

DISERTASI

STUDI EKSPERIMENTAL RETROFIT WIRE MESH DAN SCC PADA KOLOM PERSEGI BETON BERTULANG AKIBAT BEBAN SIKLIK

PERFORMANCE OF RETROFITTED SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMN USING WIRE MESH AND SCC SUBJECTED TO CYCLIC LOAD

disusun dan diajukan oleh

HENCE MICHAEL WUATEN

P0800316021



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

STUDI EKSPERIMENTAL RETROFIT WIRE MESH DAN SCC PADA KOLOM PERSEGI BETON BERTULANG AKIBAT BEBAN SIKLIK

PERFORMANCE OF RETROFITTED SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMN USING WIRE MESH AND SCC SUBJECTED TO CYCLIC LOAD


disusun dan diajukan oleh :

HENCE MICHAEL WUATEN
P0800316021

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Doktor Program Studi Doktor Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 25 Juni 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Promotor,


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

Co Promotor,


Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T
NIP. 19791226 200501 1 001

Co Promotor,


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

Ketua Program Studi,


Prof. Ir. S.A. Adisasmita, M.Si., M.Eng.Sc., Ph.D
NIP. 19640422 199303 1 001

Dekan Fakultas Teknik,


Prof. Dr. Ir. M. Arsyad Thaha, M.T
NIP.19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan di bawah ini ;

Nama : Hence Michael Wuaten
NIM : P0800316021
Program Studi : Doktor Teknik Sipil
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

**Studi Eksperimental Retrofit Wire Mesh dan SCC Pada Kolom Persegi
Beton Bertulang Akibat Beban Siklik**

***Performance of Retrofitted Square Reinforced Concrete Column Using
Wire Mesh and SCC Subjected to Cyclic Load***

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

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

Makassar, 25 Juni 2021

Yang menyatakan



Hence Michael Wuaten

KATA PENGANTAR

Shalom Aleichem b'Shem Yeshua Ha Mashiach, segala puji dan syukur penulis panjatkan kedahirat Tuhan Yang Maha Kuasa, Allah pencipta langit dan bumi beserta segala isinya, atas kesehatan, berkat, hikmat yang selalu baru dan melimpah setiap hari, sehingga Penulis dapat menyelesaikan penelitian dan menyusun disertasi yang berjudul “**Studi Eksperimental Retrofit *Wire Mesh* dan SCC Pada Kolom Persegi Beton Bertulang Akibat Beban Siklik**”.

Disertasi ini merupakan hasil penelitian yang penulis lakukan terhadap tiga buah spesimen kolom beton bertulang sebagai objek penelitian. Spesimen pertama merupakan kolom kontrol, spesimen kedua adalah kolom yang dengan *wire mesh* yang dipasang penuh pada badan kolom dan spesimen ketiga adalah kolom yang diretrofit dengan *wire mesh* pada daerah sendi plastis.

Dalam penelitian ini, spesimen kolom beton bertulang yang dibuat menggunakan skala penuh (*full scale*) dan parameter yang diuji meliputi, kekuatan, daktilitas, kekakuan dan disipasi energi, dimana semua spesimen diuji dengan beban siklik bolak balik. Dari hasil penelitian kemudian dibandingkan perilaku antara kolom yang diretrofit dengan *wire mesh* dengan kolom kontrol atau tidak diretrofit dengan *wire mesh*.

Dalam penelitian dan penyusunan disertasi, penulis mendapat banyak dukungan dan bantuan, dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, dengan kerendahan hati Penulis ingin mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada yang Penulis hormati dan banggakan sebagai mentor, yaitu :

1. Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. Herman Parung, M.Eng, selaku Promotor yang selalu meluangkan waktu dan kesempatan, memberikan banyak masukan mulai dari tahap penyusunan usulan penelitian hingga tahap penyusunan disertasi.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T, selaku Co Promotor I, yang selalu meluangkan waktu dan kesempatan, memberikan banyak masukan, ide, motivasi dan semangat kepada

penulis mulai dari tahap penyusunan usulan penelitian, pengolahan data hingga tahap penyusunan disertasi.

3. Ibu Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T, selaku Co Promotor II, yang selalu meluangkan waktu dan kesempatan, memberikan banyak masukan, ide dan motivasi kepada penulis mulai dari tahap penyusunan usulan penelitian, membantu pengujian spesimen hingga tahap penyusunan disertasi.
4. Bapak Prof. Dr. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng, Bapak Prof. Dr. Ir. Rudi Djamaluddin, S.T., M.Eng, Bapak Dr. Ir. Abdul Rachman Djamaluddin, M.T, dan Bapak Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc. Ph.D, selaku Dosen-dosen Penguji internal dan Bapak Ir. I Ketut Sudarsana, ST., Ph.D selaku Dosen Penguji Eksternal yang telah memberikan banyak masukan dan saran guna penyempurnaan dalam penyusunan disertasi ini.

Secara khusus penulis ingin mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung sehingga penelitian ini dapat berjalan dan selesai, antara lain :

1. Lembaga Pengembangan Dana Pendidikan (LPDP) Kementrian Keuangan Republik Indonesia, yang sudah mendukung dan menjadi sponsor pendanaan Penulis melalui Program Beasiswa Unggulan Dosen Indonesia Dalam Negeri (BUDI-DN).
2. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan, Wakil Dekan dan Staf Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah menerima dan memberikan dukungan fasilitas, selama Penulis mengikuti studi Program Doktor Teknik Sipil.
3. Dekan Fakultas Teknik, Ketua Departemen Teknik Sipil, Ketua Program Studi Doktor Teknik Sipil, Dosen Pengajar dan Staf Universitas Hasanuddin Makassar, yang telah memberikan kesempatan, masukan dan dorongan kepada Penulis untuk dapat mengikuti dan menyelesaikan studi Program Doktor Teknik Sipil.
4. Ketua Laboratorium Struktur Universitas Hasanuddin Makassar, yang telah memberikan kesempatan kepada Penulis untuk dapat melakukan penelitian dan pengambilan data di laboratorium.

5. Ketua dan Sekretaris serta Keluarga Besar Laboratorium Riset Gempa yang senantiasa mendukung dan membantu Penulis selama kegiatan penelitian berlangsung di laboratorium.
6. Tim Kolom Retrofit : Syahrul Satar, Muhammad Amrin Kahar, Masnia dan William Jonathan A, terimakasih sudah menjadi anggota tim penelitian yang luar biasa.
7. Rekan-rekan Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil Angkatan 2016 dan 2017 : Syahrul, Maraden Panjaitan, Wahyu Mahendra Trias Atmadja, Tukimun, Eswan, Ruminsar Simbolon, Alpian Nur, Andi M dan Herman Tumengkol, terimakasih kawan-kawan sudah berbagi, saling mendukung selama studi dan pelaksanaan penelitian.
8. Semua Pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan baik secara moril dan material kepada Penulis selama melanjutkan studi dan penelitian di Laboratorium.

Pada akhirnya Penulis mengucapkan terimakasih dan mempersembahkan disertasi ini kepada Orang Tua dan Keluarga Besar Wuaten Mumek, Keluarga Besar Sumilat Koagouw yang senantiasa mendukung penulis dalam doa, moral dan materil. Kepada Istri tercinta Samantha Cloudya Sumilat, SE, yang senantiasa mendoakan dan terus mendukung moral dan materil selama Penulis studi di Makassar.

Akhirnya hanya doa yang dapat Penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa, untuk membalas kebaikan hati dan pertolongan yang diberikan kepada Penulis selama melanjutkan studi dan penelitian di Universitas Hasanuddin Makassar.

Makassar, 01 Juni 2021

Penulis

ABSTRAK

HENCE MICHAEL WUATEN. ***STUDI EKSPERIMENTAL RETROFIT WIRE MESH DAN SCC PADA KOLOM PERSEGI BETON BERTULANG AKIBAT BEBAN SIKLIK*** (Dibimbing Oleh Herman Parung, Andi Arwin Amiruddin, Rita Irmawaty)

Penelitian ini merupakan hasil studi eksperimental menggunakan spesimen kolom persegi beton bertulang yang diretrofit dengan *wire mesh* dan *self compacting concrete* (SCC). Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku kekuatan, daktilitas, kekakuan dan kapasitas disipasi energi pada model kolom yang diretrofit dengan *wire mesh* dan SCC. Spesimen uji terdiri dari tiga buah model kolom, yaitu kolom kontrol (KK) yang tidak diretrofit, kolom yang diretrofit penuh pada seluruh badan kolom (KR01) dan kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis (KR02). Spesimen kemudian diuji dengan beban siklik berdasarkan metode *displacement control*. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kolom yang diretrofit menggunakan *wire mesh* dan SCC yaitu, spesimen KR01 dan KR02 menghasilkan kekuatan, daktilitas, kekakuan dan kemampuan mendisipasi energi yang lebih tinggi dibandingkan kolom yang tidak diretrofit yaitu, spesimen KK. Selain itu, nilai kekuatan, daktilitas, kekakuan dan disipasi energi yang dihasilkan oleh spesimen KR01 dan KR02 hampir sama, sehingga dapat disimpulkan bahwa kolom yang diretrofit dengan *wire mesh* dan SCC pada daerah sendi plastis, akan menghasilkan kemampuan yang sama dengan kolom yang diretrofit dengan *wire mesh* dan SCC pada seluruh badan kolom.

Kata kunci : kolom, retrofit, *wire mesh*, beban siklik, kekuatan, daktilitas, kekakuan, disipasi energi

ABSTRACT

HENCE MICHAEL WUATEN. ***PERFORMANCE OF RETROFITTED SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMN USING WIRE MESH AND SCC SUBJECTED TO CYCLIC LOAD*** (Promoted By Parung Herman, Amiruddin Andi Arwin, Irmawaty Rita)

This research is an experimental study using specimens of reinforced concrete square columns that are retrofitted with wire mesh and self compacting concrete (SCC). The purpose of this research is to find out the behavior of strength, ductility, stiffness and energy dissipation capacity in column models that are retrofitted with wire mesh and SCC. The test specimen consists of three column models, namely an unretrofitted control column (KK), a fully retrofitted column on the entire column body (KR01) and a retrofitted column in the plastic hinge area (KR02). Specimens are then tested with cyclic load based on displacement controlled method. From the test results showed that the retrofitted column using wire mesh and SCC namely, specimens KR01 and KR02 produce strength, ductility, stiffness and ability to dissipate higher energy than unretrofitted columns i.e., KK specimens. In addition, the value of strength, ductility, stiffness and dissipation of energy produced by KR01 and KR02 specimens is almost the same, so it can be concluded that columns that are retrofitted with wire mesh and SCC in the plastic hinge area, will produce the same capabilities as the columns that are retrofitted with wire mesh and SCC on the entire column body.

Keyword : column, retrofit, wire mesh, cyclic load, strength, ductility, stiffness, energy dissipation

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xxi

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Batasan Penelitian	6
E. Manfaat Penelitian	7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Isu Strategis	8
B. Metode Retrofit Kolom	10
C. Tipe Metode Retrofit Kolom	11

1. Jaket Beton	12
2. Jaket Baja	15
3. Kekangan <i>Fiber Reinforced Polymer</i>	18
4. Jaket Laminasi <i>Ferrocement</i>	20
D. Self Compacting Concrete	21
1. Definisi <i>Self Compacting Concrete</i>	21
2. Sifat dan Komposisi Campuran SCC	21
E. Kolom	23
1. Definisi Kolom	23
2. Kekuatan Kolom Dengan Beban Sentris	24
3. Degradasi Kekuatan Pada Kolom Dengan Beban Siklik ...	25
4. Kekakuan Kolom	25
5. Kekakuan Awal	26
6. Degradasi Kekakuan	26
7. Daktalitas Kolom	27
8. Disipasi Energi	28
F. Sendi Plastis	31
1. Mekanisme Sendi Plastis	31
2. Pengekangan Pada Daerah Sendi Plastis	32
3. Panjang Sendi Plastis	33
4. Persamaan Panjang Sendi Plastis	33

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A. Kerangka Pemikiran Penelitian	37
B. Lokasi Penelitian	38

C. Material dan Peralatan Penelitian	38
1. Material Penelitian	38
2. Peralatan Penelitian.....	39
D. Spesimen Uji dan Instrumen	39
1. Dimensi Spesimen Uji	39
2. Penulangan Spesimen	39
3. Retrofit	41
4. Instrumen	42
E. Pelaksanaan Penelitian	45
1. Skema Penelitian	45
2. Tahap Persiapan.....	45
3. Tahap Pengujian Material	46
4. Tahap Pembuatan dan Perawatan Spesimen	46
5. Tahap Setting Up Peralatan Pengujian	47
6. Tahap Pengujian Spesimen	49
7. Tahap Analisa Data	51
8. Tahap Penyusunan Laporan Hasil Penelitian	51

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

A. Karakteristik Material	53
1. Karakteristik Bahan Penyusun Kolom	53
2. Karakteristik Bahan Retrofit	54
3. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Normal	55
4. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Memadat Sendiri	55
B. Kekuatan Spesimen.....	56

1. Hub. Beban dan Deformasi Lateral Spesimen KK	56
2. Hub. Beban dan Deformasi Lateral Spesimen KR01	57
3. Hub. Beban dan Deformasi Lateral Spesimen KR02	59
4. Hub. Beban dan Deformasi Lateral Semua Spesimen	60
5. Persyaratan Simpangan Minimum	62
6. Degradasi Kekuatan Pada Spesimen	63
C. Daktalitas dan Kekakuan	66
1. Beban Leleh dan Perpindahan Leleh	66
2. Daktalitas	69
3. Kekakuan	71
D. Pola Retak	80
1. Pola Retak Spesimen KK	80
2. Pola Retak Spesimen KR01	81
3. Pola Retak Spesimen KR01	83
E. Distribusi Regangan Pada Tulangan	84
1. Distribusi Regangan Tulangan Longitudinal KK	84
2. Distribusi Regangan Tulangan Longitudinal KR01.....	86
3. Distribusi Regangan Tulangan Longitudinal KR02.....	87
4. Perbandingan Distribusi Regangan Tul. Longitudinal	88
5. Distribusi Regangan Pada Tulangan Transversal	89
F. Disipasi Energi	90
1. Luas Loop Spesimen KK	90
2. Luas Loop Spesimen KR01	92
3. Luas Loop Spesimen KR2	94
4. Disipasi Energi dan Disipasi Energi Akumulatif	96

5. Disipasi Energi Relatif	97
6. Disipasi Energi Pada Daerah Sendi Plastis	99
H. Kebaharuan Hasil Penelitian	101
BAB V PENUTUP	
A. Kesimpulan	103
B. Saran	104
DAFTAR PUSTAKA	105
LAMPIRAN	112

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Material penelitian	38
Tabel 2	Dimensi spesimen	39
Tabel 3	Penulangan spesimen kolom dan retrofit	40
Tabel 4	Persyaratan tulangan minimum dan maksimum	40
Tabel 5	Dimensi Retrofit Pada Spesimen	42
Tabel 6	Posisi penempatan <i>strain gauge</i> baja tul. pada spesimen	44
Tabel 7	Posisi penempatan <i>strain gauge</i> beton pada spesimen	45
Tabel 8	Proporsi campuran beton normal	53
Tabel 9	Hasil uji kuat tarik baja tulangan.....	54
Tabel 10	Proporsi campuran <i>self compacting concrete</i>	54
Tabel 11	Hasil uji kuat tarik <i>wire mesh</i>	54
Tabel 12	Hasil uji kuat tekan beton normal	55
Tabel 13	Hasil uji kuat tekan <i>self compacting concrete</i>	56
Tabel 14	Perbandingan tingkat kekuatan pada spesimen	62
Tabel 15	Persyaratan simpangan minimum pada spesimen	63
Tabel 16	Persyaratan degradasi kekuatan spesimen	64
Tabel 17	Nilai beban leleh dan perpindahan leleh	68
Tabel 18	Beban pada saat retak pertama, leleh dan ultimit	69
Tabel 19	Perpindahan pada saat retak pertama, leleh dan ultimit	69
Tabel 20	Nilai daktalitas pada masing-masing spesimen	70
Tabel 21	Kekakuan spesimen KK	72
Tabel 22	Kekakuan spesimen KR01	74

Tabel 23	Kekakuan spesimen KR02	75
Tabel 24	Kekakuan pada semua spesimen	77
Tabel 25	Nilai kekakuan awal pada spesimen	78
Tabel 26	Persyaratan degradasi kekakuan spesimen	80
Tabel 27	Luas loop pada spesimen KK	90
Tabel 28	Luas loop pada spesimen KR01	92
Tabel 29	Luas loop pada spesimen KR02	93
Tabel 30	Persyaratan rasio disipasi energi relatif	98
Tabel 31	Perkiraan panjang sendi plastis	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Contoh metode <i>concrete jacketing</i> pada kolom	13
Gambar 2	Variasi metode <i>concrete jacketing</i> pada kolom	14
Gambar 3	Contoh metode <i>steel jacketing</i> pada kolom	16
Gambar 4	Model benda uji penelitian Wu, et.al	17
Gambar 5	Model benda uji penelitian Xiao dan Wu	17
Gambar 6	Contoh metode <i>FRP jacketing</i> pada kolom	19
Gambar 7	Contoh metode <i>ferrocement laminate jacketing</i>	20
Gambar 8	Komposisi campuran SCC menurut Okumura dan Ouchi ..	23
Gambar 9	Kekakuan struktur	26
Gambar 10	Penentuan nilai Δ_y	28
Gambar 11	Disipasi energi	29
Gambar 12	Contoh kurva <i>hysteresis loops</i> pada kolom retrofit	30
Gambar 13	Kerangka pemikiran penelitian	37
Gambar 14	Penulangan spesimen	41
Gambar 15	Dimensi retrofit pada spesimen KR01	42
Gambar 16	Dimensi retrofit pada spesimen KR02	43
Gambar 17	Jarak penempatan <i>strain gauge</i> pada baja tulangan	44
Gambar 18	Jarak penempatan <i>strain gauge</i> beton pada spesimen	45
Gambar 19	Skema Penelitian	46
Gambar 20	Sketsa <i>setting up</i> pengujian	49
Gambar 21	Hasil <i>setting up</i> pengujian	50
Gambar 22	Siklus pembebanan menurut SNI 7834:2012	51

Gambar 23	Hubungan beban dan deformasi lateral spesimen KK	56
Gambar 24	Hubungan beban dan deformasi lateral spesimen KR01 ...	58
Gambar 25	Hubungan beban dan deformasi lateral spesimen KR02 ...	59
Gambar 26	Perbandingan hubungan beban dan deformasi lateral	61
Gambar 27	Perbandingan kekuatan spesimen	62
Gambar 28	Degradasi kekuatan spesimen KK	64
Gambar 29	Degradasi kekuatan spesimen KR01	65
Gambar 30	Degradasi kekuatan spesimen KR02	65
Gambar 31	Beban leleh dan perpindahan leleh spesimen KK	66
Gambar 32	Beban leleh dan perpindahan leleh spesimen KR01	67
Gambar 33	Beban leleh dan perpindahan leleh spesimen KR02	68
Gambar 34	Perbandingan nilai daktalitas pada semua spesimen	70
Gambar 35	Kekakuan spesimen KK	72
Gambar 36	Kekakuan spesimen KR01	73
Gambar 37	Kekakuan spesimen KR02	76
Gambar 38	Perbandingan kekakuan pada spesimen kondisi tekan	77
Gambar 39	Perbandingan kekakuan pada spesimen kondisi tarik	78
Gambar 40	Pola retak pada spesimen KK	81
Gambar 41	Pola retak pada spesimen KR01	82
Gambar 42	Pola retak pada spesimen KR02	83
Gambar 43	Distribusi regangan tulang longitudinal KK	85
Gambar 44	Distribusi regangan tulang longitudinal KR01	86
Gambar 45	Distribusi regangan tulang longitudinal KR02	87
Gambar 46	Distribusi regangan tulang longitudinal	88
Gambar 47	Distribusi regangan tulang transversal	89

Gambar 48	Disipasi energi pada spesimen KK	91
Gambar 49	Disipasi energi akumulatif pada spesimen KK	91
Gambar 50	Disipasi energi pada spesimen KR01	93
Gambar 51	Disipasi energi akumulatif pada spesimen KR01	93
Gambar 52	Disipasi energi pada spesimen KR02	95
Gambar 53	Disipasi energi akumulatif pada spesimen KR02	95
Gambar 54	Rasio disipasi energi pada spesimen	96
Gambar 55	Rasio akumulatif disipasi energi pada spesimen	97
Gambar 56	Rasio disipasi energi relatif	98
Gambar 57	Disipasi energi daerah sendi plastis KK, KR01, KR02	100
Gambar 58	Disipasi energi daerah sendi plastis KR01 dan KR02	101

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Desain penampang kolom	112
Lampiran 2	Pembebanan siklik	127
Lampiran 3	Kurva disipasi energi spesimen KK	128
Lampiran 4	Kurva disipasi energi spesimen KR01	129
Lampiran 5	Kurva disipasi energi spesimen KR02	131
Lampiran 6	Foto dokumentasi penelitian	133

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A_g	Luas bruto penampang beton (mm^2)
A_{st}	Luas penampang tulangan longitudinal (mm^2)
D	Degradasi kekuatan kolom yang dibebani siklik
d_{bl}	Diameter tulangan longitudinal kolom (mm)
E	Disipasi energi (kN.mm)
E_D	Disipasi energi pada daerah sendi platis (kN.mm)
E_{max}	Beban lateral maksimum (kN)
f'_c	Kuat tekan beton (MPa)
f'_{cc}	Kuat tekan beton terkekang (MPa)
f_y	Kuat leleh baja tulangan (MPa)
H	Lebar kolom (mm)
K	Kekakuan (kN/mm)
K_0	Kekakuan awal (kN/mm)
K'	Kekakuan sekan (kN/mm)
L_c	Tinggi kolom (mm)
L_p	Perkiraan panjang daerah sendi plastis (mm)
n	Jumlah siklus selama pengujian
P	Beban yang bekerja arah lateral (kN)
P_{cr}	Beban pada saat retak pertama (kN)
P_f	Gaya puncak akibat beban siklik yang bekerja
P_y	Beban pada saat leleh (kN)
r_s	Rasio kekakuan awal dengan kekakuan sekan

r_1	Rasio simpangan tahanan lateral (%)
r_2	Simpangan minimum sebesar 0,035 (%)
Δ	Simpangan atau defleksi yang terjadi
Δ_{cr}	Simpangan pada saat retak pertama (mm)
Δ_y	Simpangan pada saat leleh (mm)
ε	Regangan
μ	Daktalitas
ψ_f	Faktor reduksi material pengekangan

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan energi potensial dari dalam perut bumi yang kemudian menjalar ke permukaan bumi dalam bentuk gelombang gempa yang dapat disebabkan oleh aktivitas pergerakan pelat tektonik atau sumber lain, seperti aktivitas vulkanik dan ledakan dalam perut bumi akibat aktivitas pertambangan atau pengujian bom. Dari ketiga penyebab gempa bumi tersebut, gempa bumi yang terjadi akibat aktivitas pergerakan lempeng tektonik merupakan gempa bumi yang berpotensi merusak dan menimbulkan korban jiwa. Sampai saat ini, gempa bumi tektonik merupakan fenomena alam yang belum dapat diprediksi kapan terjadinya, dimana lokasinya dan berapa besar energi yang akan dilepaskan, sehingga setiap terjadi peristiwa gempa bumi cenderung bersifat merusak dan memakan korban jiwa (Tjokrodimulyo, 1997).

Menurut Parung (2012) bahwa gempa bumi menyebabkan ribuan orang meninggal setiap tahun, baik secara langsung ataupun tidak langsung. Selain itu, gempa bumi tidak hanya menyebabkan terjadinya kerusakan pada struktur, tetapi menyebabkan terjadinya ledakan gas, memicu kebakaran dan dalam beberapa tahun terakhir ini, gempa bumi telah mengakibatkan kehilangan banyak nyawa di Jepang, China dan Indonesia.

Menurut Bird (2003), bahwa Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Sedangkan menurut Milson et.al (1992), akibat interaksi

yang terjadi antara lempeng-lempeng tektonik tersebut, menempatkan Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi, dimana hal ini terlihat dari tingginya aktivitas kegempaan yang terjadi, dimana terdapat lebih dari 14000 kejadian gempa dengan magnitudo lebih dari 5 skala Richter yang terjadi dalam rentang Tahun 1897 sampai 2009 (Irsyam et.al, 2010).

Permasalahan utama yang muncul pada saat terjadinya gempa adalah kerusakan dan kegagalan infrastruktur bangunan sipil (Irsyam et.al, 2010) dan salah satu kerusakan dominan pada struktur akibat beban gempa, disebabkan oleh perencanaan dan daktilitas struktur yang kurang baik, dimana kedua hal ini menjadi persyaratan penting dan pertimbangan secara ekonomis, sehingga pengaruh energi gempa terhadap bangunan dapat diserap dan disebarkan melalui mekanisme inelastik, tetapi tetap dalam kondisi yang terkendali (Park dan Paulay, 1975). Sedangkan menurut Mangkoesoebroto (2010), bahwa tipikal dari bentuk kerusakan dan kegagalan pada kolom akibat gempa, lebih didominasi oleh kerusakan geser dan kegagalan tulangan longitudinal kolom akibat pengaruh tekuk. Selain itu, penyebab kerusakan dan kegagalan kolom juga disebabkan oleh terlampauinya gempa rencana, seperti pada gempa yang terjadi di Aceh dan Padang (Irsyam et.al, 2010), serta gempa di Yogyakarta (Elnashai et.al, 2006).

Sebagai bagian dari struktur yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan gaya aksial, komponen kolom harus didesain memiliki kekuatan, stabilitas dan daktilitas, sehingga dapat meneruskan beban-beban dari balok ke tanah melalui pondasi. Dengan demikian kolom menempati posisi penting, karena kegagalan kolom akan berakibat langsung pada runtuhnya komponen struktur lain yang berhubungan dengan kolom.

Menurut Mcdonald (2008), bahwa pada bagian struktur beton bertulang yang mengalami kerusakan akibat gempa dapat diganti dengan struktur baru, tetapi jika jumlah kerusakan yang terjadi cukup banyak khususnya pada bangunan-

bangunan publik, maka hal tersebut memerlukan biaya yang cukup besar. Untuk mengatasi hal tersebut, salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan memperkuat dan memperbaiki pada komponen struktur beton bertulang khususnya kolom yang telah mengalami kerusakan pasca gempa. Perbaikan kerusakan saja tidak cukup, sehingga untuk mencegah terjadinya kerusakan dengan penyebab yang sama, dibutuhkan perbaikan yang sifatnya dapat mengembalikan dan meningkatkan kemampuan struktur atau yang dikenal dengan istilah *retrofit*.

Menurut Bayrak dan Sheik (2002) bahwa untuk mendapatkan kolom persegi yang berperilaku daktail, dapat diperoleh dengan cara pendetailan pengekangan (*detailing confinement*) yang baik, dimana kekangan yang ditimbulkan oleh tulangan lateral tersebut, sangat dipengaruhi oleh beberapa hal seperti persentase tulangan lateral yang terpasang, kuat leleh tulangan lateral, kuat tekan beton, spasi tulangan lateral dan bentuk dari tulangan lateral.

Menurut Siddiq (1997), bahwa daktilitas kolom beton bertulang sangat ditentukan oleh cara dan mekanisme terbentuknya sendi plastis pada ujung-ujung kolom yang disebabkan oleh gaya luar yang bekerja khususnya gaya gempa. Sendi plastis dapat terjadi pada kolom beton bertulang, ketika kolom mengalami kelebihan beban, terutama pada saat terjadinya gempa bumi.

Menurut Jiang et.al (2014), bahwa kegagalan pada daerah sendi plastis kolom dapat dikurangi dengan cara menambahkan jaket pada kolom, dimana untuk meminimalkan pekerjaan *jacketing* pada kolom, maka panjang zona sendi plastis yang terjadi pada kolom harus diketahui berdasarkan pertimbangan, bahwa desain harus berbasis pada kinerja kolom dan pengaruh deformasi yang terjadi pada kolom.

Secara umum metode retrofit pada kolom diklasifikasikan berdasarkan material yang digunakan, dimana secara garis besar terdiri dari penggunaan jaket beton (*concrete jacketing*), jaket baja (*steel jacketing*), jaket laminasi *ferrocement*

(*ferrocement laminate jacketing*), pemasangan kekangan *Fiber Reinforced Polymer (FRP confinement)* dan kombinasi material lainnya (Ma, et.al, 2016).

Setiap metode retrofit pada kolom, memiliki kelebihan dan kekurangannya tersendiri dan salasatu metode yang sangat populer adalah penggunaan *Fiber Reinforcement Polymer (FRP)* seperti jenis *Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP)*, *Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)*, *Aramid Fibre Reinforced Polymer (AFRP)* dan lain sebagainya (Ma, et.al, 2016). Salah satu kendala dalam penggunaan material fiber adalah harga material yang cukup mahal, sehingga belum dapat sepenuhnya untuk diterapkan di Indonesia, khususnya pada bangunan-bangunan publik, di daerah-daerah terpencil yang rawan gempa.

Untuk mengantisipasi hal tersebut, maka dalam penelitian ini dilakukan pendekatan menggunakan material kekangan dengan harga yang relatif lebih murah dan mudah didapatkan dipasaran, yaitu *wire mesh*. Alasan lain, *wire mesh* juga cukup fleksibel dalam membentuk pola kekangan seperti kekangan persegi, hexagonal, bulat dan pemasangan *wire mesh* dengan jumlah lapis tertentu dapat menghasilkan nilai daktilitas yang cukup signifikan pada kolom yang dibebani dengan beban siklik, serta dapat meningkatkan kuat geser kolom (Kadir, et.al, 2016). Untuk material beton yang digunakan dalam pekerjaan retrofit digunakan *self compacting concrete*, dengan pertimbangan bahwa SCC adalah beton yang memiliki sifat plastis dan dapat mengalir sendiri tanpa memerlukan alat pemadat, lebih homogen dan stabil dengan penggunaan diameter agregat maksimum 10 mm, sehingga sesuai apabila digunakan sebagai bahan retrofit pada kolom dengan ketebalan rencana 50 mm.

B. Rumusan Masalah

Jarangnya penelitian retrofit kolom dengan *wire mesh* membuka ruang untuk penelitian lanjutan atau modifikasi dengan memasang *wire mesh* sebagai material jaket beton menggunakan *self compacting concrete*.

Sesuai dengan definisi dari retrofit yang merupakan metode untuk mengembalikan dan meningkatkan kemampuan komponen struktur, maka dalam penelitian ini, akan dilakukan kajian eksperimental pada kolom persegi beton bertulang, untuk menjawab permasalahan berikut ini :

1. Bagaimana efek pemasangan retrofit dengan *wire mesh* dan SCC terhadap kekuatan kolom persegi beton bertulang dalam menerima beban siklik yang bekerja pada model kolom yang diretrofit penuh sepanjang badan kolom, model kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis dan pada model kolom yang tidak diretrofit ?
2. Bagaimana efek pemasangan retrofit dengan *wire mesh* dan SCC terhadap perilaku daktilitas dan kekakuan kolom persegi beton bertulang akibat beban siklik, pada model kolom yang diretrofit penuh sepanjang badan kolom, model kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis dan pada model kolom yang tidak diretrofit ?
3. Bagaimana efek pemasangan retrofit dengan *wire mesh* dan SCC terhadap kapasitas disipasi energi kolom persegi beton bertulang akibat beban siklik, pada model kolom yang diretrofit penuh sepanjang badan kolom, model kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis dan pada model kolom yang tidak diretrofit ?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengevaluasi efek pemasangan retrofit dengan *wire mesh* dan SCC terhadap kekuatan kolom persegi beton bertulang dalam menerima beban siklik yang bekerja pada model kolom yang diretrofit penuh sepanjang badan kolom, model kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis dan pada model kolom yang tidak diretrofit.
2. Untuk mengevaluasi efek pemasangan retrofit dengan *wire mesh* dan SCC terhadap perilaku daktilitas dan kekakuan kolom persegi beton bertulang yang mengalami beban siklik, pada model kolom yang diretrofit penuh sepanjang badan kolom, model kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis dan pada model kolom yang tidak diretrofit.
3. Untuk mengevaluasi efek pemasangan retrofit dengan *wire mesh* dan SCC terhadap kapasitas disipasi energi kolom persegi beton bertulang yang mengalami beban siklik, pada model kolom yang diretrofit penuh sepanjang badan kolom, model kolom yang diretrofit pada daerah sendi plastis dan pada model kolom yang tidak diretrofit.

D. Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penampang yang digunakan adalah penampang persegi dengan dimensi 300 mm x 300 mm, tulangan longitudinal menggunakan tulangan ulir 8D13, tulangan transversal menggunakan tulangan polos $\varnothing 8 - 150$, yang kemudian diretrofit pada bagian luar menggunakan *wire mesh* dengan diameter M6 yang dipasang penuh pada badan kolom dan dipasang pada daerah sendi plastis kolom.
2. Model benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah kolom kantiliver dengan bentang geser yang konstan yaitu 1465 mm.

3. Beban horisontal yang bekerja adalah sebagai beban siklik bolak balik dengan riwayat pembebanan yang sama pada semua model spesimen yang didasarkan pada SNI 7834:2012.

E. Manfaat Penelitian

Wire mesh dalam hal ini besi anyam dapat dimanfaatkan sebagai tulangan pengekang dalam (sengkang) dan tulangan pengekang luar dengan tujuan *retrofit* pada kolom-kolom dengan potensi gagal geser akibat beban gempa.

Penelitian tentang penggunaan jaket beton (*concrete jacketing*), jaket baja (*steel jacketing*), jaket laminasi *ferrocement* (*ferrocement laminate jacketing*), pemasangan kekangan *Fiber Reinforced Polymer* (*FRP confinement*) dan kombinasi material lainnya sudah banyak dilakukan, sehingga dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi dengan menggunakan *wire mesh* sebagai bahan retrofit yang dipasang penuh pada badan kolom dan dipasang pada daerah sendi plastis kolom.

Penggunaan *wire mesh* sebagai bahan retrofit dalam penelitian ini, diharapkan dapat menjadi solusi dan sebagai material alternatif untuk bahan retrofit kolom pada bangunan di daerah tahan gempa khususnya kawasan terpencil, dengan pertimbangan bahwa material ini mudah didapat di pasaran, harga relatif lebih terjangkau dibandingkan material berbahan dasar serat *fiber carbon* dan mudah dikerjakan karena tidak memerlukan keahlian khusus dalam metode pelaksanaannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Isu Strategis

Gempa bumi merupakan fenomena alam yang belum dapat diprediksi kapan akan terjadi, dimana lokasi terjadinya dan berapa besar energi (*magnitude*) yang akan dilepaskan pada saat terjadinya gempa. Pada umumnya, gempa bumi yang terjadi lebih dominan disebabkan oleh aktivitas pelat tektonik, dimana gempa tektonik selalu membawa ancaman dan potensi kerusakan pada struktur bangunan khususnya pada bangunan-bangunan yang tidak didesain dan dibuat berdasarkan standar dan peraturan struktur tahan gempa.

Menurut Parung (2012), bahwa kerusakan yang terjadi pada struktur akibat gempa sangat bervariasi, mulai dari kerusakan non struktural sampai kerusakan total, dimana perbedaan kerusakan ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti *magnitude* gempa, kekakuan struktur, massa struktur, periode alami struktur dan kemampuan struktur dalam menyerap dan menyalurkan energi gempa.

Menurut Seible et.al, (1997) bahwa kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan akibat gempa bumi dapat bervariasi, mulai dari kerusakan ringan sampai dengan kerusakan berat dan salah satu kerusakan yang paling berbahaya pada struktur adalah terjadinya keruntuhan kolom yang dapat mengakibatkan keruntuhan total dari struktur bangunan. Menurut Tsonos (2008) bahwa struktur yang dibangun pada periode tahun 1960an dan 1970an memiliki kekurangan pada desain, khususnya pengaruh akibat gaya lateral dan memiliki daktilitas yang rendah, sehingga hal ini yang menjadi alasan mengapa konstruksi yang dibangun pada era tersebut rawan terhadap gempa.

Menurut Abdullah dan Takiguchi (2003), bahwa pada struktur kolom beton bertulang yang dibangun sebelum era tahun 1980an, kegagalan geser yang bersifat getas merupakan salasatu penyebab utama terjadinya kegagalan struktur akibat gempa besar. Kerusakan kolom akibat gempa dapat berupa kerusakan geser, kerusakan pada daerah sendi plastis akibat pengekangan yang kurang memadai dan kerusakan pada daerah sambungan lewatan tulangan dan menurut Seible et.al (1997) bahwa dari beberapa tipe kerusakan yang terjadi pada kolom, kerusakan geser dianggap sebagai kerusakan yang paling berbahaya, karena dapat mengakibatkan terjadinya keruntuhan struktur secara tiba-tiba.

Menurut Williams et.al (1997), pada struktur dengan tingkat kerusakan sedang, masih dapat diperbaiki dengan beberapa metode dan salah satunya adalah dengan cara perbaikan dan perkuatan yang merupakan konsep *retrofit* untuk meningkatkan atau mengembalikan kekuatan dan daktilitas struktur tersebut.

Di Indonesia, potensi dan bahaya akibat gempa bumi selalu mengancam, khususnya pada bangunan-bangunan publik di daerah rawan gempa yang sudah dibangun sebelum peraturan gempa Indonesia berdasarkan Peta Hazard Tahun 2017 dan SNI 1726-2019 diterbitkan. Untuk mengantisipasi hal tersebut, perlu dilakukan kajian terhadap struktur yang dibangun dengan peraturan lama dan implementasi standar yang berlaku dalam setiap desain dan pelaksanaan konstruksi, khususnya di daerah-daerah terpencil yang rawan gempa.

Penggunaan material dengan kualitas tinggi seperti serat *fiber carbon* yang diperkuat dengan polimer sudah sangat populer di dunia, tetapi untuk penerapannya pada daerah-daerah yang rawan gempa di Indonesia dan kawasan terpencil, masih terkendala pada mahalnnya harga material, ketersediaan di pasaran dan memerlukan metode pelaksanaan yang menuntut ketrampilan khusus dari pekerjaanya. Untuk mengantisipasi hal tersebut, pengembangan

metode retrofit dengan penggunaan *wire mesh* dianggap cocok untuk diterapkan di Indonesia, khususnya untuk bangunan di daerah terpencil yang rawan gempa.

Penggunaan *wire mesh* dalam hal ini besi anyam sebagai material konstruksi sudah sangat familier di kalangan masyarakat, sehingga dengan harga yang lebih terjangkau dan metode pelaksanaan yang mudah dan praktis, *wire mesh* dianggap dapat memenuhi semua kriteria tersebut sebagai material retrofit pada kolom yang dikombinasikan dengan *Self Compacting Concrete* atau menggunakan beton normal dengan ukuran agregat yang lebih kecil, untuk diterapkan pada konstruksi rawan gempa di Indonesia.

B. Metode Retrofit Kolom

Menurut Julio, et. al (2003) kebutuhan untuk merehabilitasi struktur dapat muncul sejak awal tahap konstruksi, sampai akhir masa layan dari struktur tersebut. Dimana pada masa konstruksi, perbaikan struktur dilakukan dengan alasan kesalahan desain atau terjadi kesalahan dalam pelaksanaan. Sedangkan selama masa layan struktur, perbaikan dilakukan dengan alasan karena kerusakan akibat gempa bumi, kebakaran, ledakan, perubahan fungsi struktur dan penyesuaian akibat perubahan standar.

Menurut Tsonos (2008), pada struktur yang mengalami kerusakan akibat gempa, benturan dan kelebihan beban, perlu untuk segera dilakukan pencegahan dan perbaikan, dimana hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan total (*collapse*) pada struktur tersebut. Sedangkan menurut Sham, et.al, (2013), bahwa selain kerusakan yang disebabkan oleh gempa, perbaikan dan perkuatan pada struktur dapat dilakukan dengan alasan terjadinya peningkatan beban akibat penggunaan struktur, terjadi pembaharuan standar desain atau perbaikan akibat kesalahan yang terjadi selama masa pelaksanaan konstruksi (Julio, et.al, 2003).

Menurut Sugano (1981) bahwa pemilihan metode perbaikan dan perkuatan struktur tergantung pada tujuan terhadap perilaku struktur, dimana secara umum tujuan dari perbaikan dan perkuatan struktur adalah untuk meningkatkan ketahanan terhadap beban lateral, memperbaiki daktalitas dan hubungan antara ketahanan lateral dengan daktalitas. Berdasarkan hal tersebut, maka teknik perkuatan struktur dapat dilakukan dengan cara menambah elemen struktur yang baru atau memperkuat elemen struktur yang ada (Julio, et.al, 2003).

Sampai awal tahun 1990an metode yang paling umum digunakan untuk retrofit pada kolom beton bertulang, adalah dengan menggunakan jaket dari tulangan baja dan beton (Chai, et.al, 1991), atau hanya menambah dan memperbesar penampang kolom (Rodriguez dan Park, 1994).

C. Tipe Metode Retrofit Pada Kolom

Menurut Macdonald (2008), kerusakan yang terjadi pada struktur dapat diatasi dengan beberapa variasi metode seperti, membatasi penggunaan fungsi struktur, membongkar bagian struktur yang rusak, merekonstruksi sebagian atau keseluruhan dari struktur dengan menggunakan teknik perbaikan yang cepat.

Menurut Ilki, et.al, (2008), Wu, et.al (2014), Zhou, et.al (2015) dan Panjehpour, et. al (2016), bahwa perbaikan pada komponen struktur yang mengalami kerusakan, lebih didasarkan pada pertimbangan ekonomi dan waktu. Sedangkan menurut Ma, et.al (2017), bahwa metode retrofit pada kolom dengan menggunakan kekangan (*confinement*), mampu mengembalikan kemampuan kolom dalam menerima beban yang bekerja. Selain itu, menurut Stoppenhagen, et.al (1995), Lehman, et.al (2001), Lacobucci, et. al (2003) dan Gu, et.al (2012) bahwa metode retrofit dengan menggunakan kekangan (*confinement*), dapat meningkatkan daktalitas dari beton yang telah mengalami kerusakan. Walaupun

demikian, penggunaan kekangan sebagai metode retrofit pada kolom belum dapat diterima sebagai metode yang andal, hal ini disebabkan oleh alasan bahwa pemasangan kekangan harus lebih kompetitif dari segi ekonomi, diperlukan data yang lebih andal yang harus diuji sepanjang masa dan masih memerlukan pengembangan dalam jangka panjang (Ma, et.al, 2017).

Berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya, metode retrofit dengan menggunakan kekangan pada kolom, diklasifikasikan berdasarkan material yang digunakan sebagai pengekang yaitu, jaket beton (*concrete jacketing*), jaket baja (*steel jacketing*), jaket lapisan ferrocement (*ferrocement laminate jacket*), kekangan *Fibre Reinforced Polymer (FRP confinement)* dan kekangan kombinasi.

1. Jaket Beton

Dari sekian banyak metode retrofit pada kolom, penggunaan jaket beton (*concrete jacketing*) dapat dianggap sebagai metode yang pertama kali digunakan dan dikembangkan untuk mengatasi kerusakan yang terjadi pada kolom, dimana metode ini dilakukan dengan cara menutup bagian kolom yang rusak dengan menambahkan lapisan penulangan dan beton yang baru sebagai kekangan luar (Ma, et.al, 2017).

Secara umum efektivitas dari penggunaan jaket beton, sangat terkait pada perilaku komposit dari kedua material, sehingga yang perlu diperhatikan dalam metode ini adalah perlakuan terhadap antar muka atau bagian permukaan beton yang lama dengan lapisan jaket beton yang baru. Untuk meningkatkan lekatan antar muka, berbagai material dicoba digunakan seperti menggunakan *resin epoxy* dan konektor baja. Sedangkan untuk mengurangi ketebalan lapisan jaket beton, dapat menggunakan beton dengan mutu tinggi dan untuk mengatasi kesulitan

pemadatan beton dapat digunakan *self compacting concrete* (SCC) dan *short concrete* sebagai lapisan selimut beton (Ma, et.al, 2017).



Gambar 1. Contoh metode *concrete jacketing* pada kolom

(Sumber : www.svc92.com)

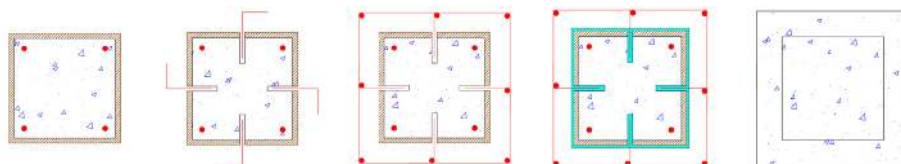
Dari hasil penelitian Bett, et.al (1988) terhadap kolom yang mengalami kerusakan akibat beban aksial dan beban lateral dan kemudian diretrofit dengan menggunakan jaket beton, didapat hasil bahwa kekakuan dan kapasitas kolom terhadap beban lateral lebih tinggi, dibandingkan kemampuan kolom kontrol atau kolom tanpa perkuatan.

Ersoy, et. al (1993), melakukan penelitian yang sama terhadap perilaku kolom yang diretrofit dengan menggunakan jaket beton, namun parameter yang diuji adalah kemampuan kolom terhadap beban uniaksial dan kombinasi antara beban uniaksial dan beban siklik. Dari hasil penelitian tersebut, kemudian disimpulkan bahwa, kolom yang diretrofit dengan menggunakan jaket beton lebih baik dari pada kolom yang tidak diretrofit dengan jaket beton.

Penelitian yang sama juga dilakukan oleh Rodrigez dan Park (1994) dengan menguji 4 buah kolom persegi menggunakan beban seismik, dimana 2 buah kolom

diuji terlebih dahulu sampai rusak kemudian diperbaiki dengan jaket beton, selanjutnya diuji kembali sampai rusak dan 2 buah kolom lainnya langsung diperkuat dengan jaket beton dan diuji sampai mengalami kerusakan. Dari hasil penelitian ini, kemudian disimpulkan bahwa kekuatan dan daktilitas kolom yang telah rusak kemudian diperbaiki dengan jaket beton mengalami kenaikan yang signifikan. Sedangkan kekuatan pada kolom utuh yang langsung diperkuat dengan jaket beton menghasilkan kekuatan dan daktilitas yang sangat besar.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Eduardo, et.al (2005) terhadap 7 buah spesimen pilar kolom dengan skala penuh yang dibebani beban monotonik dengan parameter yang diuji adalah pengaruh antar muka (lekatan) pada permukaan lapisan jaket beton. Dari hasil penelitian ini disimpulkan bahwa efektifitas perilaku komposit pada kolom yang langsung diperkuat dengan jaket beton lebih baik dibandingkan dengan kolom yang telah rusak, kemudian diperbaiki.



Gambar 2. Variasi metode *concrete jacketing* pada kolom

(Sumber : www.theconstructor.org)

Penelitian yang serupa juga dilakukan oleh Yuce, et.al (2007) dengan parameter yaitu, efektifitas penggunaan jaket tipis pada kolom yang diperbaiki dengan menggunakan *self compacting concrete* sebagai material jaket dan diuji menggunakan beban aksial konstan dan beban siklik. Dari hasil penelitian ini, kemudian disimpulkan bahwa, kemampuan jaket beton dari *self compacting concrete* mampu mengembalikan kekuatan dan daktilitas dari penampang kolom

yang telah mengalami kerusakan, bahkan meningkatkan kekakuan lateral dari kolom tersebut.

Selain memiliki kelebihan, penggunaan jaket beton pada kolom juga memiliki kekurangan yaitu, memerlukan biaya yang cukup besar dalam proses pembersihan permukaan beton yang lama dan kekasaran antar muka akan mempengaruhi kompaktibilitas dari penampang komposit tersebut. Selain itu, pengeboran untuk pemasangan konektor baja dapat mengganggu struktur yang ada dan terjadi penambahan dimensi dari kolom yang diperbaiki, sehingga mengurangi nilai estetika dari penampang kolom (Ma, et.al, 2017).

2. Jaket Baja

Penelitian tentang jaket baja (*steel jacketing*) sebagai metode retrofit pada kolom, sudah dimulai sejak tahun 1985 oleh Sakino dan Ishibashi menggunakan model benda uji dibuat dari tabung baja yang kemudian diisi dengan beton, yang bertujuan untuk mengetahui peningkatan kekuatan dan deformabilitas dari kolom. Dari hasil penelitian tersebut, kemudian disimpulkan bahwa kolom akan mengalami tekuk pada daerah sendi plastis, jika pada kolom tersebut bekerja gaya lateral (Ma, et.al, 2017).

Pada tahun 1987, Tomii, Sakino dan Xiao melanjutkan penelitian Sakino dan Ishibashi dengan tujuan untuk mengetahui perilaku kegagalan geser dan daktilitas pada kolom pendek tersebut. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa kolom dengan penampang bulat mempunyai kemampuan daktilitas dan geser yang lebih baik dibandingkan dengan kolom persegi pada saat beban aksial yang bekerja melebihi 30% dari kapasitas kolom (Xiao dan Wu, 2003).



Gambar 3. Contoh metode *steel jacketing* pada kolom

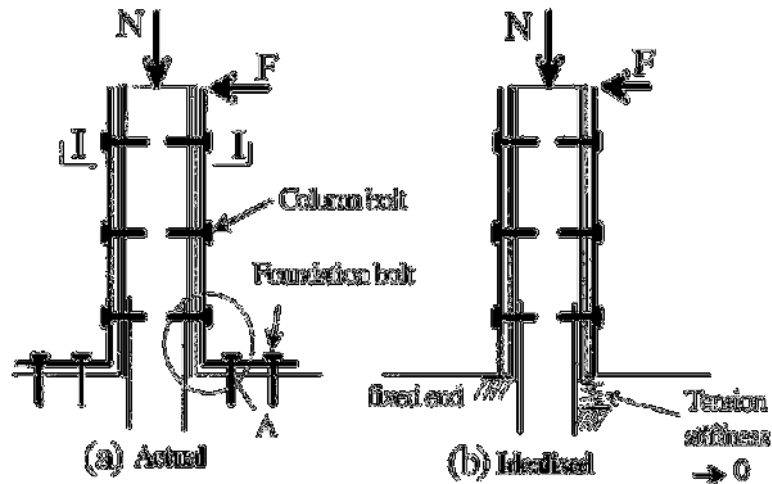
(Sumber : www.horsen.com)

Pada tahun 1997, Ghobarah, et.al melakukan penelitian dengan menggunakan baja bergelombang (*corrugated steel*) yang dipasang pada daerah sendi plastis kolom sebagai kekangan, dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan geser dan daktalitas lateral kolom. Dalam penelitian ini, spesimen diuji dengan beban aksial konstan dan beban siklik, dimana dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa, pemasangan baja bergelombang sebagai kekangan atau jaket baja pada kolom, dapat meningkatkan kapasitas resistensi kolom terhadap pengaruh beban seismik dan penelitian lanjutan kemudian dilakukan untuk mengetahui efektifitas dari penggunaan jaket baja tersebut.

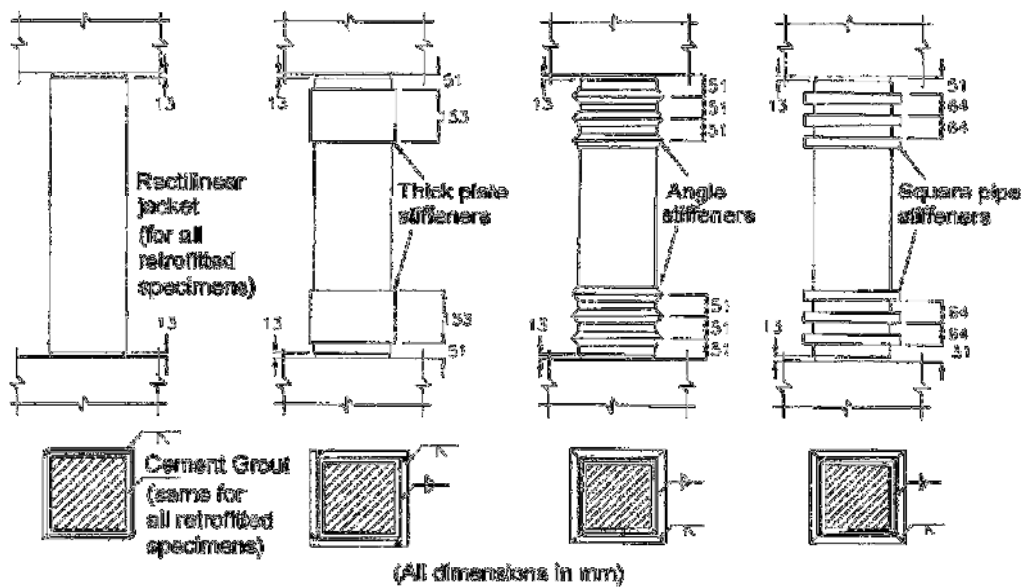
Penelitian yang serupa juga dilakukan oleh Wu, et.al (2003), dengan menggunakan pelat baja dan menggunakan konektor baja yang dipasang sebagai kekangan pada kolom persegi beton bertulang dan dari hasil pengujian disimpulkan bahwa jaket baja sebagai kekangan dapat meningkatkan daktalitas kolom secara signifikan.

Penelitian yang sama juga dilakukan Xiao dan Wu (2003) dengan menggunakan 4 variasi spesimen yaitu, kolom yang dibungkus secara utuh dengan pelat baja yang dilas pada keempat sudutnya, pelat baja, baja siku dan

pipa persegi yang hanya dipasang pada daerah sendi plastis kolom sebagai pengaku. Dari hasil penelitian tersebut, kemudian disimpulkan bahwa penggunaan jaket baja (*steel jacketing*) merupakan metode yang paling efisien untuk meningkatkan daktilitas penampang kolom yang telah mengalami kerusakan.



Gambar 4. Model benda uji penelitian Wu, et.al (2003)



Gambar 5. Model benda uji penelitian Xiao dan Wu (2003)

Penelitian yang sama juga dilakukan oleh Sarno, et.al (2005) terhadap kolom persegi beton bertulang dengan menggunakan jaket baja dari pelat *stainless steel* yang dipasang sebagai bingkai pada kolom. Dari hasil penelitian ini disimpulkan bahwa pemakaian pelat *stainless steel* sebagai jaket baja yang dipasang sebagai bingkai pada kolom, dapat meningkatkan kapasitas deformasi plastis dan kemampuan disipasi energi secara signifikan. Selain itu, penggunaan pelat *stainless steel* sebagai bingkai dapat mencegah terjadinya kegagalan akibat tekuk lokal. Selain keuntungan, dari hasil penelitian ini juga menemukan sisi kelemahannya yaitu, efektifitas penampang sangat rendah pada bagian sudut atau siku yang menyebabkan kemampuan kolom terhadap lentur menjadi tidak efektif sehingga membatasi deformabilitas pada kolom.

3. Kekangan *Fiber Reinforced Polymer*

Menurut Saadatmanesh, et.al (1994), Seible, et.al (1997), sejak awal tahun 1990an metode retrofit pada kolom berkembang dengan penggunaan bahan yang terbuat dari serat yang diperkuat dengan polimer (FRP) sebagai pembungkus bagian luar dari kolom yang mengalami kerusakan (Wu, et.al, 2003) dan hingga saat ini, penggunaan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) sebagai kekangan, merupakan metode yang sangat populer (Ma, et.al, 2016).

Penelitian dengan tujuan perbaikan pada kolom yang rusak dengan menggunakan FRP dilakukan juga oleh Tastani, et.al (2004) dengan parameter perbaikan pada kolom yang rusak akibat suhu rendah, Liu, et.al (2005) dengan parameter perbaikan pada kolom akibat beban aksial dan Green, et.al (2006) dengan parameter perbaikan pada kolom akibat pengaruh korosi elektrokimia yang dipercepat.

Penelitian lanjutan kemudian dilakukan oleh Wu, et.al (2006) pada spesimen kolom persegi beton bertulang yang diperkuat dengan FRP dan dari hasil

penelitian tersebut disimpulkan bahwa pengaruh radius sudut pada tepi kolom persegi, sangat berpengaruh pada efektifitas pemasangan kekangan pada kolom.

Penelitian dengan penggunaan *Carbon Reinforced Fiber Polymer* (CFRP), dilakukan oleh Xiao dan Wu (2000) pada spesimen silinder beton yang dilapisi dengan *Carbon Reinforced Fiber Polymer* (CFRP) dan diuji dengan beban aksial disimpulkan bahwa pemasangan CFRP sebagai kekangan, dapat meningkatkan kekuatan dan daktalitas beton, tetapi hal tersebut sangat bergantung pada mutu beton yang digunakan dan nilai modulus kekangan.



Gambar 6. Contoh metode *Fiber Reinforced Polymer jacketing* pada kolom

(Sumber : www.theconstructor.org)

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Valdmanis, et.al (2007) yang menganalisa sifat mekanik beton yang dikekang dengan CFRP dan disimpulkan bahwa penggunaan CFRP dapat mereduksi kekuatan hingga 50%. Penelitian yang sama juga dilakukan oleh Panjehpour, et.al (2016) terhadap spesimen silinder yang rusak akibat beban aksial dan beban uniaksial, dimana dari hasil pengujian tersebut disimpulkan bahwa spesimen yang dikekang dengan CFRP memiliki kemampuan menyerap energi 3 kali lebih besar dibandingkan spesimen yang tidak dikekang dengan CFRP (Ma, et.al, 2016).

4. Jaket Laminasi *Ferrocement*

Menurut Baston, et.al, (1988), *ferrocement* dapat didefinisikan sebagai lapisan beton bertulang tipis yang terdiri dari kombinasi antara mortar dengan jaringan kawat atau bahan-bahan serat lainnya. Dari hasil pengujian dilaporkan bahwa penggunaan bahan *ferrocement* dapat meningkatkan kekuatan, ketahanan terhadap retak, daktilitas dan durabilitas komponen struktur. Selain itu, *ferrocement* juga sangat tipis, karena pada umumnya hanya memiliki ketebalan kurang dari 25 mm.

Penelitian tentang penggunaan *ferrocement* sebagai bahan retrofit pada kolom dimulai pada tahun 2001 oleh Takiguchi dan Abdullah. Dalam penelitian tersebut, mereka melakukan analisa terhadap 4 buah spesimen kolom yang diperkuat dengan ukuran kawat yang berbeda dan 2 buah spesimen kolom yang tidak diperkuat dengan *ferrocement*. Spesimen kolom, kemudian diuji dengan kombinasi beban siklik dan beban aksial, dimana dari hasil pengujian didapat bahwa, kolom yang diperkuat dengan *ferrocement* memiliki kemampuan kolom geser yang lebih baik dibandingkan kolom yang tidak diperkuat oleh *ferrocement*.



Gambar 7. Contoh metode *ferrocement laminate jacketing* pada kolom

(Sumber : www.theconstructor.org)

D. Self Compacting Concrete

1. Definisi Self Compacting Concrete

Pengembangan *self compacting concrete* (SCC) merupakan salah satu kemajuan paling revolusioner dalam sejarah perkembangan beton (Efnarc, 2005). Beton memadat sendiri atau dikenal dengan *Self Compacting Concrete* (SCC) pertama kali dikembangkan di Jepang pada tahun 1986 yang dimulai dengan studi pendahuluan untuk mengetahui kinerja dari beton memadat sendiri. Sedangkan prototipe dari beton memadat sendiri, pertama kali selesai dibuat pada tahun 1988 menggunakan material yang beredar di pasaran, dimana dari hasil pengujian terhadap prototipe ini, memberikan hasil yang memuaskan terhadap kinerja beton yang meliputi, pengerasan, susut, panas hidrasi, kekuatan setelah mengeras dan sifat-sifat beton lainnya, yang kemudian diberi nama *High Performance Concrete* (Okamura dan Ouchi, 2003).

Menurut Okamura dan Ouchi (2003), *self compacting concrete* adalah beton segar yang memiliki fluiditas tinggi sehingga dapat mengalir sendiri dan mengisi ruang-ruang dalam cetakan dengan sedikit atau tanpa proses penggetaran. Sedangkan menurut *European Federation of Specialist Chemicals and Concrete Constructions Systems* (EFNARCS) bahwa *self compacting concrete* merupakan material beton inovatif yang tidak memerlukan getaran atau alat pemadat, karena beton dapat mengalir, sehingga dapat mengisi setiap ruang-ruang yang kosong, termasuk pada bagian-bagian yang sulit dijangkau dengan alat pemadat, seperti pada struktur dengan penulangan yang kompleks (Efnarcs, 2005).

2. Sifat dan Komposisi Campuran Self Compacting Concrete

Menurut Nagataki dan Fujiwara (1995), bahwa karakteristik dari *self compacting concrete* adalah memiliki nilai *slump* yang berkisar antara 500 – 700

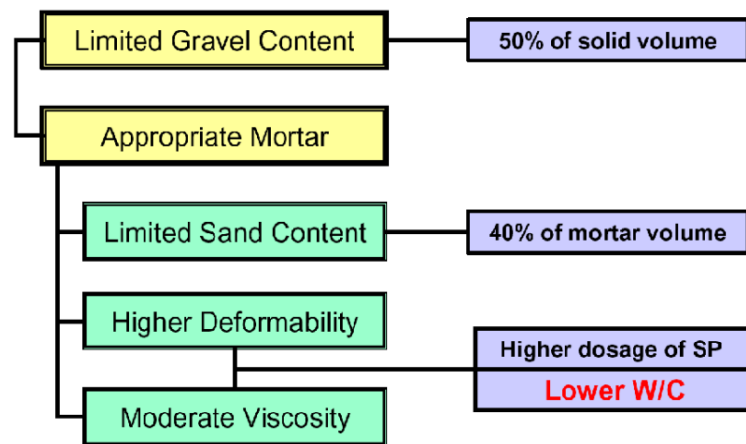
mm. Sedangkan menurut Okamura dan Ouchi (2003) bahwa nilai *slump* pada *self compacting concrete* menunjukkan bahwa campuran atau pasta beton tersebut, memiliki nilai kuat geser dan lentur yang rendah, sehingga beton dapat masuk dan mengalir dengan mudah, serta memiliki ketahanan yang tinggi terhadap terjadinya pemisahan antara agregat dengan pasta beton (*segregasi*), pada saat beton sedang mengalir untuk mengisi daerah penulangan.

Menurut *European Federation of Specialist Chemicals and Concrete Constructions Systems* (2005), bahwa untuk menghasilkan tingkat kemudahan dalam pengerjaan (*workability*) yang cukup baik pada *self compacting concrete*, beton tersebut diharuskan mempunyai kemampuan campuran yang baik dalam mengisi ruang (*fillingability*), kemampuan campuran yang baik untuk melewati zona atau ruang yang rapat (*pasingability*) dan memiliki ketahanan yang baik terhadap efek segregasi (*segregation resistance*).

Menurut Hela dan Hubertova (2007) bahwa kemampuan mengalir dengan tingkat ketahanan terhadap segregasi yang tinggi pada *self compacting concrete*, sangat dipengaruhi oleh penggunaan *superplasticizer* yang memadai, komposisi agregat, faktor air semen yang rendah dan diameter agregat pengisi berukuran 0,125 mm.

Menurut Okamura dan Ouchi (2003) bahwa proporsi campuran *self compacting concrete*, terdiri dari agregat kasar dengan batasan sebesar 50% dari volume padat, agregat halus dengan batasan sebesar 40% dari volume mortar, perbandingan volume untuk *air-powder* yang rendah dan penggunaan dosis *superplasticizer* yang tinggi.

Pembatasan volume agregat dalam campuran *self compacting concrete*, bertujuan agar beton dapat mengalir dan memadat dengan sendiri, serta agar mortar dapat mengisi rongga-rongga di antara agregat kasar.



Gambar 8. Komposisi campuran SCC menurut Okumura dan Ouchi (2003)

E. Kolom

1. Definisi Kolom

Kolom adalah batang tekan vertikal dari rangka (*frame*) struktur yang memikul beban dari balok, yang kemudian meneruskan beban tersebut dari elevasi atas menuju elevasi bawah atau yang lebih rendah, sehingga dapat mencapai tanah melalui pondasi. Menurut SNI 2847-2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, kolom adalah komponen yang harus direncanakan untuk memikul beban aksial terfaktor yang bekerja pada semua lantai, atap dan momen maksimum yang berasal dari beban terfaktor pada satu bentang terdekat dari lantai atau atap yang ditinjau, dimana kombinasi pembebanan yang menghasilkan rasio maksimum dari momen terhadap beban aksial juga harus diperhitungkan.

Menurut Wang dan Ferguson (1986) bahwa kolom dibagi menjadi tiga bagian berdasarkan susunan tulangnya yaitu, kolom ikat, kolom spiral dan kolom komposit. Sedangkan menurut Nawy (1990), bahwa kolom dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk susunan tulangan, posisi beban yang bekerja pada penampang kolom dan panjang kolom terhadap hubungannya dengan dimensi lateral.

2. Kekuatan Kolom Dengan Beban Sentris

Untuk kolom yang menerima beban sentris, maka kapasitas beban yang mampu diterima oleh kolom pendek (P_o) dan kapasitas kolom bersengkang dalam menerima beban aksial maksimal yang bekerja ($P_{n \max}$) dapat dihitung dengan rumus:

$$P_o = 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (1)$$

$$P_{n \max} = 0,80 \cdot [0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}] \quad (2)$$

dengan :

A_g = luas bruto penampang beton.

A_{st} = luas penampang tulangan longitudinal total.

f'_c = kuat tekan beton (MPa).

f_y = kuat leleh baja tulangan (MPa).

Sedangkan menurut ACI 440.2R-02, untuk meningkatkan kekuatan aksial kolom dapat dilakukan dengan cara pengekangan, sehingga kapasitas aksial teoritis kolom persegi dengan pengekangan dihitung dengan persamaan :

$$P_{n \max} = 0,80 \cdot [0,85 \cdot \psi_f \cdot f'_{cc} \cdot (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}] \quad (3)$$

dengan :

ψ_f = faktor reduksi material pengekangan.

f'_{cc} = kuat tekan beton terkekang.

Nilai kuat tekan beton terkekang (f'_{cc}) dalam persamaan di atas dapat dihitung dengan persamaan yang diusulkan oleh Mander, et.al (1988), dalam bentuk :

$$f'_{cc} = f'_c \left(2,25 \sqrt{1 + 7,9 \cdot \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \cdot \frac{f_l}{f'_c} - 1,25 \right) \quad (4)$$

Dimana persamaan tersebut dipengaruhi oleh faktor tekanan pengekangan (f_l).

3. Degradasi Kekuatan Pada Kolom Dengan Beban Siklik

Untuk kolom yang dibebani dengan beban siklik, SNI 7834:2012 mensyaratkan bahwa kolom tersebut tidak diperbolehkan untuk mengalami degradasi kekuatan, dimana kondisi ini dapat terjadi apabila gaya puncak (P_f) yang bekerja pada kolom kurang dari 75% beban lateral maksimum (E_{max}) pada arah pembebanan yang sama. Dengan demikian evaluasi degradasi kekuatan pada kolom yang dibebani dengan beban siklik dapat ditulis dalam bentuk persamaan :

$$D = 1 - P_f/E_{max} \quad (5)$$

dengan :

D = degradasi kekuatan kolom yang dibebani beban siklik.

P_f = gaya puncak akibat beban siklik yang bekerja pada kolom.

Kolom yang dibebani beban siklik dinyatakan tidak mengalami degradasi kekuatan apabila memenuhi persyaratan dalam persamaan berikut :

$$P_f > 0,75.E_{max} \quad (6)$$

4. Kekakuan

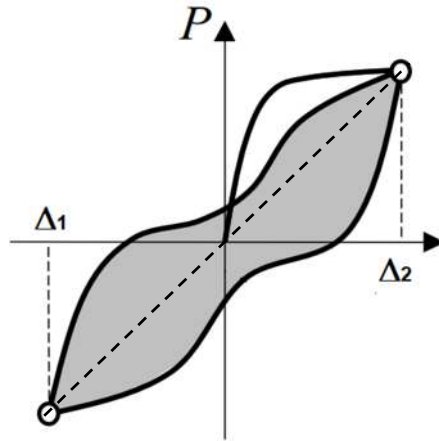
Untuk struktur yang mengalami beban siklik, kekakuan ditetapkan sebagai kemiringan garis yang menghubungkan puncak-puncak beban maksimum arah positif dan negatif dari kurva beban dan defleksi (Tsonos, 1999). Berdasarkan Gambar 9, kekakuan (K) untuk struktur dengan beban siklik dapat digambarkan dalam bentuk persamaan :

$$K = \frac{P_1 + P_2}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (7)$$

dengan :

P = beban yang bekerja arah lateral.

Δ = defleksi yang terjadi.



Gambar 9. Kekakuan struktur (Sumber : Park dan Eom, 2004)

5. Kekakuan Awal

Pada kolom atau spesimen yang dibebani dengan beban siklik, SNI 7834:2012 mensyaratkan bahwa spesimen uji harus memenuhi persyaratan kekakuan awal, dimana spesimen uji harus mencapai nilai tahanan lateral minimum (E_n) sebelum rasio simpangannya 2% melebihi dari nilai yang konsisten dengan batasan rasio simpangan yang diijinkan dalam bentuk :

$$r_1 = \Delta_y/h < (1 + 0,02).r_2 \quad (8)$$

dengan :

r_1 = rasio simpangan tahanan lateral (%).

Δ_y = nilai simpangan pada saat leleh (mm).

r_2 = simpangan minimum sebesar 0,035 (%).

6. Degradasi Kekakuan

Menurut SNI 7834:2012 atau ACI 374.1-05, pada spesimen yang didesain terhadap gempa atau beban siklik harus mempunyai degradasi kekakuan yang cukup pada saat mengalami pembebanan.

Degradasi kekakuan yang terjadi pada spesimen dapat disajikan dalam bentuk rasio kekakuan pada setiap siklus pembebanan dengan kekakuan pada saat terjadinya leleh, dalam bentuk :

$$r_s = K_0/K' > 0,05 \quad (9)$$

dengan :

r_s = rasio antara kekakuan awal dengan kekakuan secan.

K_0 = kekakuan awal (kN.mm).

K' = kekakuan secan garis yang menghubungkan titik dari simpangan rasio -0,0035 ke simpangan rasio +0,0035.

7. Daktalitas Kolom

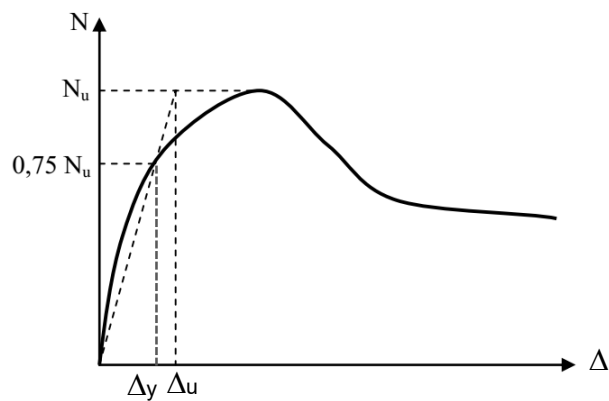
Menurut Park dan Ang (1985), bahwa daktalitas adalah kemampuan struktur untuk berdeformasi secara *inelastis* tanpa mengalami reduksi kekuatan secara signifikan sebelum mencapai keruntuhan, dimana sifat daktalitas struktur menggambarkan jumlah energi yang mampu diserap oleh struktur. Sedangkan menurut Williams et.al (1997), bahwa daktalitas adalah kemampuan struktur untuk tidak mengalami keruntuhan secara tiba-tiba yang bersifat getas, tetapi masih mampu mengalami deformasi yang cukup besar pada saat mencapai beban maksimum sebelum struktur tersebut mengalami keruntuhan.

Menurut SNI 1726-2019, daktalitas adalah kemampuan struktur untuk mengalami simpangan pasca elastik yang besar secara berulang kali akibat beban gempa sehingga menyebabkan terjadinya pelelehan pertama, sambil tetap mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi ambang keruntuhan. Sedangkan faktor daktalitas adalah rasio antara simpangan maksimum pada saat mencapai kondisi ambang keruntuhan dan simpangan pada saat terjadinya pelelehan pertama.

Pada struktur yang mengalami gaya gempa, nilai daktilitas perpindahan yang terjadi dinyatakan sebagai perbandingan antara lendutan pada saat kondisi ultimit dan lendutan pada saat leleh pertama (Williams et.al, 1997) :

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (10)$$

Dimana, menurut Foster et.al (1997) bahwa nilai lendutan pada saat leleh pertama (Δ_y) dapat diperoleh berdasarkan aturan 3/4 seperti pada Gambar 10 di bawah ini.



Gambar 10. Penentuan nilai Δ_y

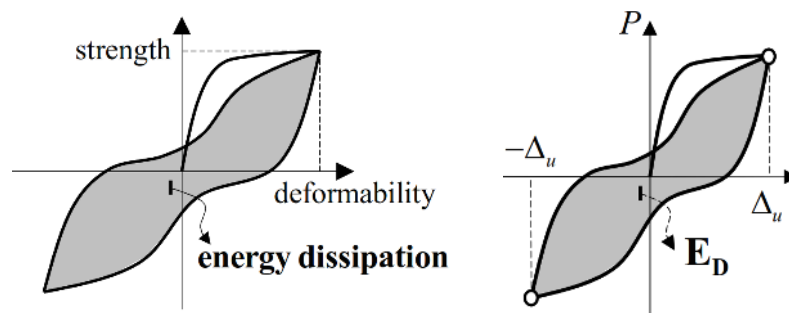
Sedangkan, berdasarkan metode perhitungan, daktilitas dapat ditinjau berdasarkan pengaruh regangan (*strain*), kelengkungan (*curvature*) dan lendutan (*displacement*).

8. Disipasi Energi

Menurut Park dan Paulay (1975), bahwa hal yang harus diperhatikan dalam desain struktur beton bertulang di daerah rawan gempa, sehingga menghasilkan desain yang memenuhi persyaratan dan pertimbangan ekonomis adalah daktilitas struktur, dimana hal ini dapat dicapai dengan cara membatasi pengaruh energi

gempa yang terjadi pada struktur, agar dapat diserap dan disebarkan (disipasi) melalui mekanisme *inelastic* tetapi masih dalam kondisi yang terkendali.

Menurut Legeron et.al (2000) bahwa kapasitas disipasi energi merupakan salah satu parameter penting bagi struktur yang direncanakan dengan beban gempa yang memiliki periode ulang gempa yang lama dan menurut Elmenhawi dan Brown (2009), salah satu tujuan utama dari retrofit adalah untuk meningkatkan kapasitas dari elemen struktur, dimana kapasitas dapat meningkat jika terjadi peningkatan kapasitas disipasi energi pada saat struktur mengalami gempa, tanpa terjadi penurunan kekuatan yang signifikan.



Gambar 11. Disipasi energi (Sumber : Park dan Eom, 2004)

Pada struktur yang dibebani dengan beban siklik, nilai disipasi energi dalam satu siklus (E_D) dapat dihitung berdasarkan luas area dari hubungan antara gaya lateral yang terjadi, dengan deformasi dalam bentuk kurva menutup yang disebut dengan *hysteresis loops* (Legeron et.al, 2000).

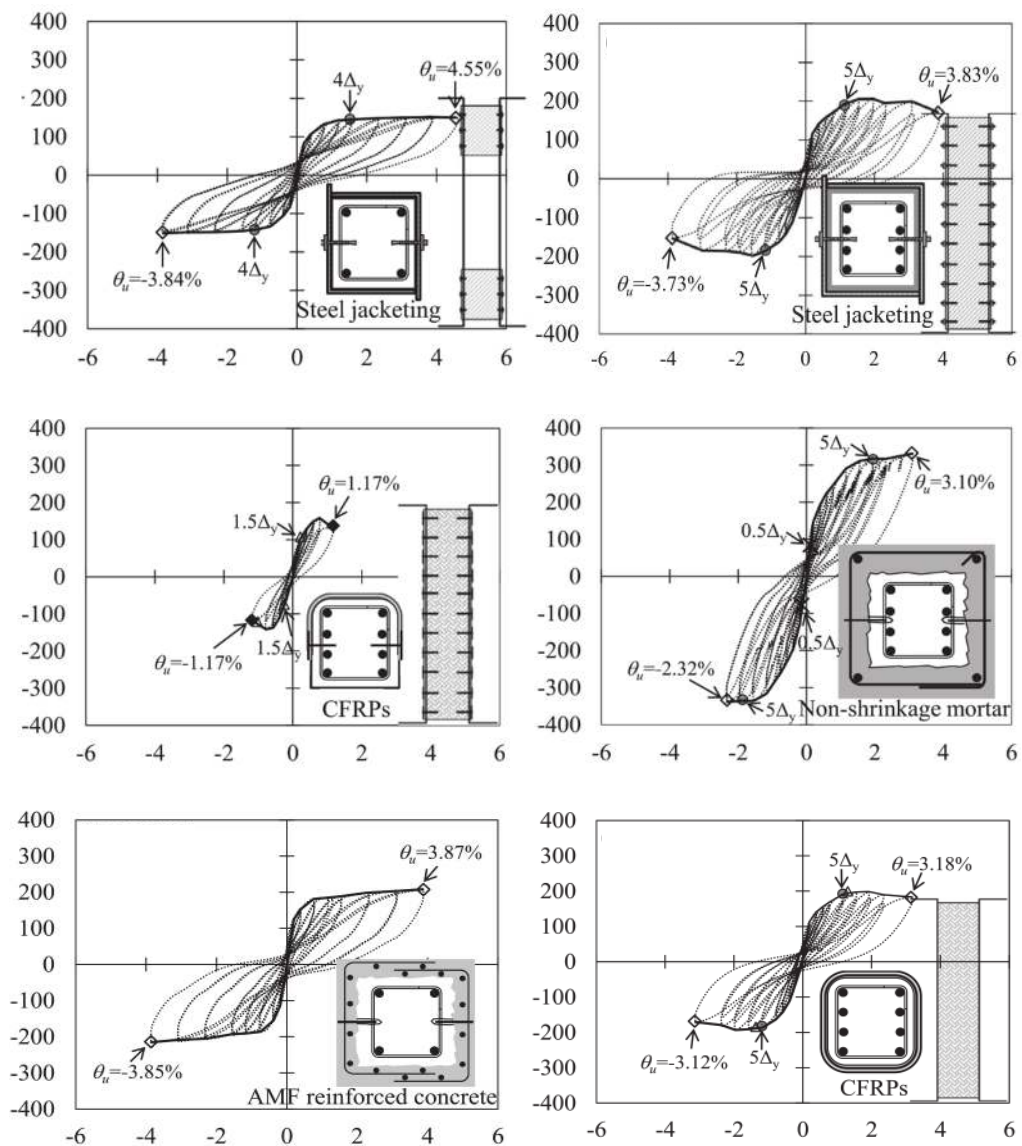
Luas area *hysteresis loops* pada Gambar 11 dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan aturan trapesium banyak pias (Legeron et.al, 2000), dalam bentuk persamaan :

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta_i \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2} \quad (11)$$

Disipasi energi (E) yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan :

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (12)$$

Dimana, E_i merupakan jumlah luasan dari kurva *hysteresis loops* dan sebagai contoh, pada Gambar 12 disajikan contoh kurva *hysteresis loops* yang dihasilkan dari hasil pengujian pada kolom yang diretrofit dengan beberapa material.



Gambar 12. Contoh kurva *hysteresis loops* pada kolom yang diretrofit

(Sumber : Truong, et.al, 2016)

Menurut Park dan Eom (2004), bahwa kapasitas disipasi energi yang terjadi pada daerah sendi plastis kolom dapat dihitung berdasarkan pendekatan persamaan berikut ini :

$$E_D = e_d \cdot L_p \quad (13)$$

dengan :

E_D = kapasitas disipasi energi pada area sendi plastis.

e_d = energi disipasi pada kolom.

L_p = perkiraan panjang daerah sendi plastis kolom.

F. Sendi Plastis

1. Mekanisme Sendi Plastis

Menurut Paulay dan Priestley (1992), Hines, et.al (2004) dan Yuan, et. al (2013) bahwa daerah sendi plastis pada struktur beton bertulang adalah tempat yang diperbolehkan terjadinya deformasi plastis dan kerusakan akibat gempa, sehingga pada daerah ini harus didesain dengan benar untuk mencegah kegagalan struktur akibat gempa (Yuan dan Wu, 2017).

Menurut Park (1989) bahwa selama terjadi gempa, daktilitas akan mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur tersebut tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi diambang keruntuhan. Struktur dengan tingkat daktilitas tertentu akan memungkinkan terjadinya sendi plastis secara bertahap pada elemen-elemen struktur yang telah ditentukan dan dengan terbentuknya sendi plastis, maka struktur akan mampu menahan beban gempa maksimum tanpa memberikan kekuatan yang berlebihan pada elemen struktur, karena energi kinetik akibat gerakan tanah dasar yang akan diterima oleh struktur akan langsung dipencarkan pada sendi plastis tersebut.

Semakin banyak terbentuk sendi plastis pada suatu elemen struktur, maka semakin besar juga energi gempa yang akan dipencarkan dan setelah terjadi sendi plastis pada suatu elemen, maka defleksi dan rotasi plastis masih akan terus bertambah (Park, 1989).

2. Pengekangan Pada Daerah Sendi Plastis

Daktalitas pada kolom beton bertulang sangat ditentukan oleh mekanisme terbentuknya sendi-sendi plastis pada kedua ujung kolom, khususnya pada saat terjadi gempa. Untuk mendapatkan kolom yang berperilaku daktail, dapat diperoleh dengan cara memasang kekangan dengan memperhatikan faktor-faktor yang mempengaruhi kekangan lateral yaitu, persentase tulangan lateral yang terpasang, kuat leleh tulangan lateral, kuat tekan beton, spasi tulangan lateral dan konfigurasi tulangan lateral khususnya pada beton bertulang dengan penampang persegi (Bayrak dan Sheikh, 2002).

Menurut Jiang, et.al (2014) cara lain yang dapat digunakan untuk mengatasi kerusakan yang terjadi pada daerah sendi plastis beton bertulang, adalah dengan memasang kekangan pada daerah tersebut, dimana pemasangan kekangan pada daerah sendi plastis memerlukan pengetahuan tentang panjang sendi plastis dan perhitungan terhadap perpindahan yang terjadi. Sedangkan menurut Karimah dan Wahyudi (2010), bahwa untuk mengatasi kerusakan yang terjadi pada daerah sendi plastis kolom dapat dilakukan dengan cara merapatkan jarak spasi sengkang dengan beban aksial tekan tidak melebihi $0,2.f_c'.A_g$.

Sedangkan menurut Wu dan Wang (2008), Wu dan Wei (2010) bahwa efektifitas dari pemasangan kekangan atau jaket pada daerah sendi plastis pada penampang bulat lebih baik dibandingkan pada penampang persegi, dimana pada penampang persegi sangat dipengaruhi oleh bentuk penampang yang tidak seragam.

3. Panjang Sendi Plastis

Menurut Jiang, et.al (2014) bahwa daerah konsentrasi kelengkungan dapat didefinisikan sebagai daerah sendi plastis, dimana untuk menentukan panjang sendi plastis ditentukan oleh distribusi dari kelengkungan yang terjadi di sepanjang penampang kolom. Hingga saat ini belum ada literatur atau hasil konsensus secara global yang menetapkan dan menyepakati persamaan untuk menentukan panjang sendi plastis, dimana beberapa peneliti meyakini bahwa penulangan yang terpasang akan menyebabkan peningkatan panjang sendi plastis yang terjadi (Ozbakkaloglu and Saatcioglu, 2006), tetapi sebaliknya beberapa peneliti lain seperti Priestley, et.al (1996), Elsanadedy dan Haraoun (2005), meyakini bahwa penulangan yang terpasang akan memperkecil panjang sendi plastis yang terjadi.

Selain itu, terdapat beberapa peneliti seperti Monti, et.al (2001) dan Binici (2008) yang mengabaikan pengaruh penulangan terpasang terhadap panjang sendi plastis. Sedangkan menurut Gu, et.al (2012) dan Jiang, et.al (2014) bahwa pemasangan jaket dengan FRP pada kolom beton bertulang, akan mengurangi panjang sendi plastis, dimana pengurangan yang terjadi sangat dipengaruhi oleh ketebalan jaket FRP.

4. Persamaan Panjang Sendi Plastis

Penelitian awal tentang panjang sendi plastis dilakukan oleh Park dan Paulay pada Tahun 1975. Dalam penelitian tersebut, profil kelengkungan dari daerah elastis dan plastis dipisahkan, sedangkan perpindahan plastis yang terjadi pada bagian penampang, dihitung menggunakan blok persegi panjang. Dalam perhitungan tersebut, ketinggian dari blok persegi panjang dinyatakan sebagai

panjang sendi plastis (L_p) dan lebar yang diambil sama dengan kelengkungan plastis yang terjadi pada daerah kritis (Goodnight, et.al, 2016).

Selanjutnya, berdasarkan hasil penelitian Park dan Paulay (1982), panjang sendi plastis yang terjadi pada kolom penampang persegi didefinisikan dengan persamaan :

$$L_p = 0,42.h \quad (14)$$

dengan :

h = lebar kolom (mm).

Berdasarkan hasil pengujian secara eksperimen yang dilakukan oleh Mander (1983), kemudian mengusulkan bahwa panjang sendi plastis dipengaruhi oleh regangan yang terjadi pada penulangan yang terpasang pada kolom (Goodnight, et.al, 2016) dan panjang sendi plastis dapat didefinisikan dengan persamaan :

$$L_p = 32.\sqrt{d_{bl}} + 0,06.L_c \quad (15)$$

dengan :

d_{bl} = diameter tulangan longitudinal kolom (mm).

L_c = tinggi kolom (mm).

Penelitian lanjutan juga dilakukan Priestley dan Park (1987) menggunakan model kolom kantiliver dan dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa, panjang daerah sendi plastis (L_p) pada struktur kolom beton bertulang tanpa *jacketing* pada bagian luar yang dibebani dengan beban aksial dan beban lateral, dapat dihitung berdasarkan persamaan empiris berikut ini :

$$L_p = 0,08.L + 6d_b \quad (16)$$

dengan :

L = tinggi kolom (mm).

d_b = diameter tulangan longitudinal kolom (mm).

Oleh Paulay dan Priestley (1992) persamaan di atas, kemudian disempurnakan dengan menambahkan parameter baru yaitu, pengaruh variasi kuat leleh baja (f_y) sehingga persamaan di atas menjadi :

$$L_p = 0,08.L + 0,022.d_b.f_y \quad (17)$$

dengan :

L = tinggi kolom (mm).

d_b = diameter tulangan longitudinal kolom (mm).

f_y = kuat leleh baja (MPa).

Sedangkan berdasarkan hasil penelitian Sheikh dan Khoiry (1993), Sheikh, et.al (1994), Bayrak dan Sheikh (1998) pada model kolom yang dibebani dengan beban aksial tinggi yang hanya memperhitungkan pengaruh lebar kolom (H) dan mengabaikan semua faktor lainnya (Jiang, et.al, 2014), persamaan panjang sendi plastis pada kolom dapat dihitung dengan persamaan yang lebih sederhana :

$$L_p = 1,0.H \quad (18)$$

dengan :

H = lebar kolom (mm).

Panagiotakos dan Fardis (2001) juga mengusulkan persamaan yang hampir serupa, seperti yang diusulkan oleh Paulay dan Priestley (1992), yaitu :

$$L_p = 0,018.L + 0,021.d_b.f_y \quad (19)$$

dengan :

L = tinggi kolom (mm).

d_b = diameter tulangan longitudinal kolom (mm).

f_y = kuat leleh baja tulangan (MPa).

Priestley, et.al (2007) kemudian merevisi persamaan panjang sendi plastis yang diusulkan oleh Paulay dan Priestley (1992), dimana nilai $\alpha = 0,08$ pada persamaan tersebut, diganti dengan nilai k sebesar :

$$k = 0,2 \cdot \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) < 0,08 \quad (20)$$

$$L_p = k \cdot L + 0,022 \cdot d_b \cdot f_y \quad (21)$$

Berdasarkan penelitian Biskinis dan Fardis (2009), kemudian diusulkan model persamaan baru untuk menentukan panjang sendi plastis untuk kondisi pembebanan siklik yang kemudian diadopsi oleh *Federation Internationale du Beton* (FIB) untuk menjadi standar yang tertuang dalam FIB Model Code Tahun 2010, yaitu :

$$L_p = 0,2 \cdot H \cdot \frac{1 + \left[\min \left(9 : \frac{L}{H} \right) \right]}{3} \quad (22)$$

dengan :

H = lebar kolom (mm).

L = tinggi kolom (mm).