

**TESIS**

**PERILAKU KEKAKUAN DAN DAKTALITAS  
KOLOM BALOK PRACETAK SAMBUNGAN PASAK  
DENGAN PEMBEBANAN SIKLIK**

***STIFFNESS BEHAVIOR AND DUCTILITY  
OF PRECAST BEAM-COLUMN WITH DOWEL CONNECTION  
DUE TO CYCLIC LOAD***

**YANNY FEBRY FITRIANI SOFYAN**

**D012201015**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**PERILAKU KEKAKUAN DAN DAKTALITAS  
KOLOM BALOK PRACETAK SAMBUNGAN PASAK DENGAN  
PEMBEBANAN SIKLIK**

***STIFFNESS BEHAVIOR AND DUCTILITY  
OF PRECAST BEAM-COLUMN WITH DOWEL CONNECTION DUE TO  
CYCLIC LOAD***

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

YANNY FEBRY FITRIANI SOFYAN

D012201015

kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2022**

# TESIS

## PERILAKU KEKAKUAN DAN DAKTALITAS KOLOM BALOK PRACETAK SAMBUNGAN PASAK DENGAN PEMBEBANAN SIKLIK

**YANNY FEBRY FITRIANI SOFYAN**

**NIM : D012201015**

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 18 Agustus 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



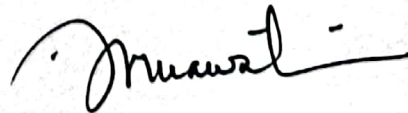
**Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST. MT**  
NIP. 19791226 200501 1 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Sipil



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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yanny Febry Fitriani Sofyan

Nomor mahasiswa : D012201015

Program studi : Teknik Sipil

Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa tulisan saya berjudul:

### **PERILAKU KEKAKUAN DAN DAKTALITAS KOLOM BALOK PRACETAK SAMBUNGAN PASAK DENGAN PEMBEBANAN 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, 18 Agustus 2022

Yang menyatakan,



Yanny Febry Fitriani Sofyan

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, berkat izin dan karunia-Nya sehingga penulisan tugas akhir yang berjudul **“PERILAKU KEKAKUAN DAN DAKTALITAS KOLOM BALOK PRACETAK SAMBUNGAN PASAK DENGAN PEMBEBANAN SIKLIK”** dapat selesai guna memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Magister Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Penyusunan tugas akhir berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa selesainya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, utamanya dosen pembimbing:

Pembimbing I : Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng.

Pembimbing II: Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST. MT.

Dengan segala kerendahan hati, pada bagian ini penulis juga ingin menyampaikan terima kasih kepada:

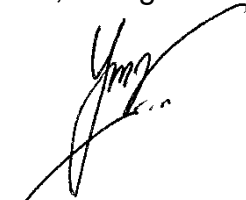
1. Orang tua tercinta, Ayahanda Sofyan Muhri Kanata dan Ibunda Murniati Marses atas kasih sayang, dukungan dan doanya.
2. Rektor Universitas Hasanuddin Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc,
3. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T.,M.T.,
4. Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST.,M.Eng.,
5. Ketua Program Studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Ibu Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.,
6. Bapak Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng. dan Bapak Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST.MT., selaku dosen pembimbing yang selalu meluangkan waktu dan tenaga untuk bimbingan dan pengarahan dalam penelitian ini.

7. Bapak Dr.Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng., Bapak Dr.Eng. Akbar Tjaronge, ST.MT., dan Bapak Prof. Dr.Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng, selaku dosen KKD Struktur yang telah banyak memberikan masukan dan bantuan selama proses penelitian.
8. Adik – adik Asisten Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuannya selama pelaksanaan penelitian di laboratorium.
9. Seluruh dosen, staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
10. Rekan-rekan KKD Struktur serta member Riset Gempa Struktur yang senantiasa memberi masukan, semangat dan doa dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Rekan–rekan mahasiswa S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang senantiasa memberikan semangat, bantuan dan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
12. Rekan tugas akhir Tim Pasak, Bapak Herman A. Tumengkol (S3), Irfan Jaya (S1), Muh.Athar Al Ayubi A.R. (S1), Aryni Ponto (S1) atas kerjasamanya mulai dari persiapan hingga berakhirnya pengujian.
13. Kanda Ahmad Tamsil Yunus yang selalu memberi semangat dan banyak membantu dalam proses penyusunan tesis ini.
14. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu selama jalannya penelitian hingga proses pengujian.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan adanya masukan dan saran yang dapat memberikan sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan Rahmat-Nya kepada kita semua, dan Tugas Akhir ini dapat memberikan wawasan tambahan dan manfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Makassar, 18 Agustus 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yanny Febry Fitriani Sofyan', written in a cursive style.

**Yanny Febry Fitriani Sofyan**

## ABSTRAK

**YANNY FEBRY FITRIANI SOFYAN.** Perilaku Kekakuan dan Daktalitas Kolom Balok Pracetak Sambungan Pasak dengan Pembebanan Siklik. (Dibimbing oleh **Herman Parung** dan **A. Arwin Amiruddin**).

Saat ini penggunaan beton pracetak menjadi metode alternatif dalam pekerjaan konstruksi, namun metode penyambungan dalam instalasi beton pracetak di lapangan perlu diperhatikan karena menjadi perlemahan, utamanya saat mengalami beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai kekakuan dan daktalitas kolom - balok pracetak sambungan pasak dengan pembebanan siklik. Penelitian ini merupakan hasil studi eksperimental dengan benda uji balok – kolom eksterior yang mana penyambungan pada area balok menggunakan sambungan pasak. Benda uji terdiri dari 3 (tiga) buah yakni balok-kolom monolit (BN), balok-kolom sambungan dengan penggunaan 2 pasak (BG1), dan balok-kolom sambungan dengan penggunaan 4 pasak (BG2). Ketiga spesimen kemudian diuji dengan beban siklik berdasarkan metode *displacement control*. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen BG2 memiliki nilai kekakuan lebih besar dibandingkan BN dan BG1. Berdasarkan persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 7834:2012 untuk sistem rangka pemikul momen, kekakuan ketiga spesimen memenuhi persyaratan kekakuan awal. Nilai daktalitas pada ketiga spesimen berada pada kisaran 2 sampai 4 dan termasuk dalam kategori daktalitas sedang (*moderate ductility*) sesuai klasifikasi daktalitas menurut ASCE 41-17. Sehingga berdasarkan penelitian ini disimpulkan bahwa metode sambungan dengan pasak dapat menjadi alternatif metode penyambungan pada balok-kolom pracetak.

**Kata kunci:** sambungan balok-kolom, pasak, beban siklik, daktalitas, kekakuan, pracetak.



## ABSTRACT

**YANNY FEBRY FITRIANI SOFYAN.** *Stiffness Behavior and Ductility of Precast Beam-Column with Dowel Connection due to Cyclic Load*  
(Supervised by **Herman Parung** and **A. Arwin Amiruddin**)

Nowadays, the use of precast concrete is an alternative method in construction work, but the connection method in precast concrete installations in the field needs to be considered because it becomes a weakness, especially when experiencing earthquake loads. This study aims to analyze the stiffness and ductility values of precast column-beam dowel connections under cyclic loading. This research is the result of an experimental study with exterior beam-column specimens where the connection to the beam area uses a dowel connection. The test object consisted of 3 (three) specimens, namely monolithic beam-column (BN), connection beam-column using 2 dowels (BG1), and connection beam-column using 4 dowels (BG2). The three specimens were tested with a cyclic load based on the displacement control method. The test results show that the BG2 specimen has a greater stiffness value than BN and BG1. Based on the requirements specified in SNI 7834:2012 for the moment-resisting frame system, the stiffness of the three specimens qualify the initial stiffness requirements. The ductility values in the three specimens were in the range of 2 to 4 and were included in the moderate ductility category according to the ductility classification based on ASCE 41-17. This study concludes that the method of connection with dowels can be an alternative method of connecting the precast beam column.

**Keywords:** *beam-column connection, dowel, cyclic load, ductility, stiffness, precast.*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGANTAR .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR NOTASI .....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Beton Pracetak .....	7
2.2. Joint Kolom Balok .....	10
2.3. Konsep Sambungan Pasak .....	13
2.4. Kekakuan dan Daktilitas .....	14
2.5. Sika Grout 215 (new).....	22
2.6. Penelitian Sebelumnya .....	24
BAB III METODE PENELITIAN.....	26
3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	26
3.2. Material dan Peralatan Penelitian .....	26
3.3. Desain Benda Uji .....	27
3.4. Pelaksanaan Penelitian .....	36
3.5. Standar Penelitian .....	46
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1. Hasil Pengujian Karakteristik Material .....	48

4.2. Hasil Analisis Spesimen.....	52
BAB V PENUTUP .....	70
5.1. Kesimpulan .....	70
5.2. Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	72
LAMPIRAN.....	75

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi data Sika Grout 215 (new) .....	23
Tabel 2. Dimensi penampang .....	27
Tabel 3. Komposisi Campuran Beton .....	48
Tabel 4. Komposisi Campuran Grouting .....	48
Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	50
Tabel 6. Hasil pengujian kuat tarik baja P08.....	51
Tabel 7. Hasil pengujian kuat tarik baja D13.....	51
Tabel 8. Hasil pengujian kuat tarik baja D16.....	51
Tabel 9. Beban spesimen pada saat retak pertama, leleh dan ultimit.....	57
Tabel 10. Perpindahan spesimen pada saat retak pertama, leleh dan ultimit.....	57
Tabel 11. Persentase peningkatan kekuatan lentur spesimen.....	57
Tabel 12. Kekakuan pada semua spesimen .....	64
Tabel 13. Pemenuhan syarat kekakuan awal .....	65
Tabel 14. Daktilitas .....	66
Tabel 15. Klasifikasi daktilitas spesimen menurut ASCE 41-17 .....	67

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Tipe sambungan kuat joint .....	9
<b>Gambar 2.</b> Tipe sambungan Daktail.....	9
<b>Gambar 3.</b> Gaya dan Penulangan Geser pada Joint Balok-Kolom .....	11
<b>Gambar 4.</b> Jenis sambungan eksterior.....	12
<b>Gambar 5.</b> Jenis sambungan interior .....	12
<b>Gambar 6.</b> Letak sendi plastis .....	13
<b>Gambar 7.</b> Gambar sambungan pasak .....	14
<b>Gambar 8.</b> Modulus Awal, Tangen dan Secan .....	15
<b>Gambar 9.</b> Kekakuan awal dan kekakuan siklus ke-i .....	16
<b>Gambar 10.</b> Hubungan beban-lendutan pada beton bertulang .....	17
<b>Gambar 11.</b> Kekakuan struktur.....	17
<b>Gambar 12.</b> Penentuan nilai $\Delta y$ .....	20
<b>Gambar 13.</b> Daktilitas regangan.....	20
<b>Gambar 14.</b> Daktilitas kelengkungan.....	21
<b>Gambar 15.</b> Daktilitas perpindahan .....	22
<b>Gambar 16.</b> Penulangan .....	29
<b>Gambar 17.</b> Detail Penulangan spesimen BN .....	30
<b>Gambar 18.</b> Tampak atas area sambungan spesimen BN.....	30
<b>Gambar 19.</b> Penulangan spesimen BG1 dan BG2 sebelum disambung .	32
<b>Gambar 20.</b> Penulangan spesimen BG1 dan BG2 setelah disambung...	33
<b>Gambar 21.</b> Detail penulangan spesimen BG1 .....	34
<b>Gambar 22.</b> Tampak atas area sambungan spesimen BG1 .....	34
<b>Gambar 23.</b> Detail penulangan spesimen BG2 .....	35

<b>Gambar 24.</b> Tampak atas area sambungan spesimen BG2 .....	35
<b>Gambar 25.</b> Diagram alir Penelitian .....	37
<b>Gambar 26.</b> Setting Up Pengujian.....	43
<b>Gambar 27.</b> Program Pembebanan sesuai SNI 7834-2012 .....	44
<b>Gambar 28.</b> Program Pembebanan Penelitian.....	45
<b>Gambar 29.</b> Kuat Tekan Beton.....	49
<b>Gambar 30.</b> Kuat Tekan Grouting .....	49
<b>Gambar 31.</b> Pengujian Kuat Tarik Tulangan .....	50
<b>Gambar 32.</b> Hubungan beban–perpindahan akibat beban siklik pada BN ...	52
<b>Gambar 33.</b> Hubungan beban–perpindahan akibat beban siklik pada BG1 .	53
<b>Gambar 34.</b> Hubungan beban–perpindahan akibat beban siklik pada BG2 ..	55
<b>Gambar 35.</b> Perbandingan beban dan perpindahan tiap spesimen .....	56
<b>Gambar 36.</b> Hubungan beban-regangan baja BN .....	63
<b>Gambar 37.</b> Hubungan beban-regangan baja BG1.....	64
<b>Gambar 38.</b> Hubungan beban-regangan baja BN BG2.....	67
<b>Gambar 39.</b> Perbandingan kekakuan pada spesimen kondisi tekan.....	63
<b>Gambar 40.</b> Perbandingan kekakuan pada spesimen kondisi tarik.....	64
<b>Gambar 41.</b> Nilai daktilitas untuk benda uji BN, BG1, BG2 .....	67
<b>Gambar 42.</b> Pola Retak pada benda uji BN .....	68
<b>Gambar 43.</b> Pola Retak pada benda uji BG1 .....	69
<b>Gambar 44.</b> Pola Retak pada benda uji BG2 .....	69

## DAFTAR NOTASI

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
$\sigma$	tegangan	MPa
$\epsilon$	regangan	%
K	kekakuan	kN/mm
Ki	kekakuan awal	kN/mm
Sy	beban <i>yield</i>	Kn
d	perpindahan	Mm
$\Delta$	perpindahan	Mm
$\Delta_y$	<i>yield displacement</i>	mm
$\Delta_{cr}$	<i>first crack displacement</i>	Mm
$\Delta_m$	<i>maximum displacement</i>	Mm
$\Delta_u$	<i>ultimate displacement</i>	Mm
$\mu_{\Delta}$	<i>displacement ductility</i>	Mm
P	beban lateral	kN
E <sub>n</sub>	tahanan lateral minimum	
r1	rasio simpangan tahanan lateral	%
r2	simpangan minimum	%
$\phi$	sudut kelengkungan	rad
BN	balok kolom monolit	
BG1	balok kolom sambungan 2 pasak	
BG2	balok kolom sambungan 4 pasak	
$\emptyset$	tulangan polos	mm
D	tulangan ulir	mm

$f_c$	mutu beton	MPa
$f_y$	tegangan leleh	MPa
$f_u$	tegangan ultimate	MPa



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Saat ini inovasi teknologi di sektor infrastruktur telah berkembang pesat, upaya untuk menciptakan temuan terbaharukan diwujudkan dalam penelitian dibidang ketekniksipilan. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, salah satunya faktor pembebanan yang menjadi parameter dalam mendesain sebuah struktur bangunan. Posisi Indonesia yang berada pada daerah lingkaran api pasifik menjadikan wilayahnya rentan terhadap bencana gempa bumi. Oleh karena itu, infrastruktur di beberapa wilayah Indonesia dengan potensi gempa tinggi perlu memperhitungkan beban gempa dalam desain dan pelaksanaan konstruksinya guna meminimalisir keruntuhan ataupun kerusakan bangunan pasca bencana.

Selain memperhatikan tahapan desain, para praktisi juga harus mengikuti perkembangan metode pelaksanaan konstruksi di lapangan. Salah satu hal yang tidak asing lagi yakni penggunaan beton pracetak dalam pekerjaan konstruksi selain karena faktor efesiensi waktu pekerjaan dan keseragaman mutu, alternatif ini juga memungkinkan proses pengecoran dilakukan di luar lokasi pekerjaan. Namun dibalik kelebihanannya ada hal lain yang patut diperhatikan dalam instalasi beton pracetak di lapangan yakni metode penyambungan antar bagian yang menjadi bagian perlemahan utamanya saat mengalami beban gempa.

Sesuai dengan SNI 2847: 2019 pasal 16.2 perihal sambungan komponen pracetak menjelaskan secara umum terkait persyaratan penyaluran gaya dengan *grouted joints*, landasan, pengunci geser, angkur, tulangan baja, sambungan mekanis, lapisan penutup bertulang, atau penggabungan metode - metode tersebut. Kemudian perencanaan sebuah sambungan dengan multi komponen perlu lebih khusus dijelaskan dengan perbedaan kekakuan, daktilitas, dan kekuatan dari komponen struktur menjadi bahan pertimbangan.

Nilai kekakuan dan daktilitas menjadi bagian dari tolak ukur dalam menentukan keberhasilan beton pracetak untuk dapat diterapkan dalam konstruksi khususnya saat menerima beban gempa berupa beban bolak – balik berulang (*cyclic loading*).

Kekakuan merupakan kemampuan suatu bahan untuk mempertahankan kondisi awal sehingga mencegah terjadinya deformasi, dan dirumuskan sebagai besarnya gaya (N) yang diperlukan dalam melakukan suatu perpindahan (mm). Adanya batas toleransi lendutan untuk keamanan konstruksi menjadikan nilai kekakuan menjadi salah satu persyaratan desain. Sedangkan daktilitas berdasarkan SNI 1726-2019 dirumuskan sebagai perbandingan antara perpindahan maksimum struktur gedung saat mencapai keadaan di ambang keruntuhan dan perpindahan pada kondisi pelelehan pertama.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ruminsar Simbolon (2020), menyatakan bahwa metode penyambungan dengan model takikan lurus rangkap yang diterapkan pada beton pracetak dengan pembebanan

bolak-balik dapat memenuhi persyaratan sistem struktur rangka pemikul momen pada beton pracetak untuk klasifikasi desain gempa D, E, atau F, sehingga dapat diterapkan pada wilayah dengan tingkat resiko gempa yang tinggi.

Dengan mempertimbangkan uraian diatas maka diharapkan adanya alternatif metode sambungan antar bagian terhadap balok-kolom pracetak, sehingga pada tugas akhir ini dilakukan penelitian terkait nilai kekakuan dan daktilitas pada balok-kolom eksterior dengan metode sambungan beton pracetak menggunakan pasak yang kemudian di uji dengan beban gempa berupa pembebanan bolak – balik berulang (*cyclic loading*).

Oleh karena itu, maka disusunlah penelitian ini dengan judul:  
**“Perilaku Kekakuan dan Daktilitas Kolom Balok Pracetak Sambungan Pasak dengan Pembebanan Siklik”**

## **1.2. Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana kekakuan kolom - balok pracetak sambungan pasak dengan pembebanan siklik
2. Bagaimana daktilitas kolom - balok pracetak sambungan pasak dengan pembebanan siklik

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berikut tujuan penelitian ini, diantaranya:

1. Menganalisis nilai kekakuan kolom - balok pracetak sambungan pasak dengan pembebanan siklik

2. Menganalisis nilai daktilitas kolom - balok pracetak sambungan pasak dengan pembebanan siklik

#### **1.4. Batasan Masalah**

Adapun hal – hal yang menjadi batasan masalah dalam penelitian ini, diantaranya:

1. Analisis hanya membahas tentang nilai kekakuan dan daktilitas kolom - balok pracetak sambungan pasak;
2. Kuat tekan beton pracetak rencana yakni  $f'_c = 25$  MPa;
3. Mutu baja tulangan yang digunakan BJTS 420B;
4. Material pasak menggunakan tulangan ulir diameter 16 mm dengan mutu BJTS 420B;
5. Grouting pada area sambungan menggunakan semen grouting dengan mutu K-500;
6. Area penyambungan beton pracetak terletak pada daerah sendi plastis;
7. Spesimen struktur berjumlah 3 (tiga) buah balok-kolom eksterior yang terdiri dari satu buah balok kolom monolit, satu buah balok kolom sambungan dengan penggunaan 2 pasak, dan satu buah balok kolom sambungan dengan penggunaan 4 pasak;
8. Jenis pembebanan yang digunakan adalah beban dinamis berupa pembebanan bolak-balik ( beban aksial diabaikan);
9. Semen grouting yang digunakan untuk sambungan semen sika grout 215 (*new*).

## **1.5. Sistematika Penulisan**

Penyusunan laporan penelitian ini terdiri dari 5 (lima) bagian yaitu Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Penutup. Adapun uraian isi dalam tiap bagian sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang yang menjadi landasan dilakukannya penelitian, hal yang menjadi rumusan masalah, tujuan dilaksanakannya penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bagian ini menjelaskan tentang teori dasar dan kriteria yang terkait dengan penelitian, seperti penjelasan mengenai beton pracetak, joint kolom-balok, dan konsep sambungan pasak. Pada bab ini juga menguraikan tentang metode – metode alternatif untuk menganalisis dan memperoleh nilai kekakuan dan daktilitas. Selain itu, menjabarkan beberapa penelitian sebelumnya yang memiliki hubungan dengan perilaku kekakuan dan daktilitas kolom balok pracetak sambungan pasak dengan pembebanan siklik.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Pada bagian ini diuraikan dengan jelas mengenai lokasi penelitian, material dan alat yang digunakan, desain benda uji, metode pelaksanaan penelitian serta standar yang digunakan.

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini data-data hasil pengujian di olah dan di analisis serta dibahas secara detail sehingga dapat ditarik kesimpulannya.

#### **BAB V PENUTUP**

Pada bab penutup berisikan hal – hal yang menjadi kesimpulan setelah selesainya semua tahapan penelitian dan saran sebagai masukan untuk pembaca dan peneliti lainnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Beton Pracetak

Teknologi beton pracetak pada dunia konstruksi beton memungkinkan proses pengecoran dan penyusunan antar bagian komponen dilakukan pada wilayah pabrikasi atau diluar area pekerjaan struktur. Pada kondisi tertentu antar bagian telah disatukan dan disusun sebelum pengaplikasian di lokasi konstruksi. Jika ditinjau dari tahap perencanaan beton pracetak berbeda dengan beton monolit, perbedaannya didasarkan pada metode pelaksanaan dari tempat pabrikasi, teknik menyatukan dan memasang, serta perilaku system pracetak saat penyambungan antar bagian (*joint*). (Abduh, 2007).

Pengelompokkan system beton pracetak secara umum sebagai berikut (*Nurjaman, 2000* dalam Abduh, 2007):

1. Pracetak penuh, tipe ini menghasilkan struktur bangunan monolit dimana pelat, balok, dan kolom dipracetak dan langsung di sambung antar bagian.
2. Pracetak sebagian, pada system ini kekakuan sistem tidak terlalu dipengaruhi oleh pemutusan komponenisasi, misalnya pracetak pelat, dinding di mana pemutusan dilakukan tidak pada balok dan kolom/bukan pada titik kumpul.

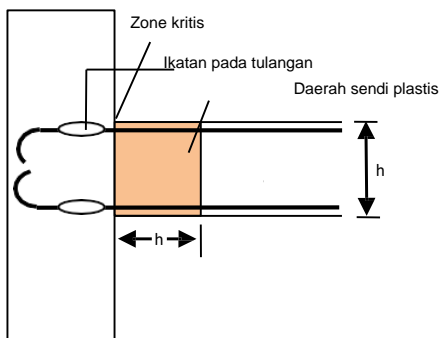
Pengecoran beton bertulang in-situ cenderung bersifat monolit dan menerus. Berbeda dengan struktur pracetak terdiri dari sejumlah komponen

yang dibuat di pabrik, lalu 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)

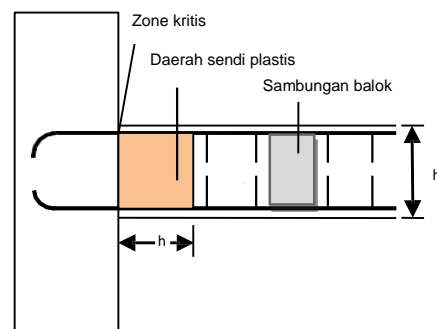
Menurut NEHRP (dalam Hawkins, 2000), terdapat dua sistem sambungan pracetak yaitu sambungan kuat dan sambungan daktail yang diilustrasikan pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2, berikut penjelasannya:

1. Sambungan Kuat (*Strong Connection*)

Sambungan antar komponen pracetak bersifat elastik meskipun dalam kondisi gempa kuat. Sistem sambungan wajib dan terbukti secara teoritis dan eksperimental memiliki kekuatan dan kekakuan yang minimal sama dengan yang dimiliki struktur sambungan beton monolit yang setara.

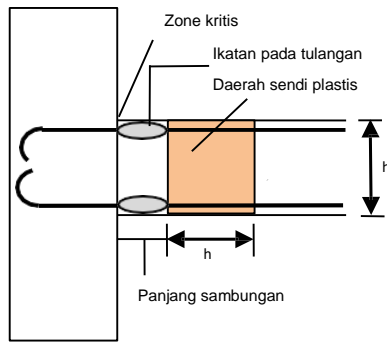


(a) Sambungan balok ke kolom



(b) Sambungan balok ke balok



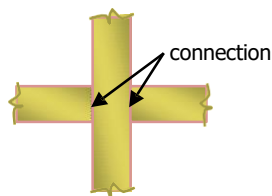


(c) Sambungan kolom ke Balok

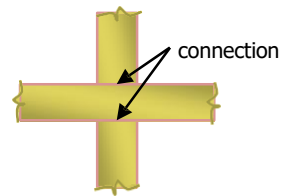
**Gambar 1.** Tipe sambungan kuat joint

2. Sambungan Duktail (*Ductile Connection*)

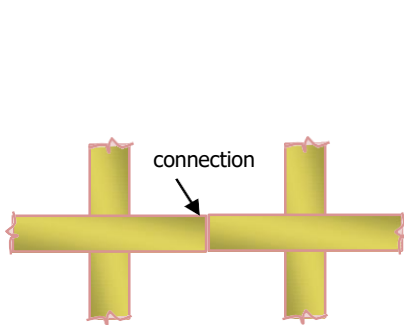
Tipe sambungan ini mengizinkan terjadinya deformasi inelastis. Sistem sambungan harus terbukti secara teoritis dan eksperimental memenuhi persyaratan kehandalan dan kekakuan struktur tahan gempa.



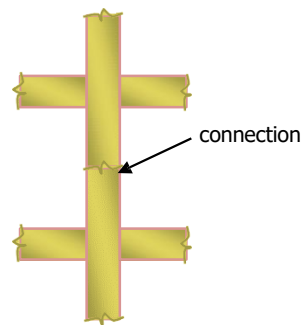
(a) Balok ke kolom



(b) Kolom ke balok



(c) Sambungan balok ke balok



(d) Sambungan kolom ke kolom

**Gambar 2.** Tipe sambungan Duktail

Selain itu menurut Wahyudi et al., (2010) , terdapat dua kategori sambungan beton pracetak yakni:

1. Sambungan kering (*dry connection*)

Penyambungan antar bagian beton pracetak menggunakan plat besi sebagai penghubung, yang kemudian dilas atau dibaut.

2. Sambungan basah (*wet connection*)

Penyambungan antar bagian beton pracetak yang ditandai dengan keluarnya besi tulangan dari beton pracetak yang akan disambungkan dengan pengecoran di tempat.

## **2.2. Joint Kolom Balok**

Paulay dan Priestley (1992), menguraikan 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.

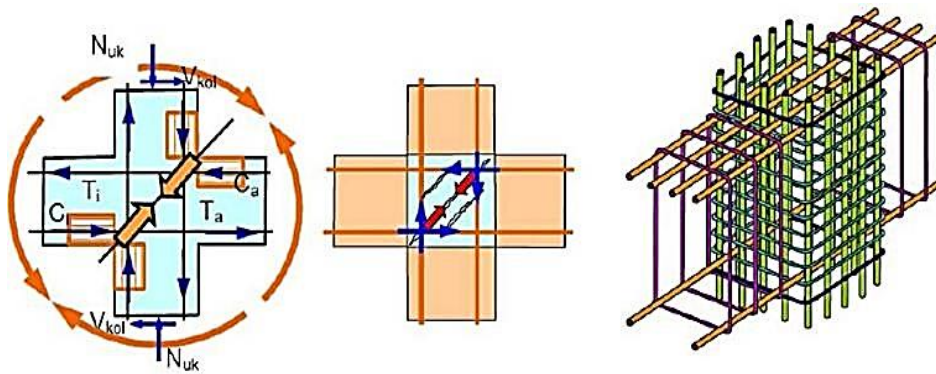
*Joint* berdasarkan tempat deformasi dikelompokkan sebagai berikut:

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

*Joint* balok-kolom dalam struktur statis tak tentu menjadi bagian utama yang berperan dalam pengengkangan sehingga tidak terjadi kebebasan rotasi pada balok. Pengengkangan terjadi apabila *joint* balok-

kolom menjadi satu kesatuan yang monolit dan kaku. Kekakuan *joint* dibutuhkan agar redistribusi momen tidak seimbang pada analisis struktur dapat dilakukan. (Widodo ,2007)

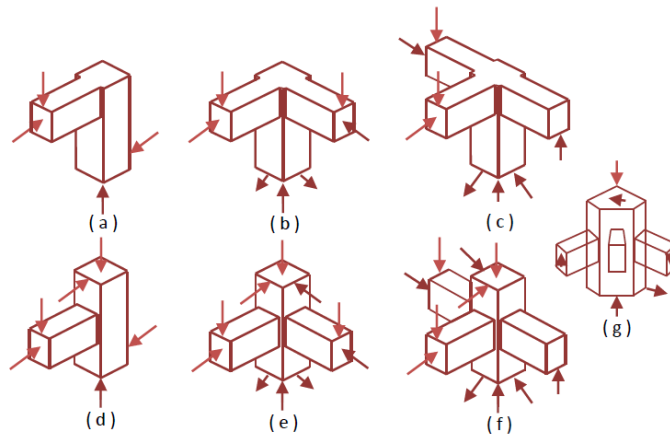
Menurut Barsom (1999), area sambungan balok-kolom pada struktur dari gedung beton bertulang berfungsi untuk menyalurkan gaya-gaya dari suatu elemen ke elemen lainnya seperti pada Gambar 3. Adanya pengaruh gaya lateral seperti gempa, sambungan balok-kolom akan mengalami gaya geser dan gaya horizontal yang lebih besar dari pada elemen balok dan kolom yang berdekatan.



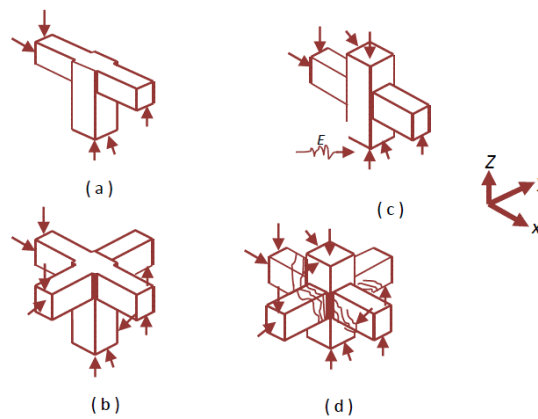
(a) Arah gaya-gaya pada *joint* (b) Crack *joint* (c) Tulangan geser *joint*

**Gambar 3.** Gaya dan Penulangan Geser pada Joint Balok-Kolom

*Joint* merupakan area pertemuan kolom dengan balok pada satu titik. Area *joint* merupakan bagian struktur bangunan yang paling rentan terhadap gempa. Adapun tipe *joint* balok-kolom pada sebuah struktur dapat dibedakan dari letak titik kumpulnya yaitu *joint* luar (*Exterior Joint*) dan *joint* dalam (*Interior Joint*) yang diilustrasikan pada gambar 4 dan gambar 5.



**Gambar 4.** Jenis sambungan eksterior

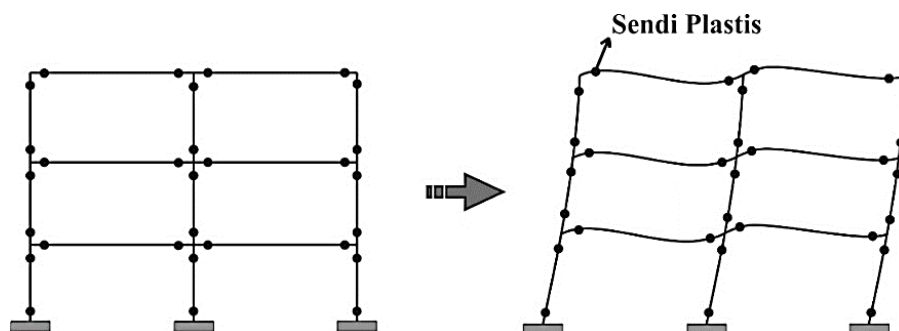


**Gambar 5.** Jenis sambungan interior

Area penyambungan kolom dan balok adalah bagian paling kritis dalam struktur rangka beton bertulang, perlunya desain perencanaan khusus untuk berdeformasi inelastik pada saat terjadi gempa kuat. Adapun akibat yang timbul dari momen kolom di atas dan bawahnya, serta momen-momen dari balok pada saat mengalami beban gempa, daerah hubungan balok-kolom akan mengalami gaya geser horizontal dan vertikal yang besar. Gaya geser yang terjadi ini besarnya akan menjadi beberapa kali lipat lebih tinggi dibandingkan gaya geser yang timbul pada balok dan kolom yang terhubung. Jika daerah hubungan balok-kolom tidak didesain dengan

benar, maka dapat menyebabkan keruntuhan geser yang bersifat getas dan membahayakan user bangunan. (Setiawan, 2012)

Menurut Reza, et.al (2016), Alur kerusakan sebuah struktur harus didesain pada bagian tertentu sehingga pasca terjadinya gempa, dapat dengan mudah diidentifikasi jenis perbaikan. Daerah kegagalan harus didesain pada balok dan kolom yang disebut sendi plastis. Sendi plastis atau *hinge* adalah bentuk ketidakmampuan elemen struktur (balok dan kolom) menahan gaya dalam. Konsep perencanaan struktur harus sesuai dengan *strong column-weak beam*, yang mana saat terjadi kegagalan, bagian pertama yang runtuh yakni balok, dan apabila kolomnya yang runtuh dahulu maka struktur langsung hancur. Posisi sendi plastis berada dimuka kolom dan tepi muka balok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Letak sendi plastis

### 2.3. Konsep Sambungan Pasak

Varian pemasangan pasak dengan jumlah tertentu pada balok yang menggunakan grouting mempengaruhi kapasitas geser balok. Menurut Ionnis N (2012), adanya grouting dapat memperkuat beton di daerah

sambungan dan pasak yang membantu mekanisme geser serta bekerja pada sendi plastis. Hal ini mengakibatkan balok yang menggunakan sambungan pasak memiliki kekuatan lebih besar dibandingkan dengan beton normal.

R.Vidjeapriya d.k.k. (2012), pada penelitian mengenai sambungan balok kolom beton pracetak, digunakan pasak berdiameter 16 mm yang ditanamkan ke satu bagian yang menyambung ke kolom (corbel). Balok pracetak memiliki lubang untuk pasak dengan diameter 21 mm yang akan menyambungkan pasak dari kolom ke balok. Jarak antara sambungan balok ke kolom termasuk pasak akan diisi menggunakan *grouting*.



**Gambar 7.** Gambar sambungan pasak

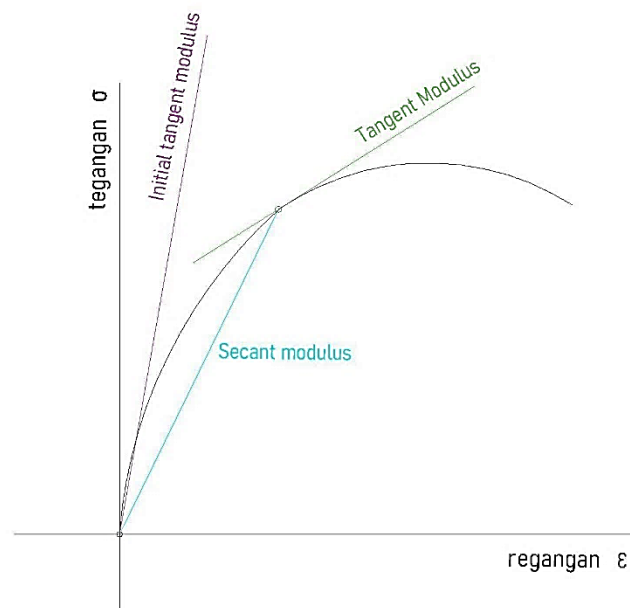
## **2.4. Kekakuan dan Daktilitas**

### **2.4.1. Kekakuan**

Kekakuan merupakan kemampuan suatu bahan untuk menahan terjadinya deformasi, dan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk melakukan satu unit perpindahan. Persyaratan nilai kekakuan berfungsi untuk menjaga konstruksi tidak melebihi ambang batas lendutan yang disyaratkan. Level kekakuan suatu material ditunjukkan oleh sudut yang dibentuk oleh tegangan dan regangan pada area elastic.

Menurut Kenneth-Belanger (1981) kekakuan pada balok beton adalah fungsi dari modulus elastis ( $E$ ) dan momen inersia ( $I$ ). Modulus elastisitas diartikan sebagai nilai kekuatan (strength) terhadap regangan (strain). Lebih lanjut dikenal adanya modulus tangen dan modulus secan ketika ada bagian dari kurva yang berbentuk nonlinear.

Modulus tangen merupakan kemiringan dari salah satu tangen (garis singgung) pada grafik tersebut dititik tertentu di sepanjang grafik, seperti 50% dari kekuatan maksimum beton. Adapun modulus secan yakni kemiringan dari garis tertentu yang ditarik dari titik asal kurva ke suatu titik pada kurva tersebut disuatu tempat diantara 25% sampai 50% dari kekuatan maksimum beton.

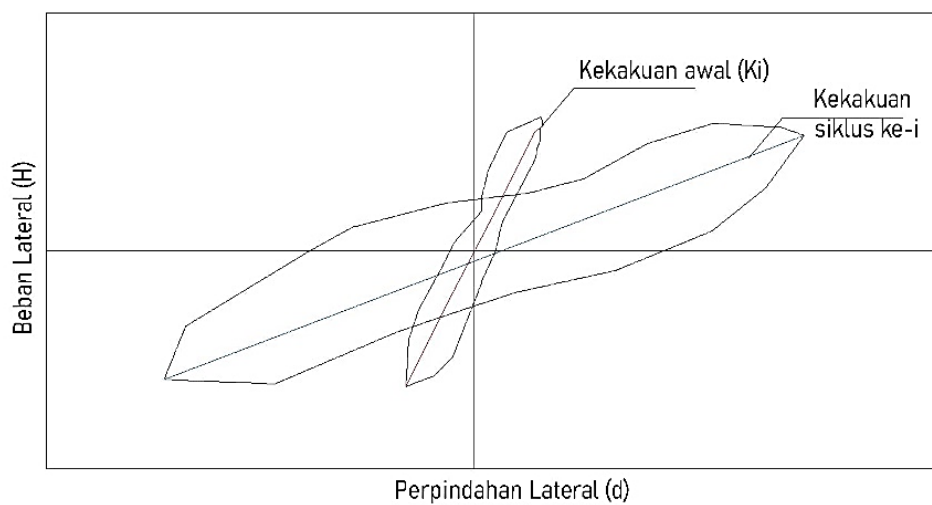


**Gambar 8.** Modulus Awal, Tangen dan Secan

Kekakuan dari sambungan balok-kolom diartikan sebagai peak to peak stiffness, yakni kemiringan garis dari puncak positif ke negatif

(kekakuan secant). Analisis kekakuan secant dilakukan berdasarkan kurva histeretik pada siklus ketiga untuk setiap nilai simpangan.

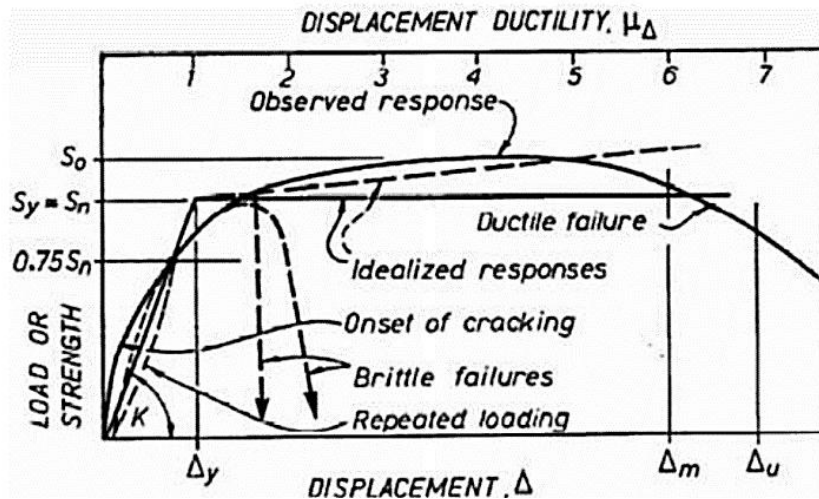
Kekakuan awal pada kurva hysteretic hasil pengujian merupakan kekakuan pada saat beton mengalami retak pertama saat pengujian. Perhitungan kekakuan awal dilakukan berdasarkan kurva histeretik pada siklus pertama dengan simpangan pertama.



**Gambar 9.** Kekakuan awal dan kekakuan siklus ke-i

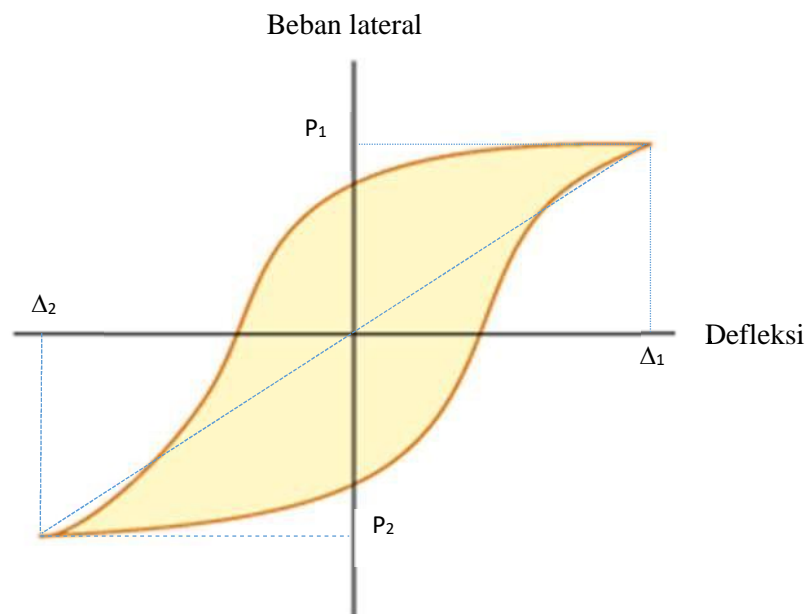
Grafik nonlinier berikut menggambarkan hubungan antara beban dan perpindahan pada komponen beton bertulang yang mengalami peningkatan perpindahan secara tetap yang ditunjukkan pada gambar 10. Pada perhitungan desain, salah satu dari dua pendekatan bilinear dapat menjadi alternatif, dimana  $S_y$  merupakan beban pada saat *yield* atau beban ideal  $S_i$ . Kemiringan linier elastik,  $K = S_y / \Delta y$  digunakan untuk menentukan nilai kekakuan





**Gambar 10.** Hubungan beban-lendutan pada beton bertulang

Menurut Tsonos (1999), untuk struktur yang mengalami pembebanan bolak-balik, kekakuan ditentukan sebagai kemiringan garis yang menghubungkan puncak-puncak beban maksimum arah positif dan negatif dari kurva beban dan defleksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 di bawah ini.



**Gambar 11.** Kekakuan struktur

Berdasarkan Gambar 11 di atas, maka kekakuan (K) struktur dengan pembebanan bolak-balik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$K_1 = \frac{P_1}{\Delta_1} \text{ dan } K_2 = \frac{P_2}{\Delta_2}$$

dengan :

- K = nilai kekakuan  
P = beban arah lateral.  
 $\Delta$  = perpindahan yang terjadi.

Pada benda uji dibawah pembebanan siklik, menurut SNI 7834:2012 benda uji harus memenuhi persyaratan kekakuan awal, dimana benda uji mampu mencapai nilai tahanan lateral minimum ( $E_n$ ) sebelum rasio simpangannya 2% melebihi dari nilai yang konsisten dengan batasan rasio simpangan yang diijinkan dalam bentuk :

$$r_1 = \frac{\Delta_y}{h} < (1 + 0,02).r_2$$

dengan :

- $r_1$  = rasio simpangan tahanan lateral (%).  
 $\Delta_y$  = nilai simpangan pada saat leleh (mm).  
 $r_2$  = simpangan minimum sebesar 0,035 (%).

#### 2.4.2. Daktilitas

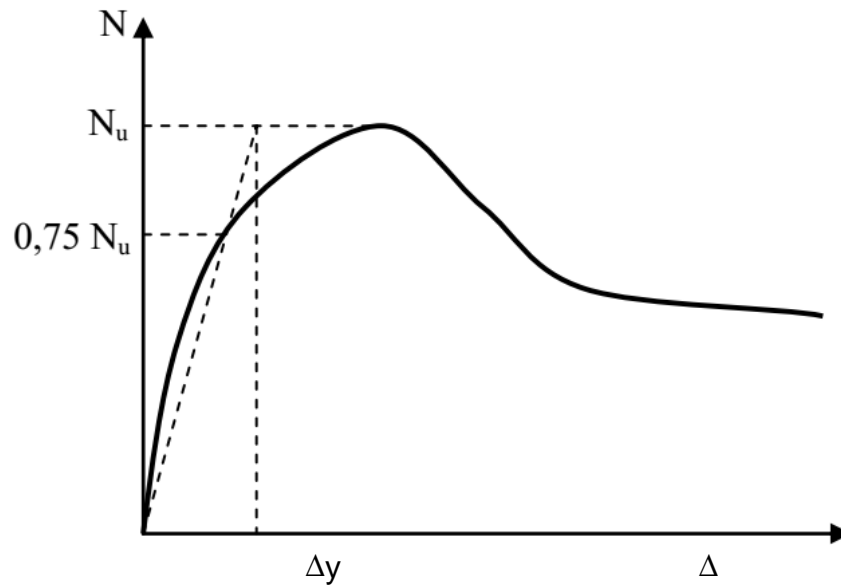
Menurut SNI 1726-2019, daktilitas merupakan kemampuan struktur mengalami simpangan pasca elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang mengakibatkan terjadinya pelelehan pertama, dan mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur tersebut masih berdiri, meskipun dalam keadaan di ambang keruntuhan. Adapun faktor daktilitas yakni perbandingan antara simpangan maksimum struktur pada saat mencapai kondisi di ambang keruntuhan dan simpangan struktur gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama di dalam struktur gedung.

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk berdeformasi secara *inelastis* tanpa mengalami penurunan kekuatan secara signifikan sebelum mencapai keruntuhan dan sifat daktilitas struktur menunjukkan jumlah energi yang mampu diserap oleh struktur. (Park dan Ang, 1985).

Williams et.al (1997) menjelaskan bahwa daktilitas adalah kemampuan struktur untuk tidak mengalami keruntuhan secara tiba-tiba atau bersifat getas, namun dapat mengalami deformasi yang cukup besar pada saat mencapai beban maksimum sebelum struktur tersebut mengalami keruntuhan. Untuk struktur yang mengalami gaya gempa, nilai daktilitas dinyatakan sebagai perbandingan antara perpindahan pada saat kondisi ultimate dan perpindahan pada saat leleh:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Foster et.al (1997) menerangkan bahwa nilai perpindahan pada saat leleh ( $\Delta_y$ ) ditentukan berdasarkan aturan 3/4 seperti pada Gambar 12.



**Gambar 12.** Penentuan nilai  $\Delta_y$

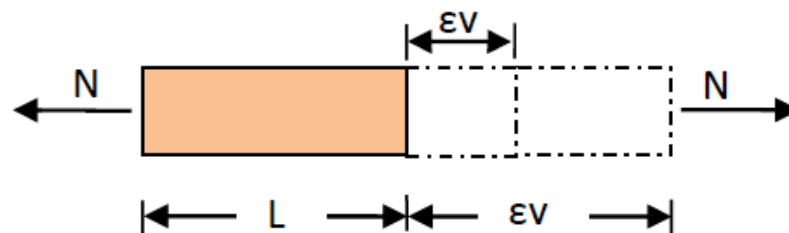
Sedangkan, menurut Paulay & Priestley (1992) untuk metode analisis nilai daktilitas dapat diperoleh dengan cara berikut:

1. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Daktilitas regangan ( $\mu_\epsilon$ ), nilai daktilitas diperoleh dari hasil perbandingan regangan maksimum ( $\epsilon_u$ ) dengan regangan leleh ( $\epsilon_y$ ) pada balok dibawah pembebanan aksial tarik atau tekan.

$$\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$$

Seperti terlihat pada gambar berikut:



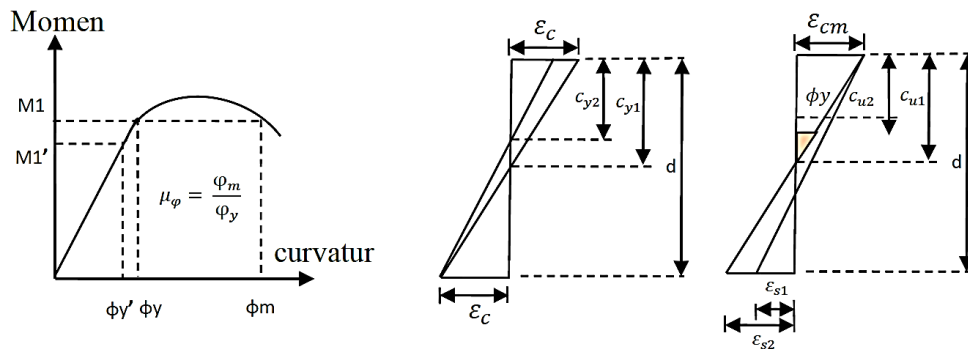
**Gambar 13.** Daktilitas regangan

## 2. Daktilitas Kelengkungan (*Curvature Ductility*)

Daktilitas kelengkungan ( $\mu_\phi$ ), nilai daktilitas diperoleh dari rasio antara sudut kelengkungan (putaran sudut per unit panjang) maksimum ( $\phi_u$ ) dengan sudut kelengkungan leleh ( $\phi_y$ ) dari suatu elemen yang mengalami gaya lentur.

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$$

Dimana  $\phi$  = sudut kelengkungan (putaran sudut per unit panjang)



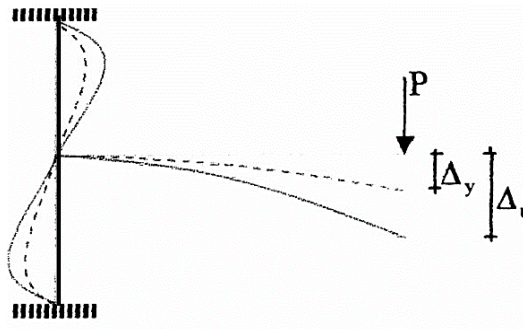
**Gambar 14.** Daktilitas kelengkungan

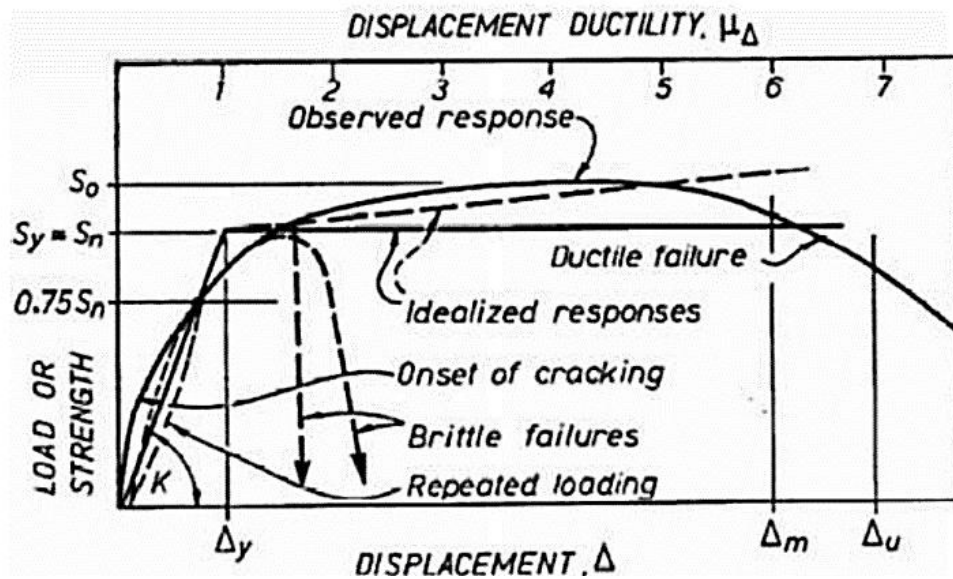
## 3. Daktilitas Perpindahan (*Displacement Ductility*)

Daktilitas perpindahan ( $\mu_\Delta$ ), nilai daktilitas diperoleh dari perbandingan antara perpindahan struktur ultimate ( $\Delta_u$ ) pada arah lateral terhadap perpindahan struktur saat leleh ( $\Delta_y$ ).

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Seperti terlihat pada gambar berikut :





**Gambar 15.** Daktilitas perpindahan

## 2.5. Sika Grout 215 (new)

Sika Grout 215 merupakan material grouting yang sering digunakan untuk menyambung antar bagian beton pracetak karena peningkatan kekuatan yang lebih cepat, nilai penyusutan yang masih dapat di tolerir, bersifat tidak korosi dan mutu bahan yang tinggi. Dari deskripsi penggunaan material, untuk 25 kg sika grout dicampurkan dengan 4 liter air (air per sika grout = 16% dari berat sika grout), pengadukan dilakukan selama 3 menit hingga campuran homogen. Biarkan campuran selama 25 menit hingga campuran mengencer dengan sendirinya, tuangkan material grout ke cetakan. Metode perawatan sebaiknya menggunakan karung goni selama 3 hari setelah pengecoran. Adapun spesifikasi material sebagai berikut dapat dilihat pada Tabel 1:

Tabel 1. Spesifikasi data Sika Grout 215 (new)

<b>INFORMASI PRODUK</b>			
<b>Kemasan</b>	25 kg		
<b>Penampilan / Warna</b>	Bubuk / Abu-abu		
<b>Waktu Penyimpanan</b>	9 bulan dari tanggal produksi jika disimpan dalam kantong asli tertutup yang tidak rusak dan belum dibuka		
<b>Kondisi Penyimpanan</b>	Disimpan dalam kondisi kering antara 10°C – 30°C		
<b>Berat Isi</b>	~ 2.26 kg/Liter		
<b>INFORMASI TEKNIS</b>			
<b>Kuat Tekan</b>	1 hari 3 hari 7 hari 28 hari	~ 25,0 N/mm <sup>2</sup> ~ 40,0 N/mm <sup>2</sup> ~ 52,0 N/mm <sup>2</sup> ~ 65,0 N/mm <sup>2</sup>	(ASTM C-109)
<b>Kuat Lentur</b>	28 hari	> 6.0 N/mm <sup>2</sup>	(ASTM C-348)
<b>Daya Rekat</b>	28 hari  28 hari	> 1,5 N/mm <sup>2</sup> Kegagalan beton, di atas permukaan beton yang kasar > 2,5 N/mm <sup>2</sup> Di atas permukaan nat tua yang diperkeras secara mekanis	
<b>Ekspansi</b>	1 – 3 jam (pada 27° C)	0,30 – 1,40 %	(ASTM C-940)
<b>INFORMASI APLIKASI</b>			
<b>Perbandingan campuran</b>	4,0 Liter per 25 kg kantong (air per bubuk =16% berdasarkan berat)		
<b>Pemakaian</b>	~ 1,940 kg/m <sup>3</sup> dari mortar		
<b>Penggunaan Air</b>	~ 12,80 Liter dari 25 kg kantong		
<b>Ketebalan Lapisan</b>	Rekomendasi ketebalan 20 – 100 mm		
<b>Kemampuan Mengalir</b>	Flow cone (mm)	240 – 280 mm	(ASTM C230/230M)
<b>Suhu produk</b>	< 30°C		
<b>Suhu Udara Sekitar</b>	10°C – 35°C		
<b>Suhu Substrat</b>	10°C – 35°C		
<b>Pot Life</b>	25 menit		
<b>Setting Time</b>	4 – 8 jam		

Sumber : Katalog Produk Sika Grout 215 (new), PT. Sika Indonesia

## 2.6. Penelitian Sebelumnya

Ruminsar Simbolon, Herman Parung, Rita Irmawaty, A.A. Amiruddin (2021) dalam penelitiannya tentang perilaku sambungan model takikan lurus rangkap pada hubungan balok – kolom beton pracetak, akibat beban lateral siklik menyimpulkan bahwa jenis sambungan model takikan lurus rangkap memenuhi persyaratan sebagai sambungan balok – kolom pracetak tahan momen dan dapat dengan aman diterapkan pada bangunan beton bertulang pracetak dengan resiko gempa tertinggi.

Masdiana, Herman Parung, M. Wihardi Tjaronge, Rudy Djamaluddin (2018) pada penelitian tentang perilaku join balok-kolom beton pracetak dan sambungan balok di daerah kritis dengan beban siklik. Berdasarkan penelitian disimpulkan bahwa perilaku join pracetak yang terbaik yakni BTK-40 dan berdasarkan analisis faktor koreksi join pracetak terhadap join monolit untuk fungsi kekuatan terhadap daktilitas parsial  $P_{o \text{ pracetak}} = 3,34 P_{o \text{ monolit}}$  dan fungsi kekuatan terhadap daktilitas penuh dinyatakan sebagai  $P_{o \text{ pracetak}} = 2,47 P_{o \text{ monolit}}$ .

Mardewi Jamal, Herman Parung, M. Wihardi Tjaronge dan V. Sampebulu (2014). Penelitian ini adalah penelitian eksperimental untuk menyelidiki daktilitas beton pracetak dibandingkan dengan konstruksi monolit pada struktur sambungan balok-kolom yang mengalami pembebanan siklik. Benda uji terdiri dari 2 sambungan balok-kolom, 1 konstruksi pracetak (PC) dan 1 konstruksi monolit (MC) dibuat dengan skala penuh 1: 1. Dimensi kolom adalah 300 x 300 x 2600 mm dan balok 200 x 250 x 1500 mm. Sambungan beton pracetak adalah model lurus,



disambung menggunakan semen nat. Pengujian dilakukan menggunakan kontrol perpindahan, dengan tipe bertahap. Studi ini mengungkapkan bahwa PC memiliki daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan MC. Daktilitas PC,  $\mu = 4.379$ , sedangkan MC,  $\mu = 2.333$