

TESIS

**ANALISA KEKAKUAN SAMBUNGAN TAKIK LURUS RANGKAP *JOINT*
BALOK-KOLOM AKIBAT BEBAN LATERAL SIKLIK**

Disusun dan diajukan oleh

NUR MUTHIA RAZAK

D012181008



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN (TESIS)

**ANALISA KEKAKUAN SAMBUNGAN TAKIK LURUS RANGKAP
JOINT BALOK KOLOM AKIBAT BEBAN LATERAL SIKLIK**

Disusun dan diajukan oleh :

NUR MUTHIA RAZAK
D012181008

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

pada tanggal 24 Februari 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng.
NIP. 19620729 198703 1 001

Pembimbing Pendamping



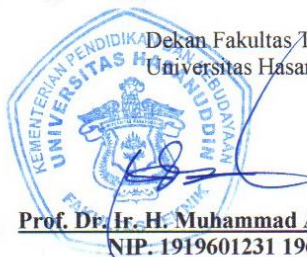
Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST, MT
NIP. 19791226 200501 1 001

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.
NIP. 19720619 200012 2 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T
NIP. 1919601231 196809 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Muthia RazaK
NIM : D012181008
Program Studi : Teknik Sipil / Struktur
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**(ANALISA KEKAKUAN SAMBUNGAN TAKIK LURUS RANGKAP
JOINT BALOK KOLOM AKIBAT BEBAN LATERAL SIKLIK)**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Tesis yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 03 Maret 2021

Yang Menyatakan


(Nur Muthia Razak)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis nilai kekakuan pada sambungan takik lurus rangkap balok kolom eksterior akibat beban siklik lateral dengan membandingkan hasil uji eksperimen dan uji numerik menggunakan Abaqus. Terdapat 2 (dua) benda uji BK monolit dan SBK takik lurus rangkap.

Model sambungan pada balok adalah takik lurus rangkap dan menggunakan metode sambungan mekanik dan grouting. Pembebanan dengan beban lateral bolak balik yang diasumsikan sebagai beban siklik. Pengujian dan analisis menggunakan Metode Displacement Control dengan standar European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) 1986.

Hasil penelitian menunjukkan kestabilan benda uji SBK takik lurus rangkap ditinjau dari karakteristik kurva hysteresis loop memiliki kurva yang hampir sama dengan BK monolit baik pada uji eksperimen maupun uji numerik dengan Abaqus. Dari hasil penelitian juga diketahui bahwa kekakuan pada arah dorong Benda uji monolith memiliki nilai kekakuan yang lebih besar di bandingkan sambungan balok kolom takik lurus dengan penurunan kekakuan yang sama konstan, sedangkan pada arah tarik nilai kekakuan sambungan takik lurus diawal siklus pembebanan lebih rendah jika dibandingkan dengan sambungan monolith tetapi sambungan takik dapat mempertahankan nilai kekakuannya sama dengan sambungan monolith sampai akhir pengujian yaitu 0.1 kN/mm.

Kata Kunci: sambungan balok kolom, siklik, sambungan takik lurus, kekakuan

ABSTRACT

This study aims to determine and analyze the value of the stiffness in the double notch joint of the exterior column beam due to lateral cyclic loads by comparing the results of experimental and numerical tests using Abaqus. There are 2 (two) BK monolithic specimens and SBK Multiple Straight Notches.

The joint model of the beam is a double straight notch and uses the mechanical joint and grouting method. Loading with alternating lateral loads which are assumed to be cyclic loads. Testing and analysis using the Displacement Control Method with the 1986 European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) standards.

The results showed the stability of the SBK test specimen notch straight double in terms of the characteristics of the hysteresis loop curve has a curve that is almost the same as BK monolith in both experimental and numerical tests with Abaqus. From the research results it is also known that the stiffness in the thrust direction of the monolith specimen has a greater stiffness value compared to the straight notch beam joint with the same constant reduction in stiffness, while in the tensile direction the stiffness value of the straight notch joint at the beginning of the loading cycle is lower when compared to monolith joints but notch joints can maintain the same stiffness value as monolith joints until the end of the test, namely 0.1 kN / mm.

Keyword: column beam joints, cyclic, straight notch joints, stiffness

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “**Analisa Kekakuan Sambungan Takik Lurus Rangkap Joint Balok Kolom Akibat Beban Lateral Siklik**”.

Penelitian ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.

Saya menyadari sepenuhnya dalam penulisan penelitian ini tidak akan terlaksana sebagaimana yang diharapkan tanpa adanya bantuan, arahan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini perkenankan penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Pembimbing utama Bapak **Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng** yang telah membimbing penulis dalam penulisan penelitian ini.
2. Pembimbing pendamping Bapak **Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST,MT** yang telah banyak membimbing penulis dalam menyusun Hasil Penelitian ini.
3. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT.** (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin)
4. Ibu **Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.** (Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Gowa).

5. Para Dosen dan Staf Pascasarjana UNHAS dan Staf Prodi S2 Teknik Sipil yang telah membantu dan membimbing penulis selama mengikuti pendidikan pada Program Studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.
6. Ayahanda Abd Razak, Ibunda Hj Halida, Saudara-saudaraku Rasman Razak, Abd Malik Mulki, Wahyu Razak, Herlisa dan Hasnuri yang terus memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi S2 Universitas Hasanuddin khususnya Angkatan 2018 Jurusan Teknik Sipil Konsentrasi Struktur dan semua pihak yang telah membantu.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam hasil penelitian ini, oleh karena itu penulis mengharapkan agar kiranya memberikan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan hasil penelitian ini. Akhir kata, Penulis mengharapkan hasil penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua, bangsa dan negara. Amin.

Makassar, 07 Februari 2021

Penulis



Nur Muthia Razak

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	viii
LEMBAR PENGESAHAN	viii
PERNYATAAN KEASLIAN	viii
ABSTRAK.....	viii
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR NOTASI.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan Penelitian	4
D. Batasan Masalah.....	4
E. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Uji Eksperimental oleh Ruminsar Simbolon yang berjudul Perilaku Sambungan Model Takikan lurus rangkap pada hubungan Balok-Kolom Beton Pracetak, akibat beban lateral siklik	6
B. Material Beton	7
C. Joint Balok Kolom.....	14
D. Sika Grout 215 dan sikadur 732.....	18
E. Model Takikan	20
F. Pembebanan Siklik	21
G. Kekakuan.....	22
H. Metode Elemen Hingga	23
I. Hasil Penelitian Sebelumnya	29

BAB III METODE PENELITIAN.....	33
A. Diagram Alir Penelitian	33
B. Desain Benda Uji	34
C. Analisa dengan Metode Elemen Hingga	37
BAB IV HASIL DAN ANALISA	53
A. Hasil Uji Eksperimental sambungan takik balok kolom	53
B. Hasil Uji Numerik sambungan takik balok kolom.....	58
C. Perbandingan Kekuatan Hasil Uji Eksperimental dengan Hasil Uji Numerik	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	72
A. Kesimpulan.....	33
B. Saran.....	34
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi Data Sika Grout 215 (New)	18
Tabel 2.2	Spesifikasi Data Sikadur 732	20
Tabel 3.1	Material Properties	42
Tabel 4.1	Perbandingan Beban Ultimit Uji Eksperimental dan Uji Numerik.....	67
Tabel 4.2	Perbandingan Kekakuan Hasil Eksperimental dan Uji Numerik Arah Dorong.....	70
Tabel 4.3	Perbandingan Kekakuan Hasil Eksperimental dan Uji Numerik Arah Tarik.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sambungan <i>Precast</i> Jenis 1	13
Gambar 2.2	Sambungan <i>Precast</i> Jenis 2	13
Gambar 2.3	Sambungan <i>Precast</i> Jenis 3	14
Gambar 2.4	Sambungan <i>Precast</i> Jenis 4	14
Gambar 2.5	Gaya Dan Penulangan Geser pada Joint Balok-Kolom	15
Gambar 2.6	Jenis Exterior Joint	16
Gambar 2.7	Jenis Interior Joint	16
Gambar 2.8	Letak Sendi Plastis	17
Gambar 2.9	Histeris Loop	22
Gambar 2.10	C3d8r Element Linier Brick Untuk Kolom	24
Gambar 2.11	T3d2 Trudd Element Untuk Tulangan	24
Gambar 2.12	Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan	27
Gambar 2.13	Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik	28
Gambar 2.14	Model Tegangan Regangan Elastic Perfectly Plastic	29
Gambar 3.1	Skema Penelitian	33
Gambar 3.2	<i>Joint</i> Balok-Kolom Sambungan Monolit	34
Gambar 3.3	Detail Tulangan Pada Sambungan Monolit	34
Gambar 3.4	Ilustrasi Bentuk Tulangan <i>Joint</i> Balok-Kolom Sambungan Monolit	35
Gambar 3.5	<i>Joint</i> Balok-Kolom Sambungan Takik Rangkap	35
Gambar 3.6	Detail Tulangan	36
Gambar 3.7	Ilustrasi Bentuk Tulangan <i>Joint</i> Balok-Kolom SBK	36
Gambar 3.8	Proses <i>Create Part</i>	38
Gambar 3.9	Proses <i>Sketch Part</i>	39
Gambar 3.10	Proses <i>Create Material</i>	41
Gambar 3.11	Proses <i>Create Section</i>	42
Gambar 3.12	Proses <i>Assign Section</i>	43
Gambar 3.13	Proses <i>Assembly (BK Monolit)</i>	43
Gambar 3.14	Proses <i>Assembly (SBK Takik Lurus Rangkap)</i>	44
Gambar 3.15	Proses Pengaturan <i>Step (BK Monolit)</i>	44
Gambar 3.16	Proses Pengaturan <i>Step (SBK Takik Lurus Rangkap)</i>	45
Gambar 3.17	Metode Iterasi (BK Monolit)	45
Gambar 3.18	Metode Iterasi (SBK Takik Lurus Rangkap)	46
Gambar 3.19	Peningkatan Peningkatan Periterasi (BK Monolit)	46
Gambar 3.20	Peningkatan Peningkatan Periterasi (SBK Takik Lurus Rangkap)	47
Gambar 3.21	Proses <i>Interaction (BK Monolit)</i>	48
Gambar 3.22	Proses <i>Interaction (SBK Takik Lurus Rangkap)</i>	48

Gambar 3.23 Proses Load	49
Gambar 3.24 Posisi Beban dan Boundary Condition Pada (BK Monolit)	49
Gambar 3.25 Posisi Beban dan Boundary Condition Pada Sambungan Takik Lurus Rangkap	49
Gambar 3.26 Proses <i>Mesh</i>	51
Gambar 3.27 Proses Running.....	52
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Beban dan Displacement Sambungan Balok Kolom Monolit	53
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Antara Beban dan Displacement Sambungan Balok Kolom Takik Lurus	54
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan SBK Monolit dan SBK Takik Lurus	55
Gambar 4.4 Pola Retak Sambungan Balok-Kolom	56
Gambar 4.5 Perbandingan Kekakuan Arah Dorong Benda Uji Monolit dan SBK Takik Lurus.....	57
Gambar 4.6 Perbandingan Kekakuan Arah Tarik Benda Uji Monolit dan SBK Takik Lurus	58
Gambar 4.7 Hubungan Antara Displacement dan Beban Untuk Sambungan Balok Kolom Monolit Uji Numerik.....	59
Gambar 4.8 Hubungan Antara Displacement dan Beban Untuk Sambungan Takik Lurus Uji Numerik.....	60
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan BK Monolit dan SBK Takik Lurus.....	61
Gambar 4.10 Mode Kegagalan Sambungan Monolit	61
Gambar 4.11 Mode Kegagalan SBK Takik Lurus	62
Gambar 4.12 Perbandingan Kekakuan Arah Dorong Benda Uji Monolit dan Benda Uji SBK Takik Lurus.....	63
Gambar 4.13 Perbandingan Kekakuan Arah Tarik Benda Uji Monolit dan Benda Uji SBK Takik Lurus.....	64
Gambar 4.14 Perbandingan Antara Uji Eksperimental dan Uji Numerik Hubungan Displacement Dan Beban (Monolit).....	65
Gambar 4.15 Perbandingan Antara Uji Eksperimental dan Uji Numerik Hubungan Displacement Dan Beban (Sambungan Takik Lurus).....	65
Gambar 4.16 Perbandingan Pola Retak Eksperimental dan Uji Numerik pada Sambungan Normal	68
Gambar 4.17 Perbandingan antara Uji Eksperimental dan Uji Numerik hubungan displacement dan beban (Sambungan Takik Lurus).....	68
Gambar 4.18 Perbandingan Kekakuan Arah Dorong Uji Eksperimental Dengan Uji Numerik.....	69
Gambar 4.19 Perbandingan Kekakuan Arah Tarik Uji Eksperimental Dengan Uji Numerik	70

DAFTAR NOTASI

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
P	Beban	KN
P_y	Beban Leleh	KN
P_{maks}	Beban Maksimum	KN
A	Luas penampang	cm^2
μ_{oi}	Daktalitas parsial	
μ_i	Daktalitas penuh	
Δe_i	Total simpangan <i>displacement</i>	Mm
E_i	Simpangan	Mm
E_y	Simpangan saat leleh	Mm
Φ_u	Kelengkungan batas	
Φ_y	Kelengkungan leleh	
δ_{maks}	Defleksi maksimum	Mm
δ_y	Defleksi saat leleh	Mm
Ξ	Rasio kekakuan	
V_n	Gaya geser nominal balok	N
V_e	Gaya geser kolom	N
l	Panjang balok	Mm
H	Tinggi kolom	Mm
B	Lebar balok	Mm
EI	Kekakuan	Nmm^2
M_{cr}	Momen retak	Nmm
E_c	Modulus elastisitas beton	MPa
M_u	Momen runtuh	Nmm
M_y	Momen leleh	Nmm
E_s	Modulus elastisitas baja	MPa
D	Beban mati	N

L	Beban hidup	N
f'_c	Kuat tekan beton	MPa
f_y	Kuat Tarik baja	MPa
SRBBPMM	Sistem Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah	
SRBBPMK	Sistem Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Khusus	
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork	
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	
Strain gauge beton	Pengukur regangan beton	
Strain gauge baja	Pengukur regangan baja	
<i>Curing</i>	Perawatan beton 0-28 hari	

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dewasa ini, industri konstruksi sudah sangat berkembang. Tidak hanya fokus pada segi kekuatan dan kestabilan struktur, namun juga sangat memperhatikan segi ekonomis, praktis, dan ketepatan waktu. Pemakaian beton pracetak (pre-cast) dalam perencanaan struktur suatu gedung merupakan salah satu alternatif untuk mencapai hal tersebut, namun belum dapat dipakai secara luas karena kehandalan sambungan antara elemen-elemennya masih merupakan suatu kendala, terutama terhadap beban gempa.

Masalah sambungan merupakan persoalan yang utama yang dihadapi pada perencanaan beton pracetak. Sambungan adalah elemen yang sangat penting dalam desain konstruksi bangunan tahan gempa. Keruntuhan bangunan akibat gempa ditentukan oleh kualitas sambungannya. Agar bangunan memiliki performa yang baik saat menerima beban gempa, maka harus dipenuhi syarat sambungan balok-kolom.

komponen balok-kolom memiliki bagian yang sangat penting dalam mentransfer gaya-gaya antar elemen pracetak yang disambung. Bila tidak direncanakan dengan baik (baik dari segi penempatan sambungan maupun kekakuan dan kekuatannya), maka sambungan pracetak (grouting, sistem pelat dll) dapat mengubah aliran gaya pada struktur pracetak, sehingga dapat mengubah hirarki keruntuhan yang ingin dicapai dan pada akhirnya dapat menyebabkan keruntuhan prematur pada struktur.

Kekakuan merupakan salah satu faktor yang menentukan respons suatu struktur terhadap beban gempa. Jika dihubungkan dengan beban gempa, sebuah struktur harus memiliki kekakuan yang cukup sehingga pergerakannya saat terjadi gempa dapat dibatasi. Semakin kecil simpangan struktur maka bangunan tersebut semakin kaku (Smith dan Coull, 1991).

SNI Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung mengisyaratkan pentingnya kekakuan struktur pada pasal 5.5.1 "Dalam perencanaan struktur gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, pengaruh perletakan beton pada unsur-unsur struktur dari beton bertulang, beton pratekan dan baja komposit harus diperhitungkan terhadap kekakuannya.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan seperti oleh Novalinus Banggabua (2017) dengan sambungan model takik di mana dari hasil penelitiannya ternyata komponen balok-kolom tipe sambungan model takik lebih mampu mempertahankan nilai kekakuannya hingga akhir pengujian, dimana nilai akhir kekakuan komponen balok-kolom tipe sambungan model takik lebih tinggi dibandingkan komponen konvensional, sehingga untuk penelitian berikutnya ingin diteliti lebih lanjut apabila lebih banyak menggunakan variasi permodelan takikan. Maka dari itu, dipilihlah model sambungan takik lurus rangkap.

Untuk mengetahui perilaku sambungan dari tipe tersebut perlu dipelajari lebih lanjut. Cara untuk mempelajarinya dapat dengan uji ekperimental ataupun dengan uji numerik dengan program. Uji eksperimental merupakan pengujian yang dilakukan dengan model fisik yang dibuat di laboratorium sedangkan analisis uji numerik merupakan suatu teknik penyelesaian yang diformulasikan secara matematis. Perkembangan teknologi mendorong kemajuan program. maka dari itu uji numerik dengan program semakin dibutuhkan untuk melakukan kalkulasi

yang tidak dapat diselesaikan dengan tangan. Untuk menganalisis suatu perilaku struktur dapat dilakukan menggunakan program berbasis elemen hingga "*finite element method*".

Menurut Iskandar (2017) analisis numerik yang diperoleh secara umum sudah mendekati hasil eksperimental, walaupun tidak sepenuhnya dapat diverifikasi dengan baik terhadap hasil eksperimental. Dari hasil penelitian Agus Salin (2018) mendapatkan hasil pengujian spesimen yang dilakukan secara eksperimental di laboratorium dibandingkan dengan analisis numerik menggunakan *software* tidak jauh berbeda, meliputi data grafik tegangan-regangan yang didapat dari hasil eksperimental dan analisis numerik.

Berdasarkan latar belakang tersebut maka disusunlah tugas akhir dengan judul: **“Analisa Kekakuan Sambungan Takik Lurus Rangkap *Joint* Balok-Kolom Akibat Beban Siklik Lateral”**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, penulis mencoba merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil analisa kekakuan sambungan takik lurus rangkap *Joint* Balok-Kolom menggunakan analisis numerik?
2. Bagaimana perbandingan hasil uji eksperimental dengan analisis numerik kekakuan sambungan takik lurus rangkap *Joint* Balok-Kolom akibat beban siklik lateral?

C. Tujuan Penelitian

1. menganalisa kekakuan sambungan takik lurus rangkap Joint Balok-Kolom menggunakan analisis numerik
2. Membandingkan hasil uji numerik dengan hasil uji eksperimental analisis numerik kekakuan sambungan takik lurus rangkap *Joint* Balok-Kolom akibat beban siklik lateral.

D. Batasan Masalah

Batasan Masalah

1. Struktur yang ditinjau diberikan beban gempa (siklik) pada puncak kolom
2. Mutu beton rencana dengan kuat tekan target ($f'c$) 25 MPa.
3. Bahan tambahan pada daerah sambungan menggunakan *sika grout 215 (new)* mutu ($f'c$) 50 MPa.

E> Sambungan beton pracetak berada pada wilayah potensi sendi plastis.

F> Jumlah struktur sambungan balok kolom adalah dua buah. Satu untuk sambungan balok kolom monolit dan satu untuk sambungan balok kolom pracetak.

G> Beban yang diberikan adalah beban dinamis berupa beban siklik lateral.

H> Metode Analisa yang digunakan adalah Metode Elemen Hingga menggunakan software.

E. Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini akan diuraikan dalam sistematika penulisan yang dibagi menjadi lima bab pokok bahasan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang permasalahan, perumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan secara singkat.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menyajikan kerangka teori konseptual mengenai penelitian secara singkat dan gambaran umum dari sampel penelitian yang akan diuji.

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang penelitian yang meliputi: tahapan penelitian, penentuan dimensi dan bahan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, pengujian yang dilakukan, pengumpulan data, serta variabel penelitian.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang dilaksanakan.

BAB V PENUTUP

Kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Uji Eksperimental oleh Ruminsar Simbolon yang berjudul Perilaku Sambungan Model Takikan lurus rangkap pada hubungan Balok-Kolom Beton Pracetak, akibat beban lateral siklik

1. Pendahuluan dari Uji eksperimental

Indonesia yang karena letak dan kondisi geografisnya sering mengalami gempa dengan kekuatan besar, penggunaan konstruksi beton pracetak cukup beresiko, terutama pada daerah sambungannya, sehingga masalah sambungan merupakan persoalan yang utama yang dihadapi pada perencanaan beton pracetak. Sambungan selain berfungsi untuk menyalurkan gaya-gaya yang bekerja, juga harus berfungsi menyatukan masing-masing komponen beton pracetak menjadi satu kesatuan yang monolit, sehingga stabilitas struktur bangunannya terjaga.

Seperti diketahui, sambungan merupakan bagian struktur pracetak yang paling penting dalam mentransfer gaya antara komponen-komponen pracetak yang disambung. Jika tidak direncanakan dengan baik (baik dari segi penempatan maupun kekuatannya) maka kehadirannya dapat merubah aliran gaya pada struktur pracetak, sehingga dapat mengganggu hirarki keruntuhan yang ingin dicapai dan pada akhirnya dapat menyebabkan keruntuhan prematur pada struktur (Pantazopoulou dan Imran, 1992). Sistem sambungan pracetak yang dikembangkan pada studi ini adalah sambungan dengan "**sistem takikan lurus rangkap**". Hubungan antar kolom dan balok melalui tulangan penghubung jenis sambungan lewatan dan tulangan yang dimasukkan dalam lubang yang telah disediakan dan kemudian diisi dengan bahan grouting dari jenis tidak menyusut. Sambungan diletakkan di daerah sendi plastic dan diharapkan dapat berperilaku

sebagai sambungan daktail. Sistem sambungan yang digunakan adalah sambungan basah dengan bahan semen grouting yang bersifat ekspansif.

2. Pembatasan Masalah

Pengujian sambungan dilakukan dengan membuat dua model. Model yang pertama untuk sambungan monolit dan kedua untuk sambungan pracetak pemodelan benda uji dibuat mengikuti aturan pada SNI 1726-2012, Tata cara perencanaan Ketahanan untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, serta SNI 2847-2013 tentang Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, khususnya Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus.

B. Material Beton

1. Umum

Beton adalah campuran antara semen Portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat. (SNI 03-2847–2013, Pasal 3.12)

2. Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang di syaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya (SNI 03-2847–2013, Pasal 3.13)

Jenis-jenis keruntuhan lentur tergantung pada sifat-sifat penampang balok, bentuk-bentuk keruntuhan yang dapat terjadi adalah sebagai berikut (Imran & Zulkifli, 2014):

1. Keruntuhan Tarik, bersifat *Ductile* (penampang terkontrol tarik)

Pada keruntuhan jenis ini, tulangan leleh sebelum beton hancur (yaitu mencapai regangan batas tekannya). Keruntuhan jenis ini terjadi pada penampang dengan rasio tulangan kecil. Balok yang mengalami keruntuhan ini disebut *under-reinforced*.

2. Keruntuhan Tekan, bersifat *Brittle* atau Getas (penampang terkontrol tekan)
Di sini, beton hancur sebelum tulangan leleh. Keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang dengan rasio tulangan kecil. Balok yang mengalami keruntuhan ini disebut *over-reinforced*.

3. Keruntuhan Seimbang, bersifat *Brittle*

Pada keruntuhan jenis ini, beton hancur dan tulangan leleh terjadi secara bersamaan. Balok seperti ini mempunyai tulangan yang *balanced*.

3. Beton Pracetak

Beton pracetak adalah teknologi konstruksi struktur beton dengan komponen-komponen penyusun yang dicetak terlebih dahulu pada suatu tempat khusus (*off site fabrication*), terkadang komponen-komponen tersebut disusun dan disatukan terlebih dahulu (*pre-assembly*), dan selanjutnya dipasang di lokasi (*installation*), dengan demikian sistem pracetak ini akan berbeda dengan konstruksi monolit terutama pada aspek perencanaan yang tergantung atau ditentukan oleh metoda pelaksanaan dari pabrikasi, penyatuan dan pemasangannya, serta ditentukan pula oleh teknis perilaku sistem pracetak dalam hal cara penyambungan antar komponen join. (M. Abduh, 2007).

Sistem struktur beton pracetak merupakan salah satu alternatif teknologi dalam perkembangan konstruksi di Indonesia yang mendukung efisiensi waktu,

efisiensi energi, dan mendukung pelestarian lingkungan (Siti AisyahNurjannah, 2011).

1. Keuntungan dan Kerugian Beton Precast

Hendrawan Wahyudi dan Hery Dwi Hanggoro (2010) menjelaskan bahwa struktur elemen pracetak memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan struktur konvensional, antara lain :

- a. Penyederhanaan pelaksanaan konstruksi.
- b. Waktu pelaksanaan yang cepat.
- c. Waktu pelaksanaan struktur merupakan pertimbangan utama dalam pembangunan suatu proyek karena sangat erat kaitannya dengan biaya proyek. Struktur elemen pracetak dapat dilaksanakan di pabrik bersamaan dengan pelaksanaan pondasi di lapangan.
- d. Penggunaan material yang optimum serta mutu bahan yang baik.
- e. Salah satu alasan mengapa struktur elemen pracetak sangat ekonomis dibandingkan dengan struktur yang dilaksanakan di tempat (cast in-situ) adalah penggunaan cetakan beton yang tidak banyak variasi dan biasa digunakan berulang-ulang, mutu material yang dihasilkan pada umumnya sangat baik karena dilaksanakan dengan standar-standar yang baku, pengawasan dengan sistem komputer yang teliti dan ketat.
- f. Penyelesaian finishing mudah.
- g. Variasi untuk permukaan finishing pada struktur elemen pracetak dapat dengan mudah dilaksanakan bersamaan dengan pembuatan elemen tersebut di pabrik, seperti: warna dan model permukaan yang dapat dibentuk sesuai dengan rancangan.

- h. Tidak dibutuhkan lahan proyek yang luas, mengurangi kebisingan, lebih bersih dan ramah lingkungan.
- i. Dengan sistem elemen pracetak, selain cepat dalam segi pelaksanaan, juga tidak membutuhkan lahan proyek yang terlalu luas serta lahan proyek lebih bersih karena pelaksanaan elemen pracetaknya dapat dilakukan dipabrik.
- j. Perencanaan berikut pengujian di pabrik.
- k. Elemen pracetak yang dihasilkan selalu melalui pengujian laboratorium di pabrik untuk mendapatkan struktur yang memenuhi persyaratan, baik dari segi kekuatan maupun dari segi efisiensi.
- l. Sertifikasi untuk mendapatkan pengakuan Internasional. Apabila hasil produksi dari elemen pracetak memenuhi standarisasi yang telah ditetapkan, maka dapat diajukan untuk mendapatkan sertifikasi ISO yang diakui secara internasional.
- m. Secara garis besar mengurangi biaya karena pengurangan pemakaian alat-alat penunjang, seperti : scaffolding dan lain-lain.
- n. Kebutuhan jumlah tenaga kerja dapat disesuaikan dengan kebutuhan produksi.

Namun demikian, selain memiliki keuntungan, struktur elemen pracetak juga memiliki beberapa keterbatasan, antara lain :

- a. Tidak ekonomis bagi produksi tipe elemen yang jumlahnya sedikit.
- b. Perlu ketelitian yang tinggi agar tidak terjadi deviasi yang besar antara elemen yang satu dengan elemen yang lain, sehingga tidak menyulitkan dalam pemasangan di lapangan.

- c. Panjang dan bentuk elemen pracetak yang terbatas, sesuai dengan kapasitas alat angkat dan alat angkut.
- d. Jarak maksimum transportasi yang ekonomis dengan menggunakan truk adalah antara 150 sampai 350 km, tetapi ini juga tergantung dari tipe produknya. Sedangkan untuk angkutan laut, jarak maksimum transportasi dapat sampai di atas 1000 km.
- e. Hanya dapat dilaksanakan didaerah yang sudah tersedia peralatan untuk handling dan erection.
- f. Di Indonesia yang kondisi alamnya sering timbul gempa dengan kekuatan besar, konstruksi beton pracetak cukup berbahaya terutama pada daerah sambungannya, sehingga masalah sambungan merupakan persoalan yang utama yang dihadapi pada perencanaan beton pracetak.
- g. Diperlukan ruang yang cukup untuk pekerja dalam mengerjakan sambungan pada beton pracetak.
- h. Memerlukan lahan yang besar untuk pabrikasi dan penimbunan (stock yard).

Struktur beton bertulang yang dicor di tempat cenderung bersifat monolit dan menerus. Sebaliknya, struktur pracetak terdiri dari sejumlah komponen yang dibuat di pabrik, kemudian disambung di lokasi bangunan sampai akhirnya membentuk struktur utuh. Pada struktur pracetak, hubungan yang menghasilkan kontinuitas dengan memakai bantuan perangkat keras khusus, batang tulangan dan beton untuk menyalurkan semua tegangan tarik, tekan, dan geser disebut sambungan keras (Winter dan Wilson, 1993, h.519)

Menurut NEHRP (dalam Hawkins, 2000), sistem sambungan pracetak dibagi menjadi dua kategori yaitu sambungan kuat dan sambungan

- 1 Sambungan Kuat (*Strong Connection*)

Sambungan antar elemen pracetak tetap berperilaku elastik pada saat gempa kuat. Sistem sambungan harus dan terbukti secara teoritis dan eksperimental memiliki kekuatan dan kekakuan yang minimal sama dengan yang dimiliki struktur sambungan beton monolit yang setara.

- 2 Sambungan Duktail (*Ductile Connection*)

Sambungan boleh terjadi deformasi inelastis. Sistem sambungan harus terbukti secara teoritis dan eksperimental memenuhi persyaratan kehandalan dan kekakuan struktur tahan gempa.

Terdapat juga jenis sambungan antara komponen beton pracetak yang biasa dipergunakan dibagi menjadi 2 kelompok sebagai berikut (Wahyudi et al., 2010):

1. Sambungan kering (*dry connection*)

Sambungan antar komponen beton pracetak menggunakan plat besi sebagai penghubung, yang kemudian dilas atau dibaut.

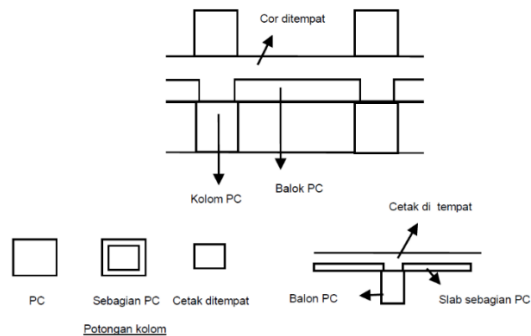
2. Sambungan basah (*wet connection*)

Sambungan antar komponen beton pracetak yang ditandai dengan keluarnya besi tulangan dari beton pracetak yang akan disambungkan dengan cara dicor di tempat.

Jenis sambungan *precast* rangka dapat dibagi menjadi 4 (empat) jenis (Shiddiq, 2005), yaitu:

1. Sambungan *Precast* Jenis 1

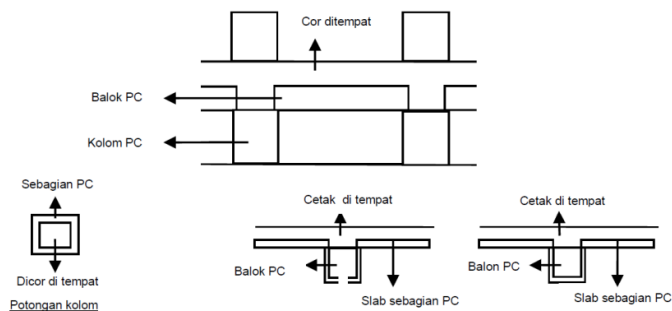
Elemen kolom berupa *precast* penuh atau *precast* sebagian yang dirangkai menjadi konstruksi setengah jadi. Lalu elemen tersebut disatukan dengan cast insitu slab seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Sambungan *Precast* Jenis 1

2. Sambungan *Precast* Jenis 2

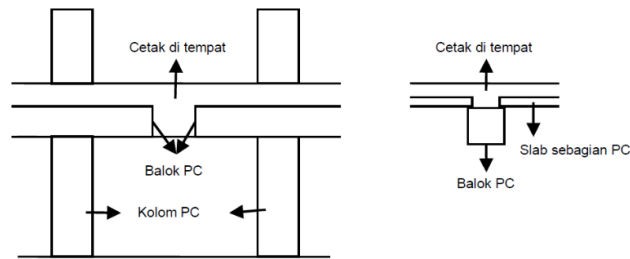
Elemen Kolom adalah *precast* sebagian, terdiri dari bagian *outer shell precast* yang rongganya diisi beton insitu sehingga menjadi kolom penuh. Balok-balok *precast* sebagian selesai bentuk U atau bentuk L, disatukan dengan elemen kolom dan dengan cara pengecoran pada rongga antara balok, slab serta *joint* balok-kolom seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sambungan *Precast* Jenis 2

3. Sambungan *Precast* Jenis 3

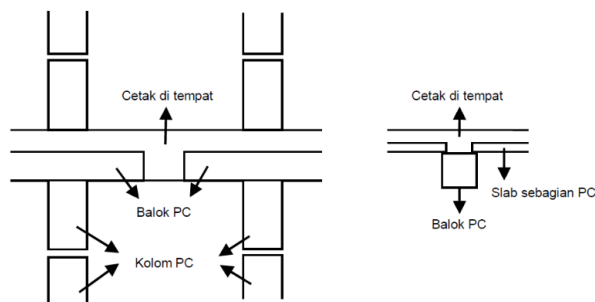
Kolom, balok sebagian bentang dan *joint* balok-kolom dalam bentuk *precast* penuh. Balok dan *joint* balok-kolom disatukan dengan elemen kolom dengan cara menembuskan tulangan utama kolom ke dalam *joint* kemudian dicor (*cast insitu*) di tempat bersama dengan sambungan cor antara bagian kolom dan bagian slab seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sambungan *Precast* Jenis 3

4. Sambungan *Precast* Jenis 4

Semua elemen balok precast sebagian pada bentang kiri, balok *precast* sebagian pada bentang kanan, kolom *precast* sebagian pada bagian atas dan kolom *precast* sebagian pada bagian bawah disatukan dalam satu *joint*. Balok kiri dan balok kanan dihubungkan dengan sambungan balok di tengah bentang, begitu juga kolom atas dan kolom bawah dihubungkan dengan sambungan kolom di tengah bentang lalu dicor dan grouting seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sambungan *Precast* Jenis 4

C. *Joint* Balok-Kolom

1. Konsep *Joint* Balok-Kolom

Menurut Paulay dan Priestley (1992), menjelaskan bahwa *joint* balok-kolom merupakan daerah kritis yang dapat merespon inelastis untuk menahan gempa.

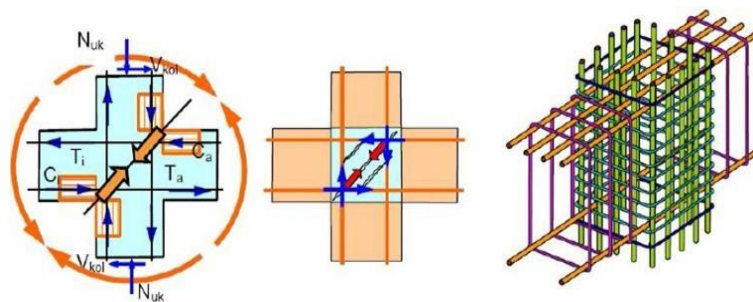
Joint akan bekerja sebagai gaya geser horizontal dan vertikal serta memiliki nilai beberapa kali balok dan kolom yang bersebelahan.

Adapun *joint* dapat dibedakan menurut tempat deformasi sebagai *joint* elastik dan *joint* inelastik. Pengertian *joint* elastik dan *joint* inelastik yaitu:

1. *Joint Elastic* dimana deformasi inelastis tidak terjadi pada balok dan kolom yang berbatasan dengan panel *joint* karena memiliki tulangan yang kuat.
2. *Joint Inelastic* dimana sendi plastis terjadi pada balok di muka kolom setelah beberapa kali siklus deformasi inelastik terjadi pada panel *joint*.

Menurut Widodo (2007), pada *joint* balok-kolom dalam struktur statis tak tentu memegang peranan penting dalam pengengkangan sehingga tidak terjadi kebebasan rotasi pada balok. Pengengkangan terjadi apabila *joint* balok-kolom merupakan satu kesatuan yang monolit dan kaku. Kekakuan *joint* diperlukan agar redistribusi *unbalance moment* pada analisis struktur dapat dilakukan.

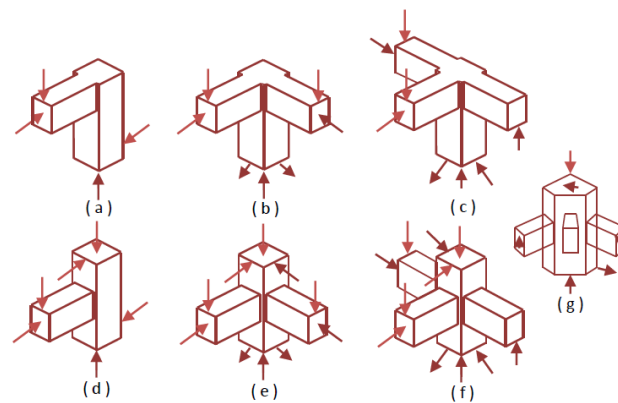
Daerah sambungan balok-kolom pada struktur gedung dari beton bertulang berfungsi untuk mentransfer gaya-gaya dari suatu elemen ke elemen lainnya seperti pada Gambar 2.5. Akibat pengaruh gaya lateral seperti gempa, sambungan balok-kolom akan mengalami gaya geser dan gaya horizontal yang lebih besar dari pada elemen balok dan kolom yang berdekatan. (Barsom, 1999)



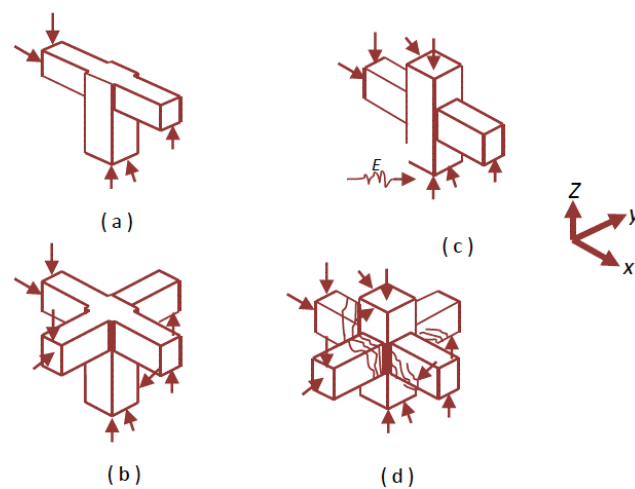
(a) Arah gaya-gaya pada *joint* (b) Crack *joint* (c) Tulangan geser *joint*

Gambar 2.5 Gaya dan Penulangan Geser pada Joint Balok-Kolom

Joint adalah pertemuan kolom dengan balok pada satu titik. Daerah *joint* merupakan bagian struktur bangunan yang paling rawan terhadap gempa. Jenis *joint* balok-kolom dalam suatu struktur dapat dibedakan dari letak titik kumpulnya yaitu *joint* luar (*Exterior Joint*) dan *joint* dalam (*Interior Joint*) yang diilustrasikan pada gambar 2.6 dan gambar 2.7



Gambar 2.6 Jenis *Exterior Joint*



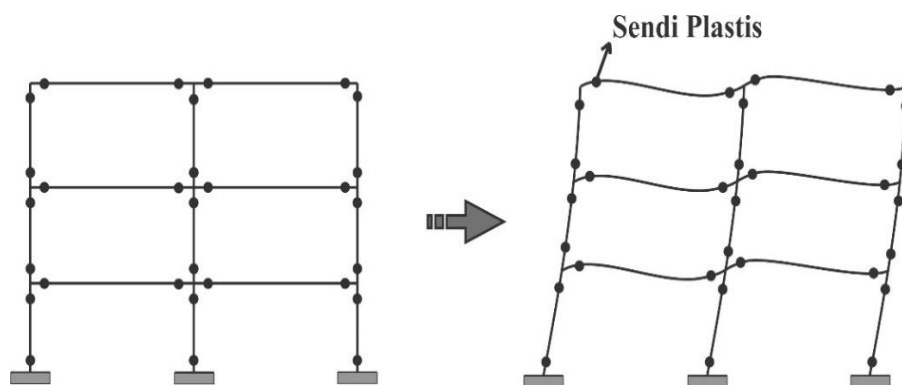
Gambar 2.7 Jenis *Interior Joint*

2. Permasalahan pada Sambungan Balok-Kolom

Daerah hubungan balok-kolom merupakan daerah kritis pada suatu struktur rangka beton bertulang, yang harus didesain secara khusus untuk berdeformasi inelastik pada saat terjadi gempa kuat. Sebagai akibat yang timbul dari momen

kolom di atas dan bawahnya, serta momen-momen dari balok pada saat memikul beban gempa, daerah hubungan balok-kolom akan mengalami gaya geser horizontal dan vertikal yang besar. Gaya geser yang timbul ini besarnya akan menjadi beberapa kali lipat lebih tinggi daripada gaya geser yang timbul pada balok dan kolom yang terhubung. Akibatnya apabila daerah hubungan balok-kolom tidak didesain dengan benar, akan menimbulkan keruntuhan geser yang bersifat getas dan membahayakan pengguna bangunan. (Setiawan, 2012)

Mekanisme kerusakan sebuah struktur harus didesain pada lokasi-lokasi tertentu sehingga setelah gempa kuat terjadi, dapat dengan mudah diperbaiki. Lokasi keruntuhan harus didesain pada balok dan kolom yang disebut sendi plastis. Sendi plastis atau *hinge* merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur (balok dan kolom) menahan gaya dalam. Konsep perencanaan struktur harus sesuai dengan *strong column-weak beam*. Apabila terjadi keruntuhan struktur maka baloklah yang harus runtuh dahulu, namun apabila kolomnya yang runtuh dahulu maka struktur langsung hancur. Letak sendi plastis terletak dimuka kolom dan tepi muka balok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Reza, et.al, 2016)



Gambar 2.8 Letak Sendi Plastis

D. Sika Grout 215 dan Sikadur 732

1. Sika Grout 215

Sika Grout-215 digunakan sebagai bahan grouting untuk koneksi yang dibuat di pabrik. Berdasarkan pada spesifikasi oleh produsen, maka pencampuran proporsi per 25 kg grout memerlukan empat liter air bersih untuk mencapai konsistensi pourable grout basah. Grout telah diisi menjadi sleeves yang dibuat di pabrik dan digunakan antara balok dan kolom untuk membentuk sambungan.

Berikut adalah data spesifikasi dari semen tersebut :

Tabel 2.1 Spesifikasi Data Sika Grout 215 (*new*)

PRODUCT INFORMATION				
Packaging	25 kg			
Appearance / Color	Powder / Grey			
Shelf Life	9 months from the date production if stored in undamaged and unopened original sealed bags			
Storage Condition	Stored in dry condition between 10°C – 30°C			
Density	~ 2.26 kg/L			
TECHNICAL INFORMATION				
Compressive Strength	1 day	~ 25.0 N/mm ²	(ASTM C-109)	
	3 days	~ 40.0 N/mm ²		
	7 days	~ 52.0 N/mm ²		
	28 days	~ 65.0 N/mm ²		
Tensile Strength In Flexure	28 days	> 6.0 N/mm ²	(ASTM C-348)	
Tensile Strength Adhesion	28 days	> 1.5 N/mm ²		
	28 days	Concrete failure, over roughened concrete surface > 2.5 N/mm ² Over mechanically roughened old grout surface		
Expansion	1 – 3 h (at 27°C)	0.30 – 1.40 %	(ASTM C-940)	

APPLICATION INFORMATION			
Mixing Ratio	4.0 L per 25 kg bag (water per powder =16% by weight)		
Consumption	~ 1.940 kg/m ³ of mortar		
Yield	~ 12.80 L of 25 kg bag		
Layer Thickness	Recommended thickness is 20 – 100 mm		
Flowability	Flow cone (mm)	240 – 280 mm	(ASTM C230/230M)
Product Temperature	< 30 °C		
Ambient Temperature	Air	10 °C – 35 °C	
Substrate Temperature	10 °C – 35 °C		
Pot Life	25 min		
Setting Time	4 – 8 h		

Sumber: Product Data Sheet Sika Grout 215 (new), PT. Sika Indonesia

2. Sikadur 732

Sikadur 732 digunakan sebagai bahan perekat antar Sika Grout dan beton karena sifatnya yang dapat merekat dengan sangat baik pada permukaan beton atau mortar baru maupun beton atau mortar lama. Berdasarkan pada spesifikasi oleh produsen, sebelum dicor permukaan beton harus bersih dan tidak berair. Proses penyiapannya yaitu campurkan komponen A dan komponen B dengan perbandingan 2:1, lalu aduk rata selama 3 menit dengan kecepatan rendah hingga warnanya merata. Aplikasikan pada permukaan beton yang akan digrouting dan lakukan grouting selagi Sikadur 732 masih dapat merekat. Berikut adalah spesifikasi data dari sikadur dapat dilihat pada Tabel 2.2:

Tabel 2.2 Spesifikasi Data Sikadur 732

PRODUCT INFORMATION			
Packaging	5 kg set		
Color	Concrete grey		
Shelf Life	24 months from date of production		
Storage Condition	Store in original, unopened, sealed and undamaged packaging in dry conditions at temperatures between 15°C and 30°C. Protect from direct sunlight.		
Density	~ 1.45 kg/L		
TECHNICAL INFORMATION			
Compressive Strength	7 days	~ 60.0 N/mm ²	(ASTM D-695)
	28 days	~ 63.0 N/mm ²	
Tensile Strength In Flexure	28 days	~ 39 N/mm ²	(ASTM D-790)
Tensile Strength Adhesion	28 days	> 3 N/mm ² Concrete failure, over mechanically prepared concrete surface grade K400)	
	28 days	> 12 N/mm ² (Steel surface blast cleaning to SA 2 ½)	
Coefficient of Thermal Expansion	-20 °C to 40 °C	50 x 10 ⁻⁶ per °C	
APPLICATION INFORMATION			
Mixing Ratio	Comp. A : B = 2 : 1 by weight/volume		
Consumption	0.3 - 0.8 kg/m ² , depending on substrate condition		
Pot Life	35 min (at 30 °C)		
Sumber	: <i>Product Data Sheet</i> Sikadur 732, PT. Sika Indonesia		

E. Model Takikan

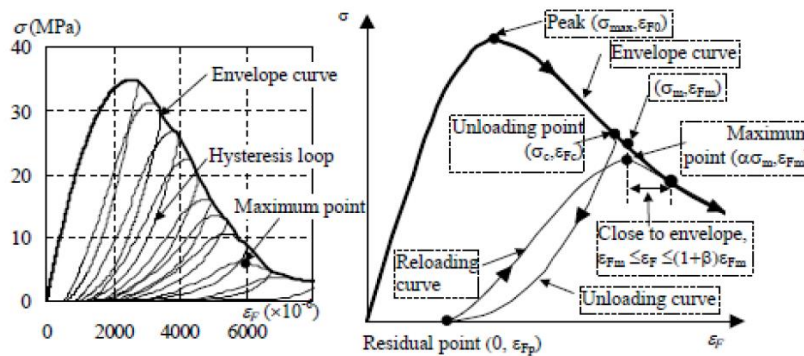
Varian takikan balok yang menggunakan grouting mempengaruhi kapasitas beban lentur balok. Hal ini memperlihatkan bahwa perkuatan pada balok takik kombinasi meningkatkan kekuatan balok dan menyebabkan lendutan yang besar. Hal ini menunjukkan bahwa balok yang menggunakan sambungan takik memiliki

kekuatan lebih besar dibandingkan dengan beton normal karena adanya grouting yang memperkuat beton di daerah sambungan. Dan pola retak yang terjadi di daerah sambungan adalah retak lentur (*flexural crack*). Penelitian berikutnya akan fokus pada kekuatan plat di daerah sambungan. (Suyuthi, 2016)

F. Pembebanan Siklik

Beban siklis merupakan beban berulang yang diterima oleh suatu struktur. Kegagalan struktur juga bisa disebabkan oleh beban siklis yang terjadi, meskipun desain awal struktur memiliki kekuatan yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Kegagalan akibat kelelahan struktur (*fatigue*) yang merupakan fenomena dimana beton pecah ketika mengalami beban berulang pada tegangan lebih kecil daripada kekuatan tekan maksimum dan kekuatan *fatigue* yang didefinisikan sebagai kekuatan yang dapat didukung untuk sejumlah siklus tertentu. *Fatigue* dipengaruhi oleh berbagai pembebanan, tingkat pembebanan, *load history* dan sifat material [Al-Sulayfani, 2008].

Pada struktur kolom, beban aksial merupakan representatif dari berat sendiri dan beban siklis merupakan beban luar yang terjadi berulang misalkan beban gempa. Beban aksial dan siklis ini akan bekerja secara bersamaan pada struktur kolom. Untuk memprediksi perilaku struktur beton di bawah pembebanan seismik, model tegangan-regangan beton di bawah beban siklik (*loop histeresis*) adalah hal yang penting untuk diamati [Watanabe] dan digambarkan seperti gambar 2.9

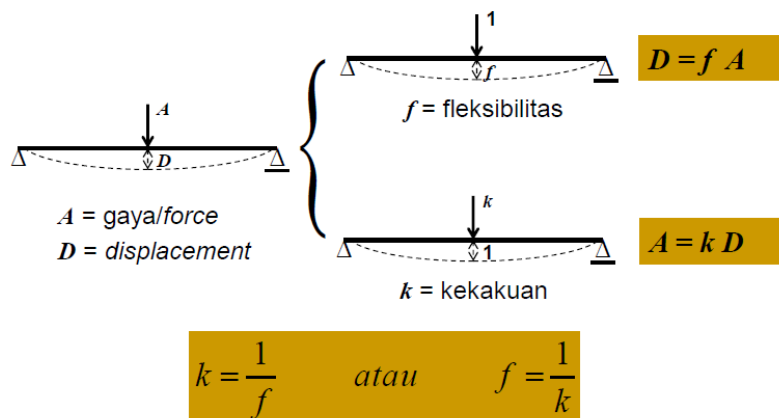


Gambar 2.9 Histeris Loop

G. Kekakuan

Kekakuan untuk struktur merupakan suatu yang penting. Pembatasan kekakuan berguna untuk menjaga konstruksi agar tidak melendut lebih dari lendutan yang disyaratkan. Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit displacement. Nilai kekakuan merupakan sudut kemiringan dari hubungan antara beban dan lendutan. Makin kaku suatu struktur makin besar nilai kekakuannya.

Kekakuan (Stiffness) adalah gaya (*force*) yang diperlukan untuk menghasilkan “*unit displacement*”. Sedangkan, Fleksibilitas (*Flexibility*) adalah perpindahan (*displacement*) yang dihasilkan oleh “*unit force*”. Konsep Kekakuan dan fleksibilitas dapat dilihat pada Gambar dibawah



Kekakuan (*stiffness*) merupakan adalah ukuran tegangan yang dibutuhkan untuk mengubah satuan bentuk suatu bahan. Besaran kekakuan suatu bahan adalah modulus elastisitasnya, yang didapat dengan membagi tegangan satuan yang diterima bahan dengan perubahan satuan bentuk bahan tersebut. Sehingga didapat rumus:

$$K = P / \delta$$

dimana :

K : Kekakuan

P : Beban

δ : Lendutan

Menurut SNI 03-2847-2013, momen inersia untuk perencanaan balok beton menggunakan inersia efektif (I_e), dimana nilainya diantara I_g dan I_{cr} .

H. Metode Elemen Hingga

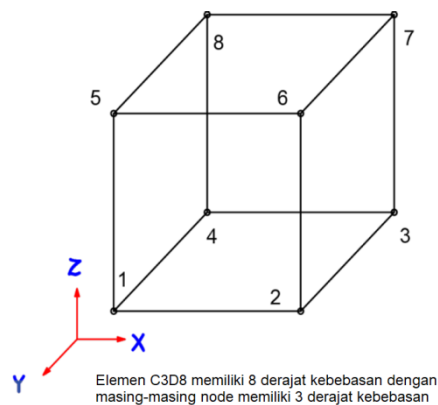
Metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM) merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah struktural, termal dan elektromagnetik. Dalam metode ini seluruh masalah yang kompleks seperti variasi bentuk, kondisi batas dan beban diselesaikan dengan metode pendekatan. Karena keanekaragaman dan fleksibilitas sebagai perangkat analisis, metode ini mendapat perhatian dalam dunia teknik.

Prinsip dasar dari metoda elemen hingga adalah membagi struktur atau kontinum menjadi elemen hingga 'meshing'. Setiap elemen hingga harus diformulasikan mempunyai material dan bentuk tertentu. Kemudian, disusunlah matriks kekakuan dari kontinum terbagi tersebut. Setelah itu, diberikan kondisi

batas esensial dan kondisi batas non-esensial (pembebanan). Setelah itu dihitung regangan elemen dari setiap derajat kebebasan elemen.

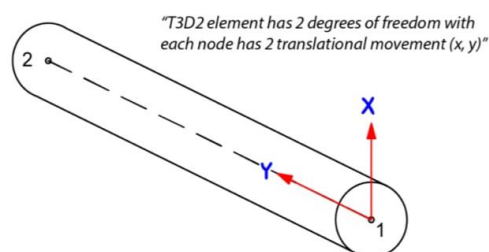
1. Model Elemen

Elemen model yang digunakan pada beton adalah *solid* kontinu C3D8R. Elemen ini terdiri dari tiga derajat kebebasan di setiap node dalam bentuk gerakan translasi U1, U2, dan U3.



Gambar 2.10 C3D8R element linear brick untuk beton

C3D8R juga dikenal sebagai elemen isoperimetri yang umumnya lebih disukai untuk digunakan dalam kasus pemodelan karena menawarkan konvergensi yang lebih cepat selama proses iterasi.



Gambar 2.11 T3D2 truss element untuk Tulangan

Elemen truss 2 node dengan Wire 3D digunakan untuk menentukan elemen baja tulangan dimana elemen ini dihomogenkan dengan beton. Pada

T3D2, dua-simpul menggambarkan dua derajat kebebasan terdiri dari kompresi dan ketegangan yang lentur saat itu karenanya diabaikan. Jenis pemodelan yang digunakan adalah embedded yang meninjau tulangan sebagai elemen batang aksial yang ditempatkan di dalam elemen isoparametrik beton, sehingga menghilangkan derajat kebebasan transisi dan slip simpul ketika baja penguat telah bergabung dengan node beton

2. Material Properties

Dalam beton konvensional, *concrete damage plasticity* (CDP) dipilih karena karakteristiknya untuk menunjukkan degradasi kekuatan dan kekakuan material di tingkat kerusakan beton. Model CDP adalah kontinum, berbasis plastisitas, model kerusakan yang dianggap bahwa mekanisme kegagalan utama terdiri dari retak tarik dan menghancurkan tekan (Tambusay, Suprobo, & Amiruddin, 2017). Secara umum, konsep utama mekanika kontinum digunakan untuk mensimulasikan kompleks perilaku nonlinear dari bahan semu-rapuh (mis. beton). Selain itu, konsep mekanika kontinum diproyeksikan untuk memberikan prediksi yang lebih baik di Indonesia terkait dengan respons struktural untuk semua jenis dan tingkat pembebanan. Berkenaan dengan kecukupan mengadopsi konsep kontinum mekanik, CDP juga telah dinilai sebagai salah satu model terbaik untuk mewakili perilaku kompleks beton dengan menerapkan elastisitas rusak isotropik pada kombinasi dengan isotropik tekan dan plastisitas tarik untuk menghitung perilaku *inelastis*.

Seperti yang dinyatakan dalam buku manual ABAQUS, keuntungan menggunakan model CDP adalah terdaftar sebagai berikut:

- a. Ini memberikan kemampuan umum untuk pemodelan beton dan bahan-bahan dalam semua jenis struktur (balok, rangka, kerang, padatan, dan sebagainya).
- b. Ini menggunakan konsep kerusakan isotropik elastis dalam kombinasi dengan isotropik plastisitas tarik dan tekan untuk mewakili perilaku inelastis beton.
- c. Ini dapat digunakan untuk beton biasa terutama untuk analisis struktur beton bertulang.
- d. Dapat digunakan dengan *rebar* untuk memodelkan tulangan beton.

Pada ABAQUS, parameter kerusakan plastis beton telah dikembangkan dalam sejumlah pendekatan

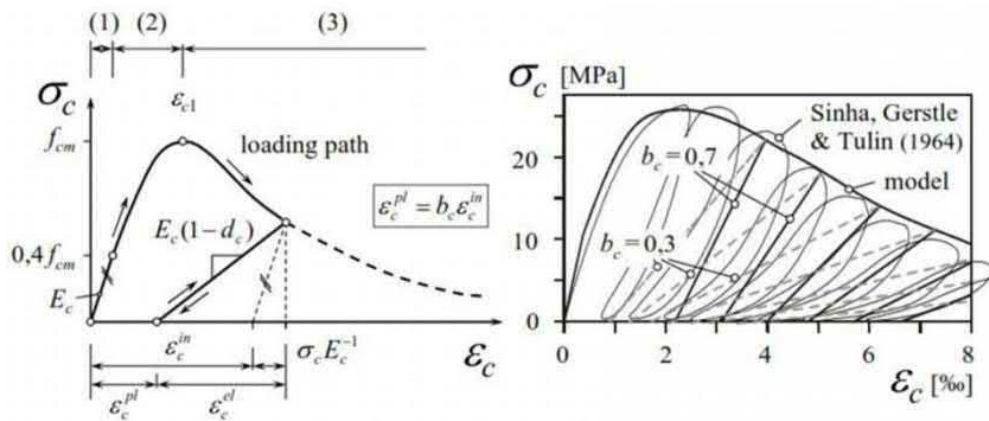
3. Material Model

a. Material Model Beton

Untuk Material model Concrete damage plasticity dipilih karena pada dasarnya Concrete damage plasticity memiliki kapasitas/kemampuan umum untuk analisis struktur beton di bawah pembebanan siklik dan/atau dinamis. Model ini juga cocok untuk analisis material lainnya, seperti batuan, mortar, dan keramik; tetapi perilaku beton yang digunakan dibagian ini untuk memotivasi berbagai aspek teori konstitutif. Di bawah pembatasan tekanan yang rendah, beton berperilaku rapuh; mekanisme kegagalan utama adalah retak saat ditarik dan hancur saat ditekan. Sifat rapuh beton menghilang ketika pembatas tekanan cukup besar untuk mencegah perambatan retak. Dalam keadaan ini, kegagalan didorong oleh konsolidasi dan runtuhnya mikrostruktur mikro beton.

Concrete damage plasticity yang merupakan model material yang disediakan Abaqus membutuhkan beberapa fungsi material yang menunjukkan evolusi atau pembentukan kerusakan yaitu kerusakan saat mengalami tekan (d_c) dan tarik (d_t).

Pembentukan kerusakan akibat tekan (d_c) tergantung dengan regangan plastis yang terjadi, yang mana menunjukkan hubungan yang proporsional dengan regangan inelastiknya dengan faktor konstan b_c , dengan $0 < b_c < 1$. Nilai $c = 0,7$ sesuai dengan data eksperimen pengujian pada Gambar 2.7, parameter kerusakan tekan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).



Gambar 2.12 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan

Sumber: Sinha, 1964

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan : d_c = compression damage parameter,

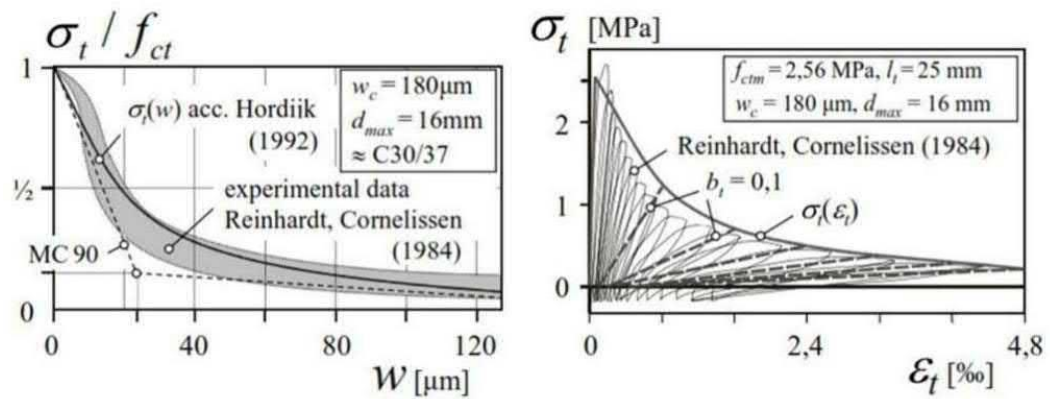
σ_c = tegangan tekan beton (MPa),

E_c = modulus elastisitas beton (MPa),

ϵ_c^{pl} = regangan tekan plastis beton,

b_c = factor konstan pendekatan monotonic tekan.

Serupa dengan pembentukan kerusakan tekan, kerusakan tarik (d_t) bergantung pada regangan plastis dan inelastik pada saat beton mengalami tarik. Parameter $b_t = 0,1$ sesuai dengan hasil eksperimen pengujian tarik pada Gambar 2.8.



Gambar 2.13 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik

Sumber: Reinhardt & Cornelissen, 1964

Perhitungan hubungan regangan dengan kerusakan eu dapat dihitung dengan persamaan (2).

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_c E^{-1}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan : d_t = tension damage parameter,

σ_t = tegangan tekan beton (MPa),

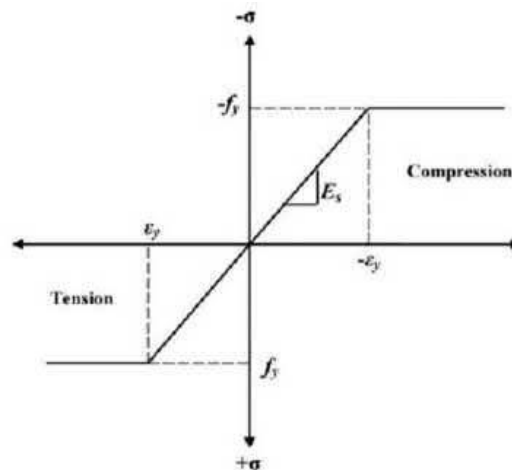
E_t = modulus elastisitas beton (MPa),

ε_c^{pl} = regangan tarik plastis beton,

b_t = factor konstan pendekatan monotonic tekan.

b. Material Model Baja

Material baja tulangan dimodelkan sebagai elastic perfectly plastis seperti pada Gambar 2.14, dimana respon elastik linier dianggap terjadi sebelum leleh maupun pengerasan-regangan (strain hardening) tidak terjadi.



Gambar 2.14 Model Tegangan-Regangan Elastic Perfectly Plastic

Sumber: Abaqus Manual

I. Hasil Penelitian Sebelumnya

Herman Parung, R. Irmawaty, Ricko A. Mappayukki, dan Sudirman (2010). Penelitian yang dilakukan untuk meneliti tentang kekuatan sambungan balok-kolom pracetak menggunakan plat baja sebagai konektor (JPSP-*Joint* Pracetak Sambungan Plat Baja). Sambungan pracetak dibuat untuk sambungan balok-kolom tipe interior dan eksterior, diuji dengan beban monotonic dan siklik. Kekuatan kedua benda uji dibandingkan kekuatannya dengan konstruksi yang monolit. Hasil diperoleh:

1. Tipe retak pada kedua konstruksi baik pracetak maupun monolit adalah serupa, yakni retak lentur, retak ini berada di daerah sambungan antara pracetak dan bagian yang disambung.
2. Kekuatan JPSP lebih tinggi dari konstruksi monolit. Hal ini dapat dilihat dari defleksi yang lebih rendah dari JPSP.
3. Tidak ada tanda keruntuhan *joint*, di mana sambungan kolom pracetak dilas sebelum digrouting.

Rudi Y. Adi, Ilham Nurhuda, Sukamta, dan Intan Fitriani (2014). Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki kekakuan dan mempelajari perilaku beton pracetak antara kolom monolit tanpa sambungan dengan kolom dengan sambungan. Sambungan yang digunakan adalah sambungan kering menggunakan plat dan baut mur. Hasil yang diperoleh:

1. Pada hubungan beban dengan lendutan dapat disimpulkan bahwa kekakuan benda uji kolom dengan sambungan lebih besar dibandingkan benda uji kolom monolit tanpa sambungan. Hal ini didapat dari rasio beban dengan lendutan kolom dengan sambungan yang lebih besar.
2. Pada hubungan tegangan dengan regangan beton dapat disimpulkan bahwa modulus elastisitas benda uji kolom monolit tanpa sambungan lebih besar dibandingkan benda uji kolom dengan sambungan.

Iskandar (2014). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kinerja sambungan (join) balok beton bertulang dengan kolom komposit yang dibebani dengan beban siklik. Metode yang digunakan dalam kajian numerik sambungan balok-kolom komposit ini adalah menggunakan analisis numerik dengan metode elemen hingga. Dalam penelitian ini digunakan dua buah model sambungan benda uji join balok kolom luar (eksternal). Model Benda Uji 1 (MBU-1) berupa join balok-kolom menggunakan kolom komposit dengan model sambungan tulangan balok masuk ke dalam kolom komposit, dan Model Benda Uji 2 (MBU-2) juga menggunakan kolom komposit tetapi model sambungan tulangan balok dilas pada casing baja kolom komposit. Selanjutnya hasil kajian numerik diverifikasi terhadap hasil studi eksperimental yang pernah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

Hasil yang diperoleh adalah hubungan beban-lendutan, disipasi energi, serta distribusi tegangan dan pola retak. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari kajian numerik menunjukkan bahwa perilaku model MBU-1 memiliki kinerja yang cukup baik dan stabil terhadap pembebanan siklik, sedangkan Model Benda Uji 2 (MBU-2) kinerjanya kurang baik serta tidak stabil, dimana perilakunya didominasi oleh deformasi geser, dan diagonal strut yang terbentuk sangat kecil. Berdasarkan verifikasi, perilaku atau kinerja kedua model benda uji dalam penelitian ini juga identik dengan hasil yang diperoleh dari kajian eksperimental yang pernah dilakukan sebelumnya. Jadi Model MBU-1 merupakan salah satu tipe sambungan balok-kolom struktur yang cukup baik untuk digunakan dalam bangunan tahan gempa. Sedangkan Model sambungan MBU-2 tidak direkomendasikan untuk digunakan pada bangunan tahan. Analisis numerik yang diperoleh secara umum sudah mendekati hasil eksperimental, walaupun tidak sepenuhnya dapat diverifikasi dengan baik terhadap hasil eksperimental, terutama pada hubungan beban-lendutan, disipasi energi, serta degradasi kekuatan dan kekakuannya, karena keterbatasan dalam pemodelan.

Sonatha Christianto (2017). Studi ini bertujuan untuk membandingkan uji numerik model hubungan balok-kolom dengan hasil uji eksperimental. Dalam penelitian ini digunakan dua buah model yaitu sambungan balok kolom tanpa pelat dan sambungan balok kolom dengan plat menggunakan program atena 3D v.3.3.2. Dari hasil studi, hasil uji numerik menghasilkan perbedaan perilaku sambungan dengan hasil uji eksperimental. Kurva sisteresis hasil uji eksperimental memiliki bentuk yang baik, berbentuk seperti kumparan "spindle shape". Kurva

hysteresis hasil numerik mengalami penurunan kekuatan setelah kelelahan. Pola retak hasil uji numerik serupa dengan pola retak hasil uji eksperimental.

Vido Septa Hidayat (2018). Studi ini bertujuan untuk menganalisis perilaku dinding batako-kait dengan metode elemen hingga, metode elemen hingga menggunakan software Abaqus. Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap dinding batako dengan bentuk batako yang berbeda dari batako konvensional pada umumnya. Dari hasil pemodelan numerik terhadap unit batako-kait menunjukkan perilaku yang mendekati pengujian terhadap benda uji di laboratorium.