

DISERTASI

**PERILAKU SAMBUNGAN MODEL TAKIKAN LURUS RANGKAP PADA
HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON PRACETAK AKIBAT BEBAN
LATERAL SIKLIK**

***BEHAVIOR OF DUAL STRAIGHT NOTCH CONNECTION MODEL ON
PRECAST CONCRETE BEAM-COLUMN JOINT UNDER CYCLIC
LATERAL LOADING***

**RUMINSAR SIMBOLON
P0800316003**



**PROGRAM DOKTORAL DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

2021

LEMBAR PENGESAHAN

**PERILAKU SAMBUNGAN MODEL TAKIKAN LURUS RANGKAP PADA
HUBUNGAN BALOK KOLOM BETON PRACETAK AKIBAT BEBAN
LATERAL SIKLIK**

Disusun dan diajukan oleh

RUMINSAR SIMBOLON
P0800316003

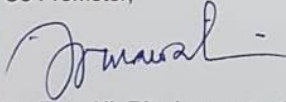
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Doktor Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 5 Februari 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

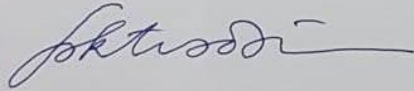
Promotor


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

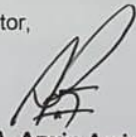
Co Promotor,


Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT
NIP: 19720619 200012 2 001

Ketua Program Studi
S3 Teknik Sipil


Prof. Ir. Sakti Adji A., MS., M.Eng.Sc., Ph.D
NIP: 19640422 199303 1 001

Co Promotor,


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

Dekan Fakultas Teknik/
Universitas Hasanuddin


Prof. Dr. Ir. H. M. Arsyad Thaha, MT
NIP: 19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ruminsar Simbolon
Nomor Mahasiswa : P0800316003
Program Studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 05 February 2021

Yang menyatakan,



Ruminsar Simbolon

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas berkat-Nya yang selalu melimpah, sehingga penelitian yang berjudul **“Perilaku Sambungan Model Takikan Lurus Rangkap Pada Hubungan Balok-Kolom Beton Pracetak Akibat Beban Lateral Siklik”** dapat diselesaikan.

Tulisan ini adalah hasil penelitian yang penulis lakukan terhadap tiga buah sambungan balok kolom. Satu sambungan balok kolom monolit, dan dua sambungan balok kolom pracetak. Sambungan balok kolom pracetak dibedakan pada model sambungannya, yaitu sambungan takik lurus simetris dan sambungan takik lurus unsimetris.

Penelitian adalah *“full scale test”* (pengujian dengan skala penuh). Parameter yang dianalisis dalam tulisan ini adalah perilaku beton pracetak yang meliputi daktilitas, kekakuan, kekuatan, energy disipasi dan pola retak. Hasil yang diperoleh kemudian diperbandingkan terhadap monolit.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyelesaian disertasi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu dengan kerendahan hati, dan dari lubuk hati yang paling dalam, penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang tulus kepada Bapak Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng selaku promotor, Ibu Dr. Eng. Rita Irmawaty, S.T., M.T selaku Co-Promotor dan Bapak Dr. Eng. Arwin Amiruddin, S.T., M.T selaku Co-Promotor yang telah banyak meluangkan waktu membimbing penulis sejak penulisan proposal sampai dengan penyelesaian disertasi ini.

Penghargaan dan terima kasih, juga penulis sampaikan kepada Bapak Prof.Dr. M. Wihardi Tjaronge,ST.,M.Eng, Prof.Dr.Eng. Rudi Djamaluddin,S.T.,M.Eng, Dr.Ir.Abdul Rachman Djamaluddin,.M.T, Ir.H.Achmad Bakri Muhiddin,.M.Sc,.Ph.D selaku penguji internal dan Prof.

Dr. Ir. Ellen Joan Kumaat M.Sc., DEA selaku penguji eksternal yang telah memberikan saran dan arahan demi kesempurnaan disertasi ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan penulis sampaikan pula kepada :

1. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi melalui Proyek BUDI DN yang telah mendukung pembiayaan penulis selama mengikuti program pendidikan doktor.
2. Rektor Universitas Hasanuddin, Direktur, Asisten Direktur, dan staf Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah menerima dan memberikan dukungan fasilitas selama penulis mengikuti program doktor.
3. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Ketua Jurusan Teknik Sipil, Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil, dosen dan staf yang telah memberikan bimbingan, kemudahan, fasilitas dan pelayanan administrasi selama penulis mengikuti program pendidikan doktor.
4. Rektor Universitas Mulawarman Samarinda beserta para pembantu Rektor yang telah memberikan rekomendasi dan senantiasa memberikan motivasi selama mengikuti pendidikan doktor.
5. Dekan Fakultas Teknik Universitas Mulawarman, Ketua Program Studi Teknik Sipil beserta rekan-rekan dosen dan staf fakultas teknik dalam lingkup Universitas Mulawarman atas pengertian dan kerjasamanya selama penulis mengikuti pendidikan doktor.
6. Rekan-rekan mahasiswa program doktor S.3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, khususnya angkatan 2016 yang selama ini memberikan dukungan moril guna penyelesaian studi penulis.
7. Adik-adik mahasiswa program S.1 dan S.2 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin yang menjadi anggota Tim Peneliti penulis yang selama ini telah bekerja sama dalam proses penelitian di laboratorium Struktur dan Rekayasa Gempa Jurusan Sipil.
8. Semua pihak yang telah memberikan bantuan kepada penulis baik moril maupun materil yang penulis tak dapat sebutkan satu persatu.

Ucapan terima kasih dan doa kepada Tuhan Yang Maha Kuasa untuk almarhum Ayahanda dan Ibunda tercinta, kiranya mereka diterima disisi-Nya. Dan Ucapan terima kasih yang tulus kepada istri tercinta Rettauli Nainggolan, S.E beserta anak-anak tercinta, Tara, Gian dan Etama, yang telah memberikan doa, dukungan moril dan materil.

Penulis mendoakan semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas semua bentuk bantuan, nasehat, bimbingan dan motivasinya. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa disertasi ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga dengan senang hati membuka diri untuk menerima segala sumbangan pemikiran berupa kritikan inovatif dan saran yang konstruktif guna pengembangan kelimuan bagi kepentingan masyarakat luas. Semoga disertasi ini dapat berguna bagi kita semua, terutama bagi penulis sendiri. Amin.

Makassar, 05 February 2021

Ruminsar Simbolon

ABSTRAK

RUMINSAR SIMBOLON. **PERILAKU SAMBUNGAN MODEL TAKIKAN LURUS RANGKAP PADA HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON PRACETAK AKIBAT BEBAN LATERAL SIKLIK** (dibimbing oleh Herman Parung, Rita Irmawati dan Arwin Amiruddin).

Penelitian ini merupakan studi eksperimental pada hubungan balok kolom pracetak dengan sambungan model takikan lurus rangkap, bertujuan untuk menganalisis pola retak, karakteristik *hysteresis loop*, pengaruh sambungan pracetak terhadap nilai kekakuan, daktilitas dan kekuatan. Benda uji terdiri dari 3 model, dengan dimensi penampang balok 250 mm x 300 mm dan kolom 300 mm x 300 mm. Dari ketiga model tersebut, 2 benda uji merupakan sambungan balok kolom pracetak dan 1 benda uji sambungan balok kolom monolit. Sambungan pada balok ditempatkan sejarak h_b (tinggi balok) dari muka kolom. Dimensi takikan ditentukan berdasarkan gaya geser yang bekerja pada balok, sedangkan jumlah tulangan ditentukan berdasarkan analisa bangunan 5 (lima) lantai, dengan asumsi sebagai struktur monolit. Sambungan dibedakan pada daerah penyambungannya dengan 2 model yang berbeda yaitu sambungan takik simetris (STR-1) dan sambungan takik unsimetris (STR-2). Beban yang diberikan adalah beban lateral siklik yang mewakili beban gempa, pengujian dengan metode *displacement control* yang ditingkatkan secara bertahap mengacu pada standar pengujian SNI 7834:2012. Hasil pengujian yang diperoleh menunjukkan bahwa rangkaian balok-kolom beton pracetak memperlihatkan perilaku yang tidak jauh berbeda dengan rangkaian yang monolit. Pola retak yang terjadi pada balok adalah retak lentur, berada pada daerah potensi sendi plastis. Sedangkan pola retak pada kolom adalah retak lentur-geser. karakteristik sambungan balok beton pracetak yang dikaji tidak mempengaruhi lokasi pembentukan sendi

plastis, namun hanya mempersempit daerah sendi plastis yang terjadi pada balok. Karakteristik *hysteresis loop* pada sambungan pracetak menunjukkan kurva yang hampir sama dengan sambungan monolit yaitu semakin meningkat seiring dengan penambahan beban dan *displacement*. Berdasarkan hasil pengujian, ketiga sambungan pracetak mempunyai kinerja yang memuaskan akibat beban siklik, karena memenuhi semua kriteria minimum yang dipersyaratkan pada SNI 7834;2012 tentang kriteria penerimaan benda uji, sehingga dapat digunakan pada sistem struktur penahan gempa beton bertulang pracetak dengan Kategori Disain Seismik (KDS) D, E, atau F. Selain itu, kurva histeresis P-d yang diperoleh memperlihatkan bentuk yang tetap stabil, tidak memperlihatkan fenomena slip dan pinching. Sambungan monolit (STR-0) menunjukkan perilaku yang lebih baik pada pembebanan arah dorong (+) karena memiliki nilai daktilitas dan kekuatan yang lebih tinggi dari benda uji yang lain. Sedangkan pada pembebanan arah tarik (-) model sambungan takik simetris (STR-1) menunjukkan perilaku yang lebih baik. Tetapi secara umum, benda uji sambungan takik unsimetris (STR-2) menunjukkan tingkat kekuatan yang hampir sama sampai akhir pengujian antara pembebanan arah dorong (+) dan pembebanan arah tarik (-).

Kata kunci: beton pracetak, join balok kolom, beban siklik, sambungan takikan rangkap

ABSTRACT

RUMINSAR SIMBOLON. ***BEHAVIOR OF DUAL STRAIGHT NOTCH CONNECTION MODEL ON PRECAST CONCRETE BEAM-COLUMN JOINT UNDER CYCLIC LATERAL LOADING*** (promoted by Parung, Herman; Irmawati, Rita and Amiruddin, Arwin).

This research is an experimental study on precast beam-column joints that are connected by double straight notch models aims to analyze crack patterns, characteristic of hysteresis loop, influence of precast connection on the value of stiffness, ductility and strength. The specimen consists of three models, with dimensions of beams 250 mm x 300 mm and columns 300 mm x 300 mm. Of the three models, two are precast beam-column connections and one connection are monolithic beam columns. Connections are placed in the plastic joint area, which is expected to experience destruction first. Notch dimensions are determined based on shear forces acting on the beam, while the number of reinforcement is determined based on the analysis of a five-storey building, assuming as monolithic structure. The connections are distinguished in their connecting regions, with 2 different models, namely the symmetrical notch (STR-1) connection and the unsymmetric notch (STR-2) connection. The load given is cyclic lateral load which represents earthquake load, testing using displacement control method with gradual type with SNI 7834: 2012 testing standard. The crack pattern that occurs in the beam is flexural

cracks, located in the plastic hinge area. Whereas the crack pattern on the column is flexural-shear crack. Characteristics of hysteresis loops in precast connections show that is almost same as monolith connection curve which are increasing with increasing load and displacement. Based on the test results, the three connection models have satisfactory performance under cyclic load, because it meets all the minimum criteria required in SNI 7834; 2012, acceptance criteria for moment frame-based on structural testing, so all three specimen can be used in system of earthquake resistant building structure with Seismic Design Categories (KDS) D, E, or F. The unsymmetric notch connection (STR-2) shows better behavior when loaded in forward cycle (+) because it has a higher ductility and strength value than other test specimens. Whereas the symmetrical notch (STR-1) shows better behavior when loaded . But in general, the unsymmetrical notch joint (STR-2) test specimen shows a level of same strength until the end of the test between the loading in forward cycle (+) and in reverse cycle (-).

Keywords: precast concrete, join column beams, cyclic loads, double notch joints.

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR NOTASI	xviii

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Pracetak.....	6
2.1.1 Pengertian Beton Pracetak.....	6
2.1.2 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beton Pracetak.....	6
2.2 Perilaku Struktur (Structural Properties).....	7
2.2.1 Kekakuan (Stiffness).....	8
2.2.2 Kekuatan (Strength)	9
2.2.3 Daktilitas (Ductility)	10
2.2.4 Titik leleh (Yield point)	13
2.3 Kriteria Penerimaan Struktur Bangunan Tahan Gempa	16

2.4 Pertemuan Balok-Kolom	19
2.4.1 Prototip Sambungan Balok-Kolom	19
2.4.2 Joint Balok-Kolom	20
2.4.3 Jenis-jenis Sambungan Balok-Kolom	21
2.4.4 Sambungan Pracetak	22
2.5 Beban Siklik (Cyclic Load)	22
2.5.1 Definisi Beban Siklik	22
2.5.2 Perilaku Material Siklik (Cyclic Material Behaviour)	23
2.5.3 Perilaku Histeresis Beban Siklik (Cyclic Hysteresis Behaviour)	24
2.6 Jenis Retak	24
2.7 Penelitian Mengenai Sambungan Balok Kolom Pracetak	25
2.8 Bentuk - Bentuk Sambungan Balok Kolom Pracetak	30
2.9 Kerangka Pikir Penelitian.....	31

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	33
3.2 Bahan dan Alat	33
3.3 Benda Uji Sambungan Balok Kolom	34
3.3.1 Model benda uji Sambungan Takikan Rangkap	34
3.3.2 Dimensi benda uji sambungan balok kolom	36
3.4 Tahap Penelitian	37
3.4.1 Tahap Persiapan	37
3.4.2 Tahap Pembuatan Benda Uji	38
3.4.3 Tahap Pengujian	38
3.4.4 Tahap Analisis Data	41
3.4.5 Bagan Alir Penelitian	42

BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Material	44
4.1.1 Komposisi Material	44
4.1.2 Pengujian Kuat Tekan	44
4.1.3 Kuat Lentur Beton	45

4.1.4	Kuat Tekan Mortar	46
4.1.5	Kuat Tarik Tulangan	47
4.2	Pola Retak	48
4.2.1	Pola retak benda uji STR-0	48
4.2.2	Pola retak benda uji STR-1	49
4.2.3	Pola retak benda uji STR-2	51
4.3	Hubungan Beban-Lendutan	53
4.3.1	Hubungan Beban-Lendutan STR-0	54
4.3.2	Hubungan Beban-Lendutan STR-1	55
4.3.3	Hubungan Beban-Lendutan STR-2	57
4.3.4	Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan	58
4.4	Beban Leleh dan Perpindahan Leleh	60
4.5	Beban Runtuh dan Perpindahan Runtuh	64
4.6	Daktilitas	66
4.7	Evaluasi Kriteria Penerimaan	69
4.7.1	Kekakuan awal	69
4.7.2	Kolom kuat balok lemah (strong column weak beam)	73
4.7.3	Degradasi kekuatan	76
4.7.4	Degradasi Kekakuan	79
4.7.5	Energy disipasi	84
4.8	Novelti	88

BAB V. PENUTUP

5.1	Kesimpulan	89
5.2	Saran	90

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Bahan dan alat	31
Tabel 3.2	Model Sambungan Balok Kolom	32
Tabel 3.3	Dimensi balok dan kolom	35
Tabel 4.1	Komposisi Beton	42
Tabel 4.2	Kuat Tekan Beton Silinder	43
Tabel 4.3	Kuat Lentur Beton Normal	44
Tabel 4.4	Kuat Tekan Grouting	44
Tabel 4.5	Kuat Tarik Tulangan	45
Tabel 4.6	Ringkasan Data Hasil Pengujian	46
Tabel 4.7	Perbandingan tingkat kekuatan terhadap monolit	57
Tabel 4.8	Beban leleh dan perpindahan leleh	59
Tabel 4.9	Beban dan perpindahan runtuh STR-2	60
Tabel 4.10	Daktilitas benda uji	61
Tabel 4.11	Pemenuhan syarat tahanan lateral minimum	64
Tabel 4.12	Perbandingan nilai tahanan lateral minimum terhadap monolit	64
Tabel 4.13	Pemenuhan syarat kolom kuat balok lemah	68
Tabel 4.14	Perbandingan nilai tahanan lateral maksimum terhadap monolit	68
Tabel 4.15	Pemenuhan syarat degradasi kekuatan	70
Tabel 4.16	Pemenuhan syarat degradasi kekakuan	73
Tabel 4.16	Energi disipasi benda uji	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Hubungan beban-lendutan pada beton bertulang	8
Gambar 2.2	Definisi daktilitas kelengkungan	11
Gambar 2.3	Hubungan Momen, <i>Curvature</i> , dan Lendutan Pada Struktur Kantilever	11
Gambar 2.4	Titik leleh kurva Beban-displacemen (Chen et al).....	12
Gambar 2.5	Titik leleh kurva Beban-displacemen (Mander).....	13
Gambar 2.6	Titik leleh kurva Beban-displacemen (Park.R).....	14
Gambar 2.7	Titik leleh kurva Beban-displacemen (ECCS).....	15
Gambar 2.8	Besaran untuk evaluasi kriteria penerimaan	16
Gambar 2.9	Disipasi Energi Relatif	16
Gambar 2.10	Bidang Momen Akibat Beban Lateral	17
Gambar 2.11	Gaya-gaya pada beam-column joint	18
Gambar 2.12	Sistim Penulangan pada beam-column joint	19
Gambar 2.13	Perilaku Material Siklik (Amobi, 2008)	21
Gambar 2.14	Perilaku <i>Hysteresis</i> Beban Siklik (Amobi, 2008)	22
Gambar 2.15	Jenis Retakan Pada Beton	22
Gambar 2.16	Sambungan pracetak sistem Diamond Belt	28
Gambar 2.17	Sistem Modified JHS Column Beam Slab	28
Gambar 2.18	Sambungan pracetak sistem Platcon	28
Gambar 2.19	Sambungan pracetak sistem Tricon	29
Gambar 2.20	Sambungan pracetak sistem Waskita	29
Gambar 3.1	Model Sambungan Balok Kolom	33
Gambar 3.2	Penulangan sambungan monolit (STR-0)	33
Gambar 3.3	Penulangan sambungan STR-1	33
Gambar 3.4	Penulangan sambungan STR-2	34
Gambar 3.5	Siklus pembebanan berdasarkan SNI 7834:2012	37
Gambar 3.6	Model pembebanan	38
Gambar 3.7	<i>Set – up</i> benda uji	39

Gambar 4.1	Pola retak benda uji STR-0	47
Gambar 4.2	Pola retak benda uji STR-1	49
Gambar 4.3	Pola retak benda uji STR-2	50
Gambar 4.4	Hubungan Beban-Lendutan STR-0	52
Gambar 4.5	Hubungan Beban-Lendutan STR-1	54
Gambar 4.6	Hubungan Beban-Lendutan STR-2	55
Gambar 4.7	Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan	57
Gambar 4.8	Tingkat kekuatan benda uji	57
Gambar 4.9	Kurva beban leleh dan perpindahan leleh STR-0	58
Gambar 4.10	Kurva beban leleh dan perpindahan leleh STR-1	58
Gambar 4.11	Kurva beban leleh dan perpindahan leleh STR-2	59
Gambar 4.12	Beban runtuh STR-2	60
Gambar 4.13	Gaya leleh dan perpindahan leleh STR-0	62
Gambar 4.14	Gaya leleh dan perpindahan leleh STR-0	63
Gambar 4.15	Gaya leleh dan perpindahan leleh STR-0	63
Gambar 4.16	Kurva kolom kuat balok lemah STR-0	66
Gambar 4.17	Kurva kolom kuat balok lemah STR-1	67
Gambar 4.18	Kurva kolom kuat balok lemah STR-2	67
Gambar 4.19	Degradasi kekuatan monolit (STR-0)	69
Gambar 4.20	Degradasi kekuatan STR-1	69
Gambar 4.21	Degradasi kekuatan STR-2	69
Gambar 4.22	Degradasi kekakuan monolit (STR-0)	71
Gambar 4.23	Degradasi kekakuan STR-1	71
Gambar 4.24	Degradasi kekakuan STR-2	72
Gambar 4.25	Energi Total dan Energi Disipasi STR-0	75
Gambar 4.26	Energi Total dan Energi Disipasi STR-1	75
Gambar 4.27	Energi Total dan Energi Disipasi STR-2	76
Gambar 4.28	Energi disipasi fungsi drift ratio	76
Gambar 4.29	Ratio energi disipasi relatif	77

DAFTAR NOTASI

R	=	Faktor reduksi gempa
P	=	Beban
P_y	=	Beban leleh
P_u	=	Beban terfaktor ultimit
A	=	Luas penampang
μ	=	Daktilitas
ϕ_u	=	Kelengkungan batas
ϕ_y	=	Kelengkungan leleh
δ_u	=	Lendutan batas
δ_y	=	Lendutan leleh
ξ	=	Ratio kekakuan
ε	=	Ratio kekuatan
e_y	=	Displacement leleh
V_n	=	Gaya geser nominal
L	=	Panjang Balok
B	=	Lebar Balok
H	=	Tinggi Balok
E_c	=	Modulus Elastisitas Beton
E_s	=	Modulus Elastisitas Baja
I	=	Momen Inertia
M_{cr}	=	Momen retak
M_u	=	Momen runtuh
M_y	=	Momen leleh
f'_c	=	Kuat tekan silinder beton
f_y	=	Tegangan leleh baja

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banyak studi laboratorium dan analisis telah dilakukan untuk meningkatkan respon sambungan struktur beton bertulang pracetak di bawah pengaruh beban gempa. Pada studi sebelumnya, sebagian besar sambungan menggunakan material baja atau beton bertulang yang dipadu dengan bahan aditif mutu tinggi sebagai grouting. Beberapa desain sambungan juga lebih mempertimbangkan pada peningkatan kinerja struktural tanpa memperhatikan faktor ekonomisnya. Perlu diketahui bahwa beban gempa adalah perpindahan berorientasi di alam di mana gaya yang bekerja pada struktur dipengaruhi oleh kekuatan dan kekakuan. Dalam situasi seperti itu, jika kekuatan dan kekakuan kondisi layanan tidak mencukupi, struktur akan cenderung untuk mengalami deformasi yang berlebihan, yang juga akan diikuti oleh timbulnya retak utama.

Dewasa ini pemenuhan tuntutan kecepatan pembangunan bangunan konstruksi menjadi salah satu kriteria bonafiditas penyedia jasa konstruksi. Hal ini disebabkan oleh lahan yang sempit atau lokasi dengan lalu lintas padat pada daerah perkotaan. Untuk memenuhi hal tersebut diperlukan rancangan struktur yang dapat dilaksanakan dengan cepat, aman dan bila dimungkinkan dengan harga yang murah. Beton pracetak merupakan solusi dari tuntutan pembangunan struktur yang hemat waktu, namun belum dapat dipakai secara luas karena kehandalan sambungan antara elemen-elemennya masih merupakan suatu kendala, terutama terhadap beban gempa.

Struktur beton pracetak umumnya direncanakan dengan menganggap struktur tersebut bersifat seperti struktur monolit yang dicor di tempat. Metoda desain seperti ini disebut sebagai pendekatan desain emulasi (Warnes, 1992). Berkenaan dengan hal tersebut para perencana harus menunjukkan dengan analisa dan hasil pengujian bahwa struktur mempunyai perilaku, kekuatan dan kekakuan yang ekuivalen dengan beton bertulang monolit.

Sambungan selain berfungsi menyalurkan gaya yang bekerja, juga harus mampu berfungsi menyatukan masing masing komponen beton pracetak menjadi satu kesatuan yang monolit, sehingga stabilitas struktur bangunannya terjaga. Jika sambungan tidak direncanakan dengan baik (segi penempatan maupun kekuatannya) maka 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”. Sambungan ditempatkan pada balok penghubung dengan kolom. Hubungan antar balok penghubung dan balok precast melalui tulangan jenis sambungan lewatan yang diperkuat dengan takikan beton. tulangan kemudian diisi dengan bahan grouting dari jenis tidak susut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan permasalahan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pola retak pada tipe sambungan balok-kolom pracetak model takikan lurus rangkap simetris dan unsimetris dengan pembebanan siklik?
2. Bagaimana karakteristik hysteresis loop hubungan beban displacement dengan displacement kontrol sambungan balok-kolom pracetak model takikan lurus rangkap simetris dan unsimetris akibat beban siklik?

3. Bagaimana pengaruh sambungan pracetak terhadap nilai kekakuan dan kekuatan akibat pembebanan siklik?
4. Bagaimana tingkat kinerja sambungan pracetak terhadap kriteria penerimaan benda uji sebagai sistim struktur rangka pemikul momen sesuai SNI 7834 tahun 2012, dan ACI 374.1-05

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dapat dikemukakan sebagai berikut:

1. Menganalisis pola retak pada tipe sambungan pracetak model takikan lurus rangkap simetris dan unsimetris dengan pembebanan siklik.
2. Menganalisis karakteristik hysteresis loop hubungan beban-displacement sambungan balok kolom pracetak akibat beban siklik.
3. Menganalisis pengaruh sambungan pracetak terhadap nilai daktilitas, kekakuan dan kekuatan akibat pembebanan siklik.
4. Menemukan tingkat kinerja sambungan pracetak sebagai sistim struktur rangka pemikul momen sesuai SNI 7834 tahun 2012, dan ACI 374.1-05

1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian dapat dikemukakan sebagai berikut:

1. Melakukan uji eksperimental untuk mengetahui perilaku sambungan balok kolom pracetak terhadap 3 (tiga) benda uji yakni 2 (dua) buah sambungan balok kolom pracetak dan 1 (satu) buah sambungan balok kolom monolit.
2. Melakukan analisis untuk membandingkan perilaku struktur pada ketiga jenis benda uji tersebut.

Penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Beton yang direncanakan adalah beton pracetak dan beton konvensional dengan mutu beton (f'_c) 25 MPa dan rencana campuran

beton berdasarkan SNI 03-2847-2013.

2. Wilayah sambungan beton pracetak ditempatkan sejarak hb (tinggi balok) dari muka kolom, pada daerah potensial terjadi sendi plastis.
3. Pemodelan kondisi batas pada benda uji dilakukan mengikuti pola deformasi portal akibat beban lateral, dimana momen nol pada kolom terletak pada daerah tengah kolom antar lantai, dan momen nol pada balok terjadi ditengah bentang.
4. Preliminary desain dihitung berdasarkan perencanaan gedung 5 (lima) Lantai sebagai struktur rangka pemikul momen khusus, yang kemudian digunakan untuk mendisain dimensi beton dan tulangan pada benda uji dengan skala 1 : 1.
5. Gaya puntir diabaikan
6. Jumlah struktur Sambungan Balok Kolom (STR) adalah tiga buah. Satu untuk sambungan balok kolom monolit dan dua untuk sambungan balok kolom pracetak. Ketiga jenis konstruksi pracetak dibedakan atas 2 (dua) model pada bagian koneksinya, yakni:
 - a. sambungan takik simetris (STR-1)
 - b. dan sambungan takik unsimetris (STR-2).
4. Beban yang diberikan adalah beban dinamis, berupa beban lateral siklik.
5. Uji eksperimental dengan “full scale test”.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan:

1. Memberikan gambaran kemampuan masing-masing sambungan untuk digunakan pada sistem struktur rangka pemikul momen beton bertulang pracetak terhadap seluruh Kategori Disain Seismik (KDS), meliputi KDS A, B, C sampai dengan F;
2. Menambah khasanah model sambungan pracetak yang sudah ada untuk diterapkan pada dunia konstruksi.

3. Sebagai referensi pada penelitian selanjutnya terhadap perilaku struktur sambungan beton pracetak dalam menerima beban siklik.

1.6 Sistematika Penulisan

Bab I Pendahuluan

Dalam bagian ini diuraikan mengenai hal-hal yang melatarbelakangi penelitian ini, dilanjutkan dengan uraian rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup dan batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini diuraikan secara sistimatis tentang teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian ini. Bagian ini memberikan kerangka dasar yang konfrehensif mengenai konsep, prinsip atau teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

BAB III Metode Penelitian

Pada bagian ini menjelaskan rancangan penelitian, waktu dan lokasi penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian, metode analisisnya serta bagan alir penelitian.

BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada bagian ini menguraikan hasil uji penelitian baik hasil uji material maupun hasil uji sampel, dan kemudian dianalisis dan dibahas.

BAB V Penutup

Pada bagian ini menjelaskan kesimpulan yang dicapai dari penelitian serta menguraikan saran-saran yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Pracetak

2.1.1 Pengertian Beton Pracetak

Beton pracetak atau beton precast adalah sebuah produk yang terbuat dari material beton yang proses pembuatannya dilakukan di pabrik atau tempat khusus yang terpisah dari lokasi konstruksi. Karena pembuatannya dilakukan di pabrik, kualitasnya tetap terjaga dan mutunya terjamin dengan baik.

Beton ini dibuat berdasarkan cetakan dan ukuran tertentu yang telah menyesuaikan dengan kebutuhan yang ada di lapangan. Begitu beton sudah mencapai umur perawatan dan siap untuk digunakan, beton ini kemudian dikirim ke lokasi konstruksi untuk dipasang. 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).

Pelaksanaan bangunan dengan menggunakan metoda beton pracetak memiliki kelebihan dan kekurangan. Keuntungan metoda pelaksanaan dengan menggunakan beton pracetak ini akan mencapai hasil yang maksimal jika pada proyek konstruksi tersebut tercapai reduksi waktu pekerjaan dan reduksi biaya konstruksi.

2.1.2 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Beton Pracetak

Struktur elemen pracetak memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan struktur konvensional, antara lain:

1. Lebih hemat waktu dalam proses pengerjaan konstruksi karena sudah dibuat secara terpisah.
2. Kualitas yang lebih baik dan terjamin dengan mutu yang sesuai standar.
3. Praktis dan efisien dalam penggunaannya, dimana beton ini hanya tinggal dipasang pada bagian yang dibutuhkan.
4. Ramah lingkungan dan tidak menimbulkan limbah pada lokasi konstruksi.

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

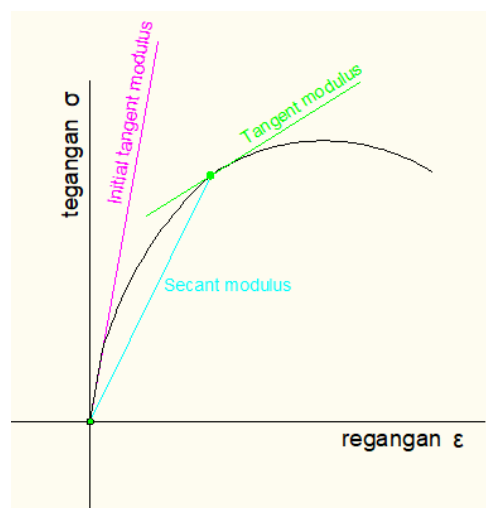
1. Tidak ekonomis bagi produksi tipe elemen yang jumlahnya sedikit,
2. Perlu ketelitian yang tinggi agar tidak terjadi deviasi yang besar antara elemen yang satu dengan elemen yang lain, sehingga tidak menyulitkan dalam pemasangan di lapangan,
3. Panjang dan bentuk elemen pracetak yang terbatas, sesuai dengan kapasitas alat angkat dan alat angkut,
4. Hanya dapat dilaksanakan di daerah yang sudah tersedia peralatan untuk *handling* dan *erection*.
5. Diperlukan ruang yang cukup untuk pekerja dalam mengerjakan sambungan pada beton pracetak,
6. Memerlukan lahan yang luas untuk pabrikasi dan penimbunan (*stock yard*).

2.2 Perilaku Struktur (Structural Properties)

Menurut Paulay & Priestley (1992), sifat spesifik struktural yang perlu dipertimbangkan sehubungan dengan tiga tingkat perlindungan terhadap gempa adalah kekakuan, kekuatan dan daktilitas, dimana nilai tersebut sangat tergantung kepada titik lelehnya.

2.2.1 Kekakuan (*Stiffness*)

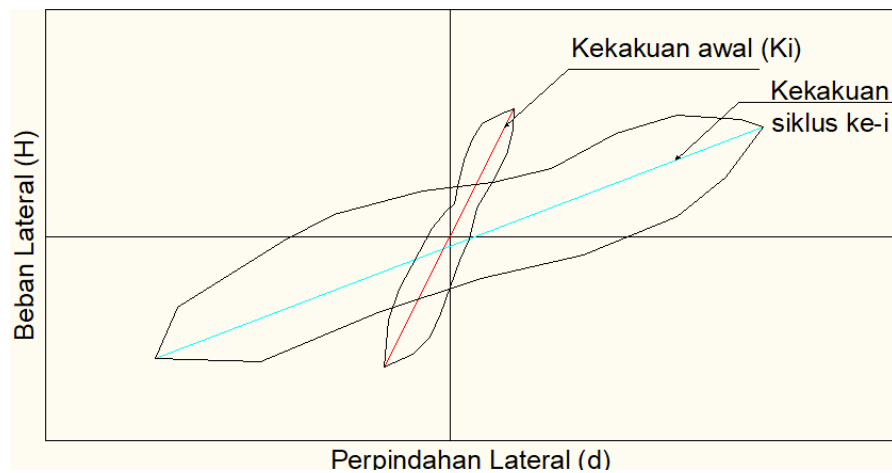
Kekakuan adalah kemampuan material untuk menahan terjadinya deformasi, dan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit displacement. Pembatasan nilai kekakuan berguna untuk menjaga konstruksi tidak melendut melebihi lendutan yang disyaratkan. Tingkat kekakuan suatu material ditunjukkan oleh sudut yang dibentuk oleh tegangan dan regangan pada daerah elastic. Menurut Kenneth-Belanger (1981) kekakuan balok beton merupakan fungsi dari modulus elastis (E) dan momen inersia (I). Modulus elastisitas didefinisikan sebagai perbandingan antara kekuatan (strength) dengan regangan (strain). Lebih lanjut dikenal adanya modulus tangent dan modulus secan ketika ada bagian dari kurva yang berbentuk nonlinear. Modulus tangen adalah kemiringan dari salahsatu tangen (garis singgung) pada kurva tersebut dititik tertentu di sepanjang kurva, misalnya 50% dari kekuatan maksimum beton. Sedangkan modulus secan adalah kemiringan dari suatu garis yang ditarik dari titik asal kurva ke suatu titik pada kurva tersebut disuatu tempat diantara 25% sampai 50% dari kekuatan maksimum beton.



Gambar 2.1 Modulus awal, tangen dan secan

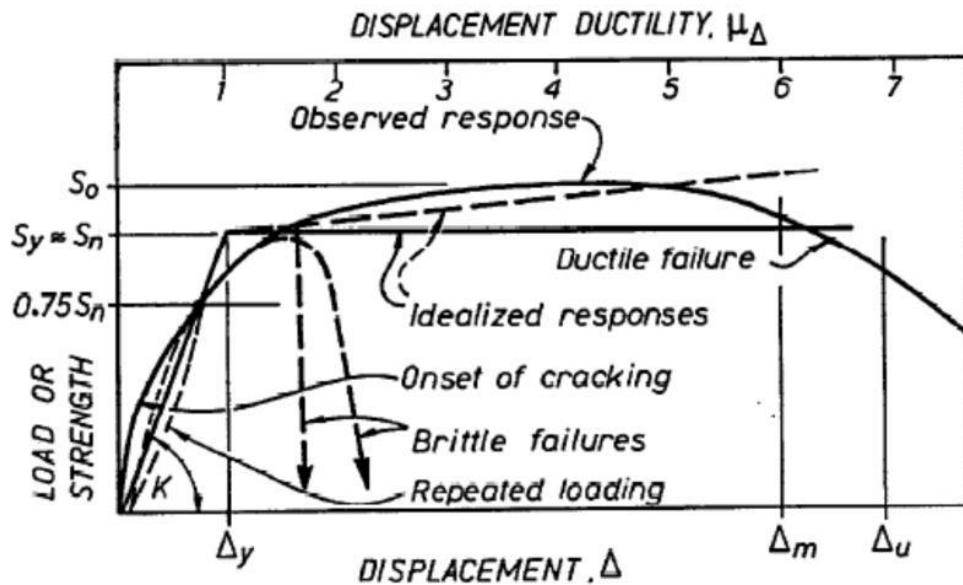
Kekakuan sambungan balok-kolom didefinisikan sebagai peak to peak stiffness, yaitu kemiringan garis dari puncak positif ke negatif, atau lebih dikenal dengan kekakuan secant. Perhitungan kekakuan secant dilakukan berdasarkan kurva histeretik pada cycle ketiga untuk setiap nilai drift ratio.

Kekakuan awal pada kurva hysteretic hasil uji merupakan kekakuan sebelum beton mengalami retak. Perhitungan kekakuan awal dilakukan berdasarkan kurva histeretik pada cycle pertama dengan drift rasio pertama.



Gambar 2.2 Kekakuan awal dan kekakuan siklus ke-i

Sebuah grafik nonlinier yang menggambarkan hubungan antara beban dan perpindahan pada komponen beton bertulang yang mengalami peningkatan perpindahan secara monoton ditunjukkan pada gambar 2.3. Untuk perhitungan desain, salah satu dari dua pendekatan bilinear dapat digunakan, dimana S_y adalah beban pada saat leleh atau beban ideal S_i . Kemiringan linier elastik, $K = S_y / \Delta y$ digunakan untuk mengukur kekakuan.



Gambar 2.3 Hubungan beban-lendutan pada beton bertulang

2.2.2 Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan didefinisikan sebagai kemampuan menerima suatu beban hingga benda mengalami patah (fraktur). Jika struktur beton harus dilindungi terhadap kerusakan selama terjadinya peristiwa seismic, peristiwa inelastic selama respon dinamik harus dicegah. Ini berarti struktur harus memiliki kekuatan yang memadai untuk melawan gaya dalam yang dihasilkan selama respon dinamik elastis struktur. Kapasitas kekuatan puncak struktur diambil dari titik tertinggi dari envelope kurva histeritik pada pembebanan tekan dan tarik

Cara yang tepat untuk mengatasi gempa adalah analisa elastis, berdasarkan sifat kekakuan seperti yang dijelaskan sebelumnya. Gaya gempa dikombinasi dengan gaya akibat beban lain pada struktur seperti gravitasi.

2.2.3 Daktilitas (*Ductility*)

Daktilitas merupakan salah satu aspek penting dalam perencanaan suatu elemen struktur disamping aspek kekuatan dan kekakuan. Pada

saat terjadi gempa, elemen-elemen struktur yang mempunyai daktilitas besar akan menyerap energi lebih banyak dibandingkan dengan elemen-elemen struktur dengan daktilitas kecil atau getas. Daktilitas pada balok beton bertulang didefinisikan sebagai perbandingan suatu parameter deformasi struktur pada saat runtuh terhadap parameter deformasi pada saat tulangan tarik terluar penampang mengalami leleh pertama.

Daktilitas menyatakan suatu kemampuan dari struktur untuk mengalami lendutan pasca-elastis yang besar secara berulang ulang dan bolak-balik sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur gedung tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi di ambang keruntuhan (Park dan Paulay, 1975). Dalam penelitian ini besarnya nilai daktilitas berdasarkan perbandingan antara lendutan ultimit dengan lendutan leleh pertama. Dimana lendutan ultimate dan lendutan leleh pertama di didapatkan dari hasil pengujian sambungan balok kolom.

Pada dasarnya daktilitas dapat ditinjau dari tiga jenis metode perhitungan. Yaitu dari segi regangan (*strain*), kelengkungan (*curvature*), dan lendutan (*displacement*).

1. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Daktilitas regangan adalah kemampuan dari material/ struktur untuk menahan regangan plastis tanpa penurunan yang drastis dari regangan. Dengan kesamaan respon yang ditunjukkan pada Gambar 1. daktilitas regangan dapat didefinisikan sebagai

$$\mu = \frac{\epsilon}{\epsilon_y} \quad (1)$$

Dimana ϵ adalah total regangan yang terjadi dan ϵ_y adalah regangan pada saat leleh. Daktilitas yang sangat berpengaruh pada struktur dapat tercapai pada panjang tertentu pada salah satu bagian dari struktur tersebut. Jika regangan inelastik dibatasi dengan panjang yang sangat pendek, maka akan terjadi penambahan yang besar pada daktilitas

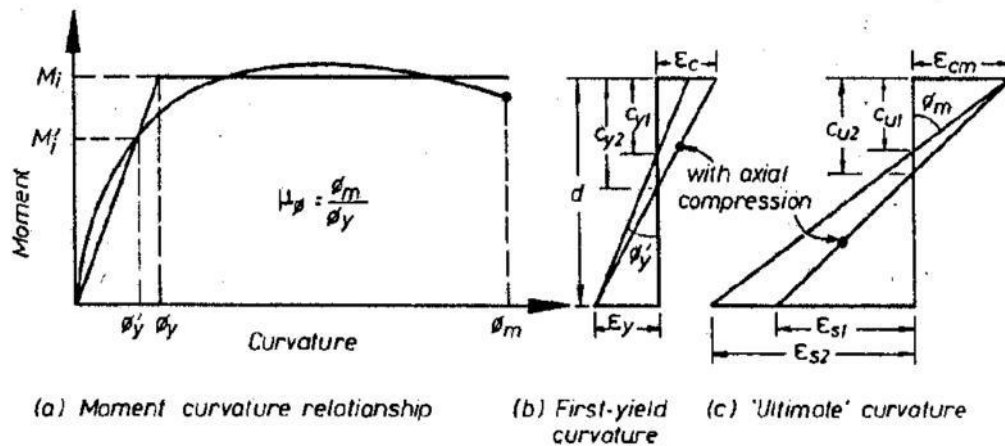
regangan. Daktilitas regangan merupakan daktilitas yang dimiliki oleh material yang digunakan.

2. Daktilitas Kelengkungan (Curvature Ductility)

Pada umumnya yang paling berpengaruh terhadap terjadinya deformasi struktural inelastis adalah rotasi pada daerah yang berpotensi sendi plastis. Oleh karena itu, hal ini berguna untuk menghubungkan bagian rotasi per satuan panjang (*curvature*) sebagai penyebab momen lentur. Daktilitas kelengkungan maksimum dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\mu_{\phi} = \Phi_m / \Phi_y \quad (2)$$

Dimana Φ_m adalah kelengkungan maksimum, dan Φ_y adalah kelengkungan pada saat leleh. Definisi *Curvature Ductility* ini juga dapat dilihat pada Gambar 2.4

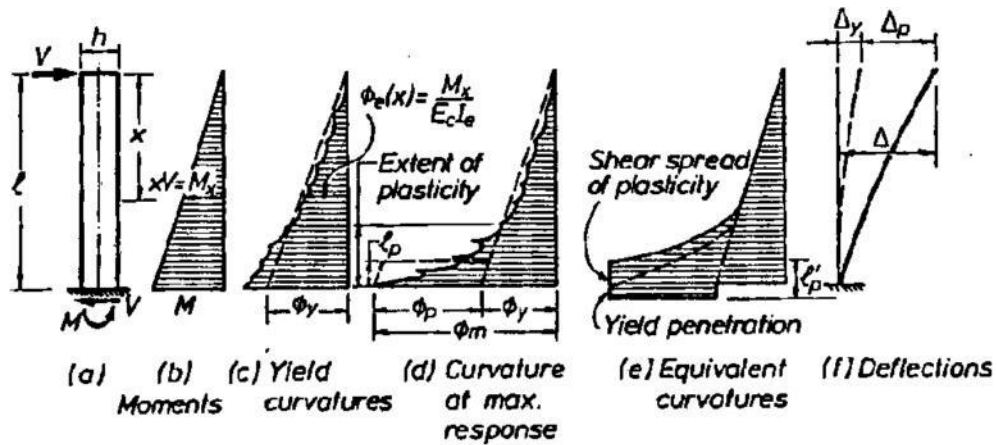


Gambar 2.4 Definisi daktilitas kelengkungan

3. Daktilitas Perpindahan (Displacement Ductility)

Daktilitas perpindahan biasanya digunakan pada evaluasi struktur yang diberikan gaya gempa. Daktilitas perpindahan merupakan rasio dari total perpindahan yang terjadi Δ dengan perpindahan pada awal titik leleh (*yield point*) Δ_y , yang dirumuskan sebagai berikut : $\mu_{\Delta} = \Delta / \Delta_y$ (3) Dimana

$\Delta = \Delta_y + \Delta_p$. Perpindahan pada titik leleh (Δ_y) dan pada titik plastis penuh (Δ_p) adalah komponen-komponen dari total lendutan ujung lateral seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Hubungan Momen, Curvature, dan Lendutan Pada Struktur Kantilever

2.2.4 Titik Leleh (Yield Point)

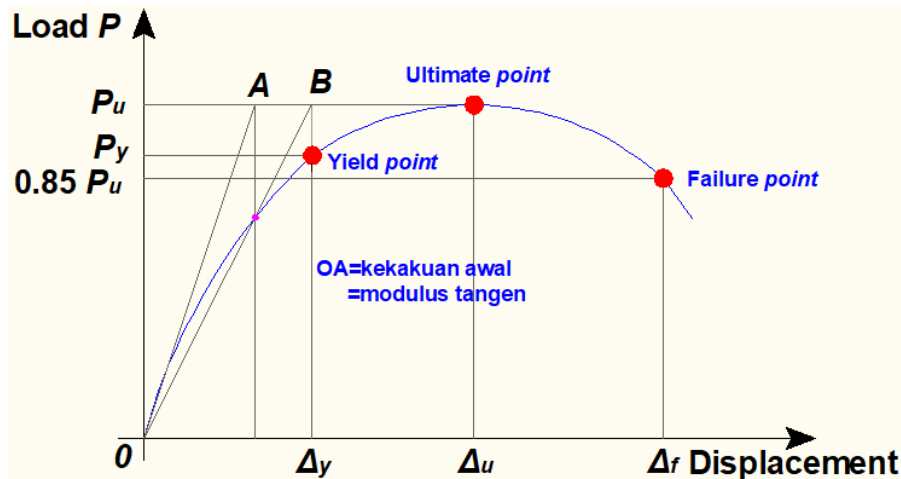
Definisi titik leleh (perpindahan, rotasi atau kelengkungan) sering sulit ditetapkan karena hubungan deformasi dengan gaya mungkin tidak memiliki titik leleh yang terdefinisi dengan baik. Hal ini dapat terjadi, misalnya, karena perilaku bahan yang nonlinier, atau karena penampang yang berbeda pada batang memanjang beton bertulang sehingga menghasilkan tingkat momen yang berbeda, atau karena sendi plastik yang terbentuk di berbagai bagian struktur pada level beban berbeda.

Berbagai definisi alternatif telah digunakan peneliti untuk memperkirakan titik leleh ini. Diantaranya adalah;

1. Metode General Yield Moment (Zhu 1989).

Titik leleh (P_y , Δ_y) dapat ditentukan dengan menggunakan metode grafis yang dilaporkan oleh Zhu (1989), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Beban ultimate P_u dipilih sebagai beban maksimum, dan perpindahan runtuh Δ_f didefinisikan sebagai perpindahan maksimum

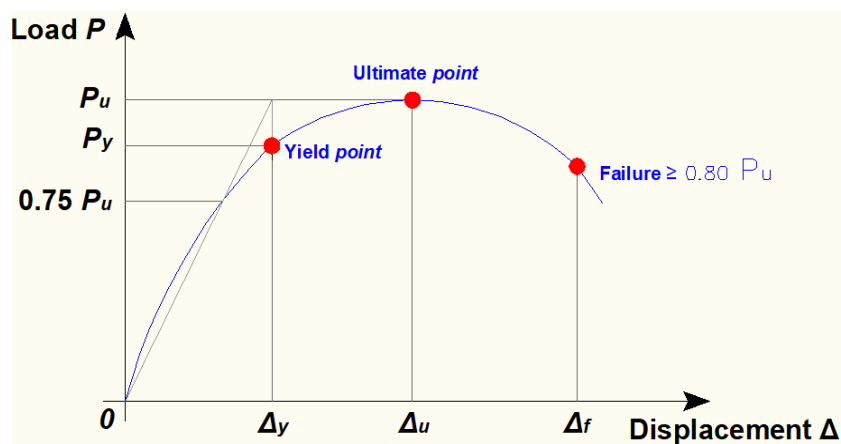
yang sesuai dengan beban tidak kurang dari $0,85P_u$ sesuai beban karakteristik dan perpindahan yang diturunkan dari kurva skeleton.



Gambar 2.6 Titik leleh kurva Beban-displacemen (Chen et al)

2. Mander et al (1988)

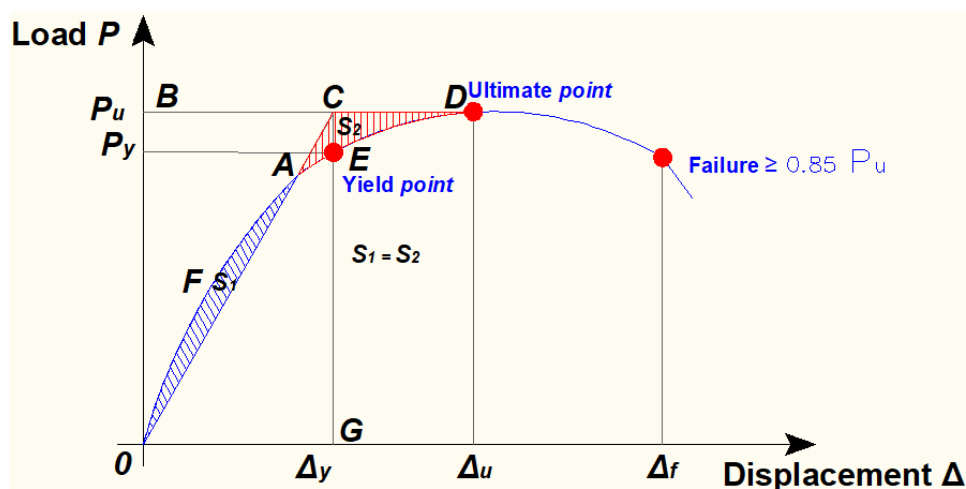
Berdasarkan pada pengurangan kekakuan setara leleh elasto-plastik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Perpindahan leleh didefinisikan dengan menggunakan kekakuan garis potong yang menghubungkan sumber dan 75% beban ultimit (Mander et al. 1988). Perpindahan maksimum Δ_f didefinisikan sebagai perpindahan yang sesuai dengan 80% dari beban ultimit (Mander et al., 1988).



Gambar 2.7 Titik leleh pada kurva Beban-displacemen (Mander)

3. Park, R (1988)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, perpindahan leleh didefinisikan dengan menyamakan luas S_1 sama dengan luas S_2 , posisi titik C ditentukan. Garis CG, tegak lurus terhadap sumbu transversal, memotong kurva $P - \Delta$ pada titik E. Perpindahan yang sesuai dengan titik E digunakan sebagai Δ_y . Perpindahan maksimum Δ_f didefinisikan sebagai perpindahan yang sesuai dengan 80% dari beban ultimit



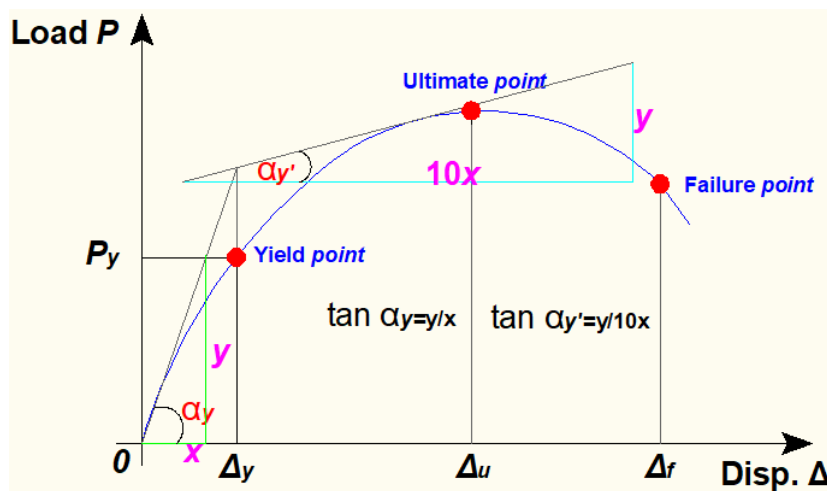
Gambar 2.8 Titik leleh pada kurva Beban - displacemen (Park, R)

4. ECCS (1986)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, dengan mengevaluasi garis singgung pada titik asal kurva F - e ; akan memberikan modulus tangen $E_t^+ = \tan \alpha_y^+$. kemudian tetapkan garis singgung yang memiliki kemiringan $E_t^+ / 10$. Persimpangan dua garis singgung mendefinisikan tingkat F_y^+ dan e_y^+ (perpindahan leleh). Beberapa point yang perlu diperhatikan pada penentuan titik leleh dengan metode ECCS ini adalah,

1. Tes harus dilakukan dengan langkah-langkah perpindahan yang cukup kecil untuk memastikan bahwa setidaknya 4 tingkat perpindahan tercapai sebelum e^+ dan e^-

2. Modulus tangen pada titik asal $\tan \alpha_y^+$ dan $\tan \alpha_y^-$ dievaluasi dari kurva siklus pertama
3. kemudian F_y didefinisikan oleh persimpangan dua garis singgung atau dengan definisi lain yang dibenarkan. Dalam kasus pertama, satu garis singgung dievaluasi pada titik asal (kemiringan $\tan \alpha$); yang lainnya adalah garis singgung ke kurva envelope siklus dengan kemiringan $0,1 \tan \alpha$.



Gambar 2.9 Titik leleh pada kurva Beban - displacemen (ECCS)

2.3 Kriteria Penerimaan Struktur Bangunan Tahan Gempa

Struktur beton bertulang yang di disain untuk memikul beban gempa haruslah mampu berperilaku inelastis tanpa mengalami kehilangan kekuatan yang berarti. SNI 7834 tahun 2012 memberikan suatu standar, kriteria penerimaan minimum untuk suatu sistem struktur rangka pemikul momen beton bertulang pracetak untuk bangunan gedung, meliputi persyaratan kapasitas struktur dan kestabilan struktur. Kapasitas struktur adalah kemampuan/kekuatan struktur menahan gaya dalam (momen lentur, geser dan torsi) akibat beban luar yang bekerja pada struktur. Kapasitas struktur akibat beban gempa biasanya digambarkan dalam suatu kurva hubungan antara perpindahan lateral lantai atap dan gaya

geser dasar yang dinamakan kurva kapasitas (capacity curve). Sedangkan Kestabilan struktur memiliki arti, bangunan tidak akan runtuh (collapse) jika mendapat pengaruh gaya-gaya dari luar. Collapse bisa disebabkan karena deformasi (perpindahan atau putaran sudut) yang berlebihan. Struktur yg tidak stabil cenderung menyebabkan deformasi yang bertambah selama dibebani, dan dapat mengalami keruntuhan yang menyeluruh dan seketika begitu dibebani.

Standar dalam SNI 7834 tahun 2012 ini digunakan untuk kriteria penerimaan pengujian sambungan balok kolom di daerah rawan gempa yang dibebani siklik. Disain balok kolom sendiri harus berdasarkan SNI 1726 tahun 2019, yaitu standar perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Adapun kriteria penerimaan minimum adalah sebagai berikut,

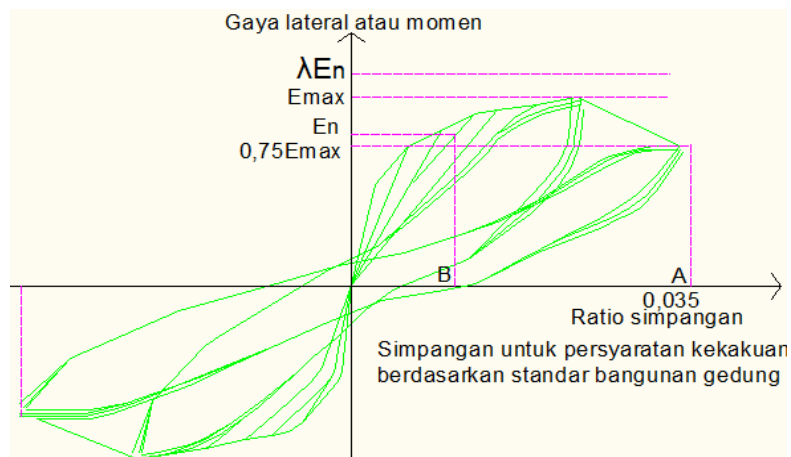
A. Persyaratan Kapasitas Struktur

1. Tahanan lateral minimum, E_n harus dicapai sebelum rasio simpangannya 2% melebihi nilai yang diijinkan peraturan gempa yang berlaku.
2. Tahanan lateral maksimum, E_{maks} tidak boleh melebihi nilai λE_n , dimana λ adalah faktor kuat-lebih kolom uji yang disyaratkan.

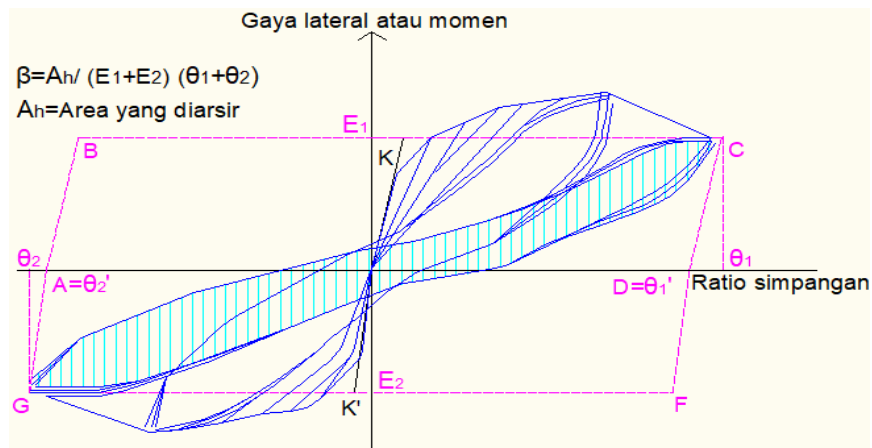
B. Persyaratan Kestabilan Struktur

3. Pada level simpangan maksimum, dimana nilainya tidak boleh kurang dari 0,035, karakteristik siklus penuh ketiga pada level simpangan tersebut harus memenuhi (a), (b), dan (c):
 - (a) Gaya puncak tidak boleh kurang dari 0,75 E_{maks} pada arah beban yg sama
 - (b) Disipasi energi relatif tidak boleh kurang daripada 1/8.

- (c) Kekakuan sekan garis yg menghubungkan titik rasio simpangan $-0,0035$ ke rasio simpangan $+0,0035$ harus tidak kurang dari $0,05$ kali kekakuan awal;
4. Benda uji yg memenuhi Pasal 1 sampai 3 dapat digunakan pada sistem Struktur Rangka Pemikul Momen beton bertulang pracetak dengan Kategori Disain Seismik (KDS) D, E, atau F;



Gambar 2.10 Besaran untuk evaluasi kriteria penerimaan



Gambar 2.11 Disipasi Energi Relatif

5. Benda uji yang tidak memenuhi salah satu kriteria hanya dapat digunakan pada beton bertulang pracetak KDS A, B, atau C,

selama dapat dibuktikan dengan metode eksperimental dan analisis yang dapat dipertanggung jawabkan.

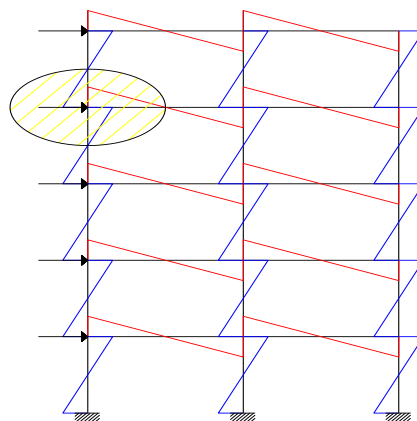
2.4 Pertemuan Balok-Kolom

2.4.1 Prototip Sambungan Balok-Kolom

Benda uji sambungan balok-kolom pada penelitian ini merupakan prototip dari sambungan balok-kolom bagian sisi luar (*exterior*) dari bangunan gedung lima lantai.

Pemodelan kondisi batas dari benda uji berdasarkan diagram bidang momen yang terjadi pada portal bertingkat akibat bekerjanya gaya horizontal (Gambar 2.12), dimana momen nol pada kolom terletak pada daerah tengah kolom antar lantai, dan momen nol pada balok terjadi di tengah bentang, sehingga panjang benda uji untuk balok dan kolom ditetapkan berdasarkan pada kondisi momen nol ini.

Perletakan benda uji di loading frame berupa sendi di dasar kolom bebas di kolom atas dan roll di ujung balok, sehingga dengan pembebanan di kolom atas akan didapatkan bentuk diagram momen yang menyerupai momen pada struktur sebenarnya bila terkena beban horizontal.

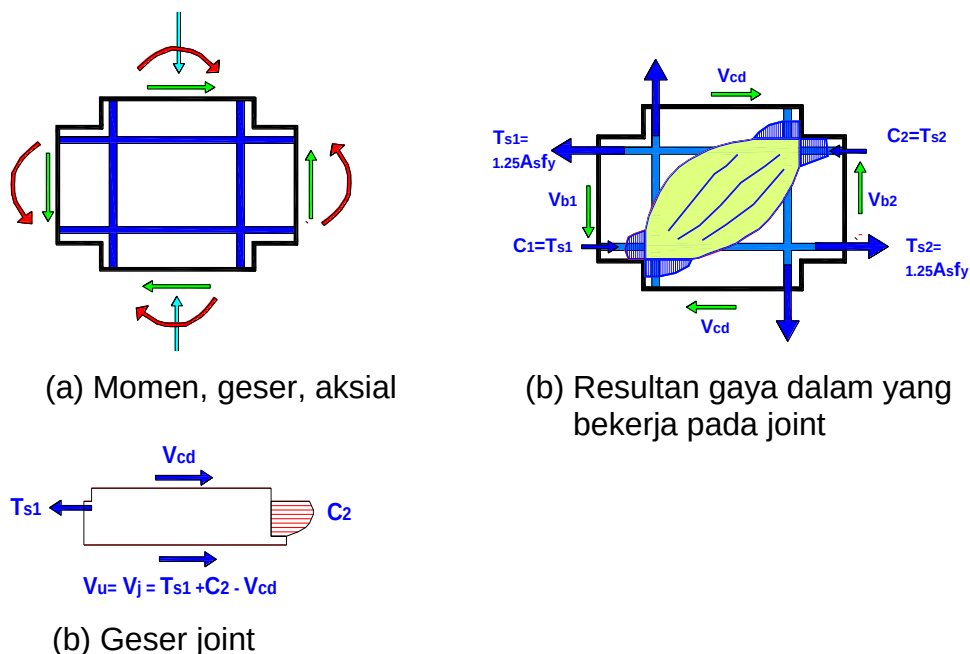


Gambar 2.12 Bidang Momen Akibat Beban Lateral

2.4.2 Joint Balok-Kolom

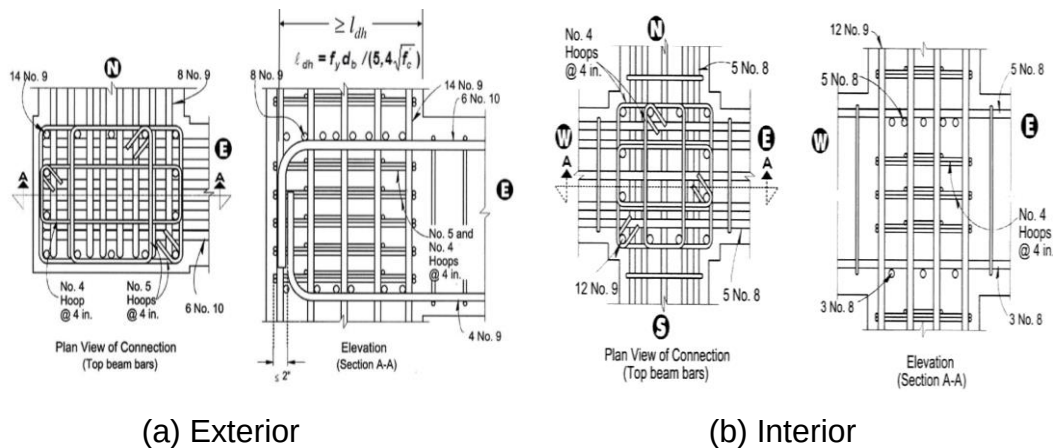
Daerah hubungan balok kolom merupakan daerah kritis pada suatu struktur rangka beton bertulang, yang harus didesain secara khusus untuk mampu berdeformasi inelastik pada saat terjadinya gempa. Daerah hubungan balok kolom akan mengalami gaya geser horizontal dan vertikal yang besar yang timbul dari momen kolom di atas dan di bawahnya, serta momen-momen dari balok pada saat memikul beban gempa. hubungan balok-kolom ini akan mengalami gaya geser vertikal dan horizontal yang lebih besar dari pada elemen balok dan kolom yang berdekatan. Akibatnya apabila daerah pertemuan balok kolom tidak didesain dengan benar akan menimbulkan keruntuhan geser yang bersifat getas dan membahayakan pengguna bangunan.

Menurut Widodo (2007), *joint* balok kolom merupakan pengekang bagi balok struktur statis tak tentu agar tidak mengalami rotasi secara bebas. Sistem pengekangan akan berlaku bila *joint* balok kolom merupakan satu kesatuan.



Gambar 2.13 Gaya-gaya pada beam-column joint

Dalam perencanaan struktur bangunan gedung beton bertulang yang tahan gempa, daerah pertemuan balok-kolom merupakan daerah kritis yang perlu didesain benar-benar akurat sehingga mampu mendisipasi energi dengan baik pada saat terjadi gempa. Kemampuan joint balok-kolom untuk berdeformasi pada daerah inelastik memberikan struktur dengan daktilitas baik, sehingga mampu meminimalisasi kerusakan yang terjadi akibat percepatan gempa bumi.



Gambar 2.14 Sistem Penulangan pada beam-column joint

2.4.3 Jenis-Jenis Sambungan Balok-Kolom

Dalam perencanaan struktur *frame* (portal), jenis-jenis *joint* dapat diidentifikasi sebagai *joint* dalam (*interior joint*), *joint* luar (*eksterior joint*), *joint* sudut (*corner joint*). Ketika 4 (empat) balok bertemu dengan muka vertikal sebuah *joint*, maka *joint* ini disebut sebagai *joint* dalam (*interior joint*). Ketika 1 (satu) balok bertemu dengan muka vertikal dari sebuah kolom dan 2 (dua) balok lain bertemu di *joint* dalam arah yang tegak maka *joint* dapat disebut *joint* luar (*eksterior joint*). Ketika 2 (dua) balok bertemu pada 2 (dua) muka vertikal pada suatu *joint* yang saling berdekatan maka disebut dengan *joint* sudut (*corner joint*).

2.4.4 Sambungan Pracetak Pada Hubungan Balok Kolom

Prinsip perencanaan sambungan pada elemen pracetak dapat dikelompokkan dalam dua kategori, yaitu :

- a. Sambungan Kuat (*strong connection*), yakni bila sambungan antar elemen pracetak tetap berperilaku elastis pada saat gempa kuat, sistem sambungan harus dan terbukti secara teoritis dan eksperimental memiliki kekuatan dan ketegaran yang minimal sama dengan yang dimiliki struktur sambungan beton monolit yang setara
- b. Sambungan daktil (ductile connection), yakni bila pada sambungan boleh terjadi deformasi inelastis, sistem sambungan harus terbukti secara teoritis dan eksperimental memenuhi persyaratan kehandalan dan kekakuan struktur tahan gempa.

Selain kedua kategori di atas, ada juga yang disebut dengan sambungan basah dan sambungan mekanik.

- a. Sambungan basah merupakan sambungan dimana untuk penyambungan pertemuan balok kolom dilaksanakan dengan pengecoran atau *grouting*.
- b. Sambungan mekanik merupakan sambungan dengan menggunakan pelat, baut atau las.

Penempatan sambungan pracetak pada hubungan balok kolom dapat dilakukan pada dua tempat, yaitu ditempatkan pada daerah pertemuan balok kolom (joint) atau pada balok yang menyatu dengan kolom. Penelitian tentang pengaruh penempatan penyambungan pada balok kolom pracetak eksterior telah dilakukan oleh Elly Cahyono dan Heru Purnomo dari Universitas Indonesia.

2.5 Beban Siklik (*Cyclic Load*)

2.5.1 Definisi Beban Siklik

Beban siklik atau cyclic load adalah pembebanan berulang, yang teratur dalam besar dan frekuensinya yang diterima oleh suatu struktur,

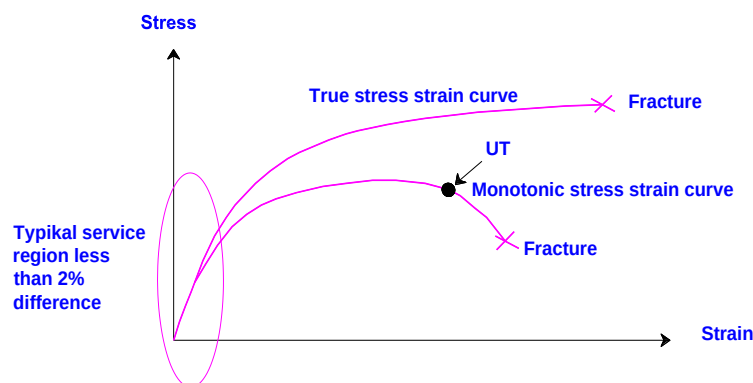
yang dapat menyebabkan fraktur kelelahan (fatigue). pembebanan siklis merupakan model representative yang tepat untuk menggambarkan beban dinamis yang terjadi akibat gempa bumi. Dalam kondisi nyata sebagian besar system struktur bersifat non linier sampai taraf tertentu akibat beban siklik. Sehingga analisa beban siklik dilakukan dengan analisa dinamik non linier.

Deformasi selama pembebanan siklik akan tergantung pada kepadatan tanah, besar dan durasi beban siklik, dan jumlah pembalikan tegangan geser. Jika pembalikan tegangan (*stress reversal*) terjadi, tegangan geser yang efektif bisa mencapai nol, maka likuifaksi siklik dapat terjadi. Jika pembalikan stres tidak terjadi, tegangan efektif nol tidak mungkin terjadi, maka mobilitas siklik terjadi (Amobi, 2008).

2.5.2 Perilaku Material Siklik (*Cyclic Material Behaviour*)

Hubungan tegangan-regangan untuk material dibawah beban siklik berbeda dengan beban monoton. Untuk analisis komponen berlekuk umumnya perlu mempertimbangkan perilaku material siklik untuk kekuatan dan perhitungan umur rencana (Amobi, 2008).

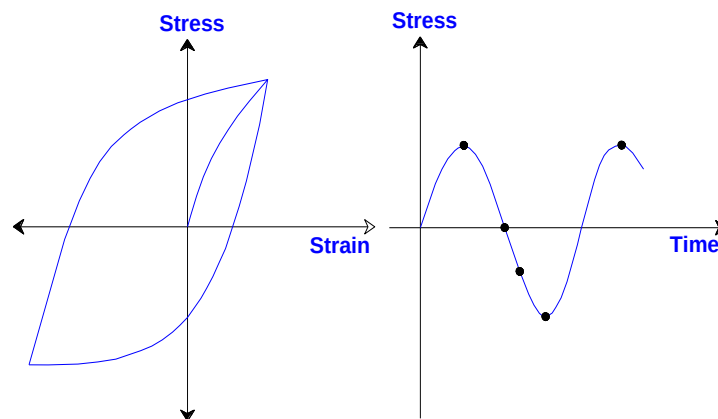
Pada pembebanan monoton (*monotonic loading*), kurva hubungan tegangan-regangan jika dibandingkan dengan kurva hubungan tegangan-regangan untuk pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 2.15 Perilaku Material Siklik (Amobi, 2008)

2.5.3 Perilaku Histeresis Beban Siklik (*Cyclic Hysteresis Behaviour*)

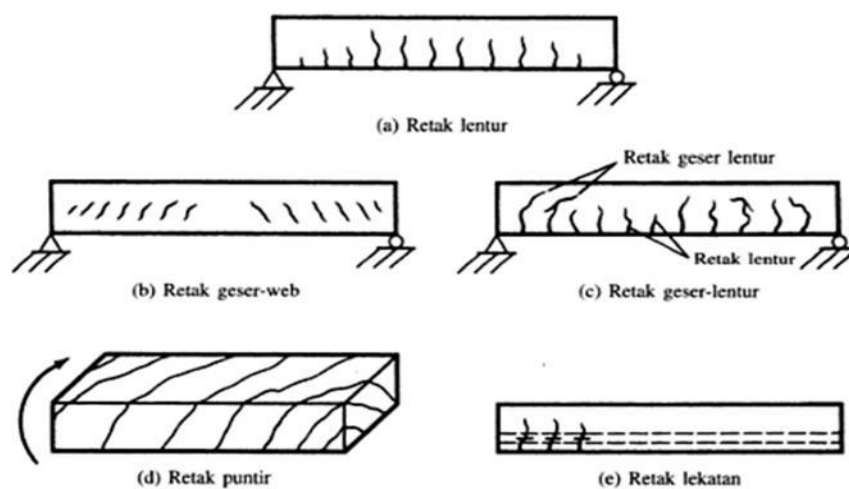
Untuk memprediksi perilaku struktur beton di bawah pembebanan seismik, model tegangan-regangan beton di bawah beban siklik (*loop hysteresis*) adalah hal yang penting untuk diamati [Watanabe]. Grafik histeresis pada pembebanan siklik dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perilaku *Hysteresis* Beban Siklik (Amobi, 2008)

2.6 Jenis Retak

Gilbert, R.I., (1990) membagi retak dalam 5 (lima) jenis, yaitu retak lentur, retak geser-web, retak geser-lentur, retak puntir dan retak lekatan seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Jenis Retakan Pada Beton

Retak Lentur (*flexural crack*) adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya (Gambar 2.17 (a)). Jika balok mempunyai web sangat tinggi (lebih dari 3 atau 4 ft), jarak retak akan sangat dekat, dengan sebagian retak terjadi bersamaan sampai di atas tulangan, dan sebagian lagi tidak sampai ke tulangan. Retakan ini terjadi setelah tegangan tarik normal pada serat bagian atas beton melampaui kekuatan tarik beton. Retak ini lebih lebar di pertengahan balok daripada di bagian dasarnya.

Retak geser lentur (*flexural shear crack*) terjadi retak miring yang merupakan retak lanjutan dari retak lentur yang telah terjadi sebelumnya. Kadang-kadang retak miring akan berkembang secara bebas pada balok meskipun tidak ada retak lentur pada daerah tersebut seperti pada Gambar 2.17 (b). Jenis retak geser miring yang paling umum adalah *retak geser-lentur* yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 (c). Retak ini umumnya terjadi pada balok prategang dan non prategang.

Retak Puntir (*torsion crack*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 (d) cukup mirip dengan retak geser terkecuali retak puntir ini melingkar di sekeliling balok. Jika sebuah batang beton tanpa tulangan menerima torsi murni, batang tersebut akan retak dan runtuh di sepanjang garis spiral 45° karena tarik diagonal yang disebabkan tegangan puntir. Meskipun tegangan puntir sangat mirip dengan tegangan geser, namun tegangan puntir terjadi diseluruh permukaan batang. Akibatnya, tegangan puntir ini menambah tegangan geser pada satu sisi dan mengurangi tegangan geser pada sisi yang lain. Kadang-kadang tegangan lekatan (*bond stress*) antara beton dan tulangannya mengakibatkan pemisahan di sepanjang tulangan.

2.7 Penelitian Mengenai Sambungan Balok Kolom Pracetak

1. Bayzoni (2001)

Meneliti *joint* balok kolom monolit dan *joint* balok kolom pracetak terhadap beban siklik. Pengujian dilakukan terhadap dua buah benda uji yang berupa *joint* balok kolom eksterior monolit dan *joint* balok kolom eksterior pracetak. Sambungan mekanis dan batang penyambung berulir digunakan sebagai sistem sambungan pracetak. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara mekanisme kegagalan *joint* balok kolom eksterior monolit dengan mekanisme kegagalan *joint* balok kolom eksterior pracetak. Hal ini disebabkan oleh adanya cadangan kekuatan pada daerah sambungan.

2. Elly Tjahjono dan Heru Purnomo (2004)

Penelitian ini menyajikan hasil dari studi eksperimental pengaruh penempatan penyambungan terhadap perilaku rangkaian balok-kolom struktur portal beton pracetak yang dikenai pembebanan semi siklik. Empat benda uji dengan skala 1:2 telah dikaji. Tiga benda uji, penempatan penyambungannya berada pada daerah pertemuan balok-kolom dan satu benda uji penempatan penyambungan berada di daerah potensi sendi plastis balok.

Keempat model sambungan pracetak mempunyai geometri penampang dan penulangan yang sama, detailnya sebagai berikut:

1. Sambungan tipe A, penyambungan dilakukan pada pertemuan elemen balok dan kolom pracetak dengan adanya penonjolan daerah balok pada sisi luar.
2. Sambungan tipe B, penyambungan di daerah elemen balok sejarak h_b (tinggi balok) dari muka pertemuan balok-kolom. Penyambungan tulangan utama yang keluar dari elemen-elemen pracetak menggunakan media penyambung berupa baja siku L25x25x2.5 yang dilas.
3. Sambungan tipe I, penyambungan dilakukan pada pertemuan elemen kolom dan elemen balok pracetak sampai dengan daerah potensi

sendi plastis yaitu $2 h_b$ =dua kali tinggi balok

4. Sambungan tipe Y, penyambungan dilakukan tepat di daerah pertemuan elemen kolom dan elemen balok pracetak.

Kesimpulan dari studi eksperimental pada keempat tipe lokasi penyambungan balok-kolom ini, adalah:

- a. Pada umumnya perilaku struktur dari keempat benda uji tidak jauh berbeda.
- b. Dilihat dari nilai kekakuan maka sambungan tipe A dan B memiliki degradasi kekakuan yang tidak begitu besar.

Keempat benda uji memiliki nilai rasio daktilitas yang cukup memadai, semuanya menghasilkan daktilitas di atas 3.

- c. Retak pertama semuanya terjadi di muka kolom, dan pola retak dominan pada semua tipe sambungan merupakan retak lentur. Sedangkan retak pada daerah panel join juga dominan retak lentur, kecuali sambungan tipe A dan I terdapat retak geser di daerah join.

3. Fredi Purnama dan Roy Steven (2009)

Penelitian yang dilakukan adalah membandingkan pola retak dan lendutan *joint* balok kolom monolit dan balok kolom pracetak. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa pola retakan yang terjadi pada balok monolit dan balok pracetak hampir sama, baik pada benda uji monolit maupun yang dicor tidak monolit. Disimpulkan juga bahwa lendutan rata-rata yang terjadi pada ujung balok beton pracetak lebih besar dibandingkan dengan lendutan pada ujung balok monolit yang disebabkan oleh perbedaan material yang dipakai.

Hasil-hasil penelitian yang telah diuraikan diatas menunjukkan bahwa pelaksanaan konstruksi pracetak dengan konstruksi monolit memungkinkan memiliki kekuatan dan kekakuan yang hampir sama. Namun demikian, ada beberapa hal yang masih harus diperbaiki untuk mencapai hal tersebut, antara lain bagaimana mencegah slip atau

pemisahan antara elemen balok kolom yang dicor pertama dengan bagian sambungan tambahan pada balok yang dicor kemudian, bagaimana menambah kekuatan struktur dengan adanya pengecoran sambungan tambahan pada balok sehingga tidak mengurangi kekuatan struktur akan tetapi menambah kekuatan dalam struktur pracetak.

4. H. Parung, dkk (2010)

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kekuatan sambungan balok kolom pracetak menggunakan plat baja sebagai connector (JPSP – Joint Pracetak Sambungan Baja). Sambungan pracetak dibuat untuk sambungan balok kolom type interior dan eksterior, diuji dengan beban monotonic dan cyclic. Kekuatan kedua sampel yang diuji dibandingkan kekuatannya dengan konstruksi yang monolit.

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

- a. Secara umum, tipe keretakan pada kedua konstruksi baik pracetak maupun monolit adalah serupa, yakni retak lentur. Retak terjadi pada hubungan antara pracetak dan bagian yang disambung.
- b. Kekuatan JPSP lebih tinggi dari konstruksi monolit. Hal ini dapat dilihat dari defleksi yang lebih rendah pada JPSP.
- c. Tidak ada tanda keruntuhan pada joint, dimana sambungan kolom pracetak dilas sebelum digROUT. Retak diluar bagian dapat direduksi menggunakan material yang lebih baik.

5. Jojon Suherman (2011)

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui daktilitas sambungan beton *precast*, yang menggunakan tipe *block set connection (BSC)*. Rancangan sambungan balok kolom menggunakan teori **full ductile** yang menggunakan 2 buah benda uji dalam skala 1:1, diuji dengan beban siklik dan dianalisis terhadap daktilitas, kekuatan, kekakuan, disipasi energi, dan pola keruntuhan

Hasil dari penelitian ini menyimpulkan bahwa sambungan BSC memiliki: (1) daktilitas $\mu = 6.45$; (2) kekuatan yang stabil pada pembebanan; (3) kekakuan konstruksi 0,95 yang menyamai konstruksi monolit; (4) disipasi energi yang mampu menyerap energy pada sambungan; dan (4) pola runtuh konstruksi yang sama dengan pola runtuh konstruksi monolit.

6. H. Alamsyah (2012)

Pemodelan penelitian adalah gedung dua lantai yang berada di wilayah gempa IV dengan perencanaan beban gempa statik yang menggunakan faktor reduksi gempa, $R = 8,5$. Pengujian beban dilakukan secara berulang-ulang yang merupakan simulasi beban gempa dengan program pembebanan siklik mengacu pada ACI T1.1-01. Hasil yang diperoleh “Kekakuan rerata benda uji pracetak pada saat leleh sebesar 0,35 kN/mm dan terjadi penurunan pada saat beban puncak yaitu sebesar 48,57%. Penambahan siklus pada benda uji akan menambah tingkat kerusakan yang kemudian mengurangi kapasitas benda uji tersebut”.

7. Mardewi Jamal (2015)

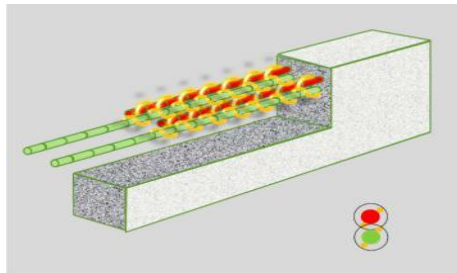
Merupakan pengujian eksperimental dengan skala penuh, yang bertujuan untuk menganalisis pola retak pada tipe sambungan pracetak, menganalisis karakteristik hysteresis loop, menganalisis pengaruh sambungan pracetak terhadap daktilitas dan kekuatan, serta merumuskan model hubungan tingkat kekuatan dan daktilitas sambungan balok kolom pracetak terhadap monolit.

Hasil dari penelitian ini menyimpulkan bahwa pola retak yang terjadi adalah retak lentur yang berada pada daerah potensi sendi plastis. Karakteristik *hysteresis loop* pada sambungan pracetak menunjukkan kurva yang hampir sama dengan sambungan monolit yaitu semakin meningkat seiring dengan penambahan beban dan *displacement*.

2.8 Bentuk - Bentuk Sambungan Balok Kolom Pracetak

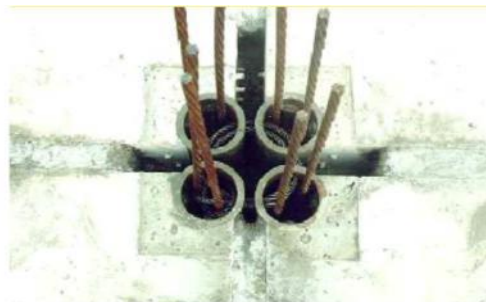
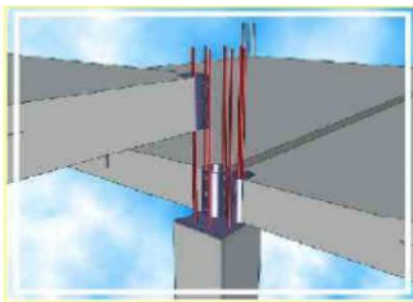
Berdasarkan sumber dari Departemen Pekerjaan Umum, Badan Penelitian dan Pengembangan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman, terdapat beberapa jenis sistem sambungan balok kolom pracetak, diantaranya adalah:

1. Sistem Diamond Belt



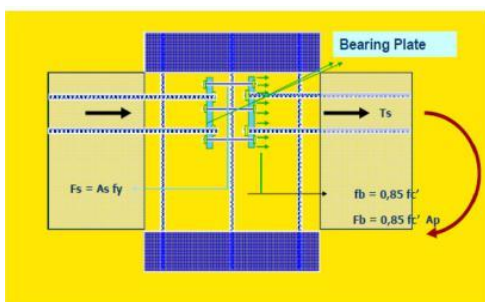
Gambar 2.18. Sambungan pracetak sistem Diamond Belt

2. Sistem Modified JHS Column Beam Slab



Gambar 2.19 Sistem Modified JHS Column Beam Slab

3. Sistem Platcon



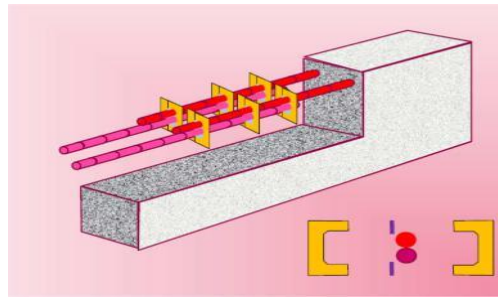
Gambar 2.20 Sambungan pracetak sistem Platcon

4. Sistem Tricon



Gambar 2.21 Sambungan pracetak sistem tricon

5. Sistem Waskita Precast 07



Gambar 2.22 Sambungan pracetak sistem Waskita

2.9 Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir penelitian terdiri dari identifikasi masalah, teknologi yang sudah pernah dilakukan, inovasi teknologi yang penulis lakukan, validasi numerik dan implementasi hipotetik. Kerangka pikir penelitian dapat dilihat pada skema berikut ini:

KERANGKA PIKIR PENELITIAN

