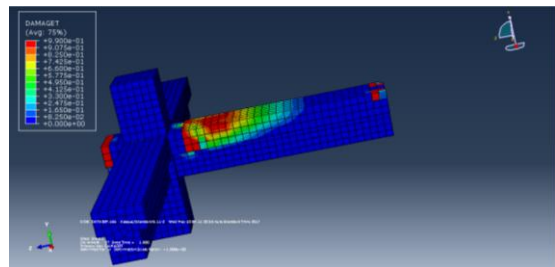
C. Pola Retak

Retak yang terjadi pada kedua benda uji akibat gaya geser, dan bentuk dari retak ini akan membentuk sudut 45° terhadap gaya yang bekerja pada komponen tersebut. Ilustrasi dari

retak dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 16 Pola keretakan Benda Uji 1



Gambar 17 Pola keretakan Benda Uji 2

VI. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pembahasan dan analisis data benda uji 1 dan benda uji 2, dapat disimpulkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. BU-1 mempunyai kapasitas beban lateral maksimum sebesar 40 kN dan BU-2 mempunyai kapasitas beban lateral maksimum sebesar 100 kN. Sehingga dalam aplikasi bisa tidak disarankan untuk digunakan pada gedung yang memiliki gaya geser yang melebihi pengujian ini.
2. Hasil dari penelitian nilai daktilitas untuk BU-1 sebesar 1,917 dan untuk BU-2 sebesar 4,949.
3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekakuan yang dimiliki BU-1 sebesar 0,460 kN/mm dan BU-2 sebesar 1,015 kN/mm. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan dimensi antara BU-1 dan BU-2 yang signifikan.
4. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai disipasi energi BU-1 sebesar 1201,423 Joule, dan BU-2 sebesar 10522,633 Joule. Dari hasil tersebut diketahui bahwa nilai disipasi energi BU-2 jauh lebih besar daripada BU-1, perbedaan yang cukup jauh yang berarti kemampuan struktur untuk menyerap energi pada BU-2 jauh lebih besar dibandingkan dengan BU-1 karena

- beban yang diterima juga jauh lebih besar BU-2 daripada BU-1.
- Retak pertama terjadi pada beban sekitar 19,317 kN pada BU-1 dan 44,89 kN pada BU-2. Keruntuhan terjadi pada beban maksimum sebesar 40 kN pada benda uji 1 dan 100 kN pada benda uji 2. Tipe keretakan yang terjadi pada kedua benda uji akibat gaya geser, dan bentuk dari retak ini akan membentuk sudut 45° terhadap gaya yang bekerja pada komponen tersebut. Sehingga termasuk kedalam tipe retak geser.
 - ABAQUS dengan model konsitusif *concrete damage plasticity* dan *embedded region* dapat digunakan untuk permodelan beton bertulang dan sambungan join.

B. Saran

- Supaya studi numerik metode elemen hingga memberikan hasil yang tepat, setiap model sebaiknya dikalibrasi dengan data eksperimen sehingga bisa memberikan kualitas input yang baik untuk permodelan selanjutnya dan dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen sehingga diketahui berapa persen keakuratan *Software* ABAQUS 6.11-
- Sebaiknya dilakukan penelitian uji material terlebih dahulu sebelum menggunakan data material kedalam ABAQUS CAE, sehingga hasil keluaran dari benda uji lebih akurat dan tidak terjadi kegagalan dalam menganalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS keywords manual, version 6.1*: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2006.
- ABAQUS theory manual, version 6.1*: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2006.
- ABAQUS user's manual, volumes I, II, and III, version 6.1* : Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2006.
- Aziz, A., 2014, *Perilaku Sambungan Balok Kolom Exterior Tipe “ Tanpa dan dengan Bekisting Bataton*, Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta.
- Ertas O. dkk, 2006, *Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames*. PCI Journal:Turkey.

Cahyati, M.D., 2015, *Perilaku Geser pada Balok Castellated Modifikasi Komposit Mortar Profil Double Siku dengan Diagonal Silang Baja Tulangan Akibat Beban Siklik*, Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta.

Kurniawan, S.C.M., 2014, *Analisis Numerik Perilaku Sambungan Balok-Kolom Beton Pracetak Tipe SRPM-PB₂*, Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta.

Nawy, E.G., 1998, *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*, Refika Aditama: Bandung.

None, 2010, *Panduan Pemodelan Struktur BETON Bertulang dengan ABAQUS*.

Schodek, D.L., 1999, *Struktur Edisi Kedua*, Erlangga: Jakarta.

Simanjuntak, J. O., 2016, *Perbandingan Kekuatan Balok Persegi dan Balok T dengan Luas Penampang dan Luas Tulangan yang Sama*. Universitas HKBP Nommensen: Medan.

Tjahjono dan Purnomo, 2004, *Pengaruh Penempatan Penyambungan pada Perilaku Rangkaian Balok-Kolom Beton Pracetak Bagian Sisi Luar*, Universitas Indonesia: Jakarta.