

MODEL SAMBUNGAN TULANGAN SISTEM MEKANIS

DISERTASI



Oleh :

**Anis Rosyidah
NPM. 2016832001**

Promotor:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

Ko-Promotor:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
SEPTEMBER 2021**

HALAMAN PERSETUJUAN
MODEL SAMBUNGAN TULANGAN SISTEM MEKANIS



Oleh :

Anis Rosyidah
NPM. 2016832001

Sudah dilaksanakan Sidang Terbuka Disertasi pada
Sabtu, 11 September 2021

Promotor:

Prof. Bambang Suryo Irmono, Ph.D.

Ko-Promotor:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
SEPTEMBER 2021

MODEL SAMBUNGAN TULANGAN SISTEM MEKANIS

Abstrak

Anis Rosyidah (NPM: 2016832001)
Promotor: Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.
Ko-Promotor: Dr. Johannes Adhijoso Tjondro
Doktor Ilmu Teknik Sipil
Bandung
September 2021

Studi pendahuluan teridentifikasi bahwa kinerja sambungan mekanis ini dipengaruhi oleh kondisi epoksi, selongsong, tulangan yang disambung, dan beton di sekitarnya. Berdasarkan kajian ini maka dibuat model sambungan mekanis menggunakan selongsong dan epoksi dengan konfigurasi tulangan *overlapping*. Sambungan ini diberi nama sambungan ESO (Epoksi Selongsong *Overlapping*). Selongsong menggunakan *corrugated steel duct*. Epoksi memakai produk dalam negeri yang merupakan material baru akan digunakan sebagai bahan pengisi selongsong sehingga perlu dilakukan eksperimen.

Eksperimen ini terdiri dari tiga tahap, tahap 1 menentukan jenis epoksi yang digunakan dan panjang penyaluran. Eksperimen meliputi pengujian geser epoksi dan tes *pullout*. Selanjutnya tahap kedua adalah menguji *pullout* model sambungan ESO secara individu menggunakan panjang penyaluran dari hasil pengujian tahap I, selain eksperimen pada sambungan ini juga dilakukan analisis numerik menggunakan *LS_DYNA Student Version*. Tahap ketiga dari penelitian ini mengimplementasikan model sambungan ESO pada komponen balok.

Berdasarkan hasil pengujian tahap I terpilih epoxy tipe C. Selain sifat dari epoxy tipe C dan lebih workable, epoksi ini merupakan produk lokal sehingga lebih mudah diperoleh dengan harga yang lebih murah. Panjang penyaluran yang diuji terdiri dari 5D, 10D, 15D, dan 20D. Gaya tarik terbesar dari masing-masing panjang penyaluran 5D, 10D, 15D, dan 20D secara berurutan adalah 35 kN, 50 kN, 60 kN, dan 60 kN. Penambahan gaya tarik dari Panjang penyaluran 15D ke 20D tidak terjadi peningkatan yang signifikan, sehingga panjang penyaluran yang dipilih adalah 15D. Dari hasil pengujian tahap II dengan menerapkan panjang penyaluran tulangan 15D kedalam model sambungan ESO diperoleh kurva tegangan-regangan pada tulangan menunjukkan tulangan sudah leleh. Kegagalan sambungan sudah masuk pada kondisi inelastis namun sebelum tulangan putus terjadi kerusakan pada epoksi dan selongsong. Hasil pengujian tahap III menunjukkan spesimen balok dengan sambungan memiliki daktilitas *displacement* dan kurvatur lebih tinggi dibanding spesimen balok tanpa sambungan. Pola kegagalan pada spesimen baik dengan maupun tanpa sambungan mengalami kegagalan lentur dan retak-retak terjadi pada 1/3 panjang bentang di bagian tengah. Untuk spesimen balok dengan sambungan retak terparah terjadi pada ke-2 ujung peralihan tulangan dengan dan tanpa sambungan.

Kata kunci: kekuatan lekat, ESO, *pullout*, momen-kurvatur, daktilitas kurvatur, pola kegagalan

MECHANICAL SYSTEM REINFORCEMENT CONNECTION MODEL

Abstract

Anis Rosyidah (NPM: 2016832001)
Supervisor: Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.
Co-Supervisor: Dr. Johannes Adhijoso Tjondro
Doctor of Civil Engineering
Bandung
September 2021

Previous studies identified that this mechanical connection's performance is influenced by the conditions of the epoxy, sleeve, jointed reinforcement, and the surrounding concrete. Based on this study, a mechanical connection model was made using sleeves and epoxy with reinforcement configuration overlapping. This connection is named ESO (Epoxy Sleeve Overlapping). The sleeve uses a corrugated steel duct. Epoxy uses domestic products, which are new materials used as sleeve fillers, so experiments need to be carried out.

This experiment consists of three stages; stage 1 determines the type of epoxy used and the development length. Experiments include the epoxy shear test and the pullout test. Then the second stage is to test the pullout of the ESO connection model individually using the distribution length from the test results of stage I; in addition to experiments on this connection, numerical analysis is also carried out using the LS_DYNA Student Version. The third stage of this research is implementing the ESO connection model on beam components.

Based on the results of the first stage of the test, type C epoxy was chosen. In addition to the characteristics of type C epoxy, which is workable, this epoxy is a local product, so it is easier to obtain at a lower price. The tested channel lengths consist of 5D, 10D, 15D, and 20D. The most significant tensile forces from 5D, 10D, 15D, and 20D distribution lengths are 35 kN, 50 kN, 60 kN, and 60 kN, respectively. The addition of the tensile force from 15D to 20D distribution length did not increase significantly, so the selected distribution length was 15D. From the results of the second stage of testing by applying the 15D reinforcement length to the ESO connection model, the stress-strain curve of the reinforcement shows that the reinforcement has yielded. The connection failure has entered the inelastic condition, but there is damage to the epoxy and sleeve before the reinforcement breaks. The results of the third stage test showed that beam specimens with joints had higher ductility displacement and curvature than beam specimens without joints. The pattern of failure on the specimens, flexural failure, and cracks occurred at 1/3 of the span length in the middle. For beam specimens with joints, the worst cracks occur at both ends of the reinforcement transition with and without joints.

Kata kunci: bond strength, ESO, pullout, moment-curvature, curvature ductility, failure pattern

PRAKATA

Penulis memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah karena rahmat dan berkat-Nya, maka proposal disertasi ini dapat tersusun.

Studi ini mengungkap mengenai sambungan mekanik tulangan menggunakan selongsong dan epoksi yang diberi nama sambungan ESO (*Epoksi Selongsong Overlapping*). Disertasi ini masih jauh dari sempurna sehingga perlu pengembangan dan penyempurnaan, masukan dan kritikan yang membangun sangat diperlukan.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Bapak/Ibu:

- Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D., selaku Promotor disertasi
- Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, sebagai Ko-promotor disertasi
- Penguji, terdiri dari: Dr. Paulus Karta Wijaya, Dr. Joni Simanta, dan Prof. Dr. Roesdiman Soegiarso
- Dekan dan Wakil Dekan I Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
- Aswin Lim, Ph.D., Ketua Prodi Magister dan Doktor Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan
- Herry Suryadi, Ph.D., Kepala Lab. Teknik Struktur, Universitas Katolik Parahyangan
- Ir. Arief Nurmansyah, CEO PT. Epoxyndo Art Lestari
- Direktur dan Wakil Direktur I Politeknik Negeri Jakarta
- Kepala Unit Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Politeknik Negeri Jakarta
- Ketua Jurusan dan Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta
- Semua pihak yang telah membantu kegiatan ini.

Akhir kata, penulis berharap dengan tersusunnya laporan ini dapat memberikan informasi mengenai sambungan mekanis dan bermanfaat untuk perkembangan konstruksi.

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
Abstrak.....	iii
Abstract.....	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR NOTASI.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan masalah.....	8
1.3 Tujuan.....	9
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	10
1.5 Metode Penelitian.....	10
1.6 Hipotesis.....	12
1.7 Temuan yang Diharapkan.....	14
BAB II STUDI LITERATUR.....	15
2.1 Pendahuluan.....	15
2.1.1 Kajian Jurnal dan Pustaka Lainnya.....	15
2.1.2 Tipe-tipe <i>Coupler</i> sebagai Alat Sambung Tulangan.....	16
2.2 Penelitian Sambungan Mekanis Menggunakan Selongsong Besi Sebagai Pengganti <i>Coupler</i> Fabrikasi.....	19
2.3 Peraturan Mengenai Sambungan Mekanis.....	24
2.4 Mekanisme Lekatan.....	25
2.5 Sambungan Tulangan <i>Overlapping (Lap Splices)</i>	29
2.6 Tegangan Regangan pada Selongsong/ <i>Coupler</i>	32
2.7 Tegangan Regangan Epoksi.....	34
2.8 Tegangan Regangan Baja.....	35
2.9 Daktilitas.....	36
BAB III RANCANGAN PENGUJIAN.....	42

3.1	Rancangan Benda Uji.....	42
3.2	Instrumen Penelitian.....	48
3.3	Prosedur Penelitian.....	50
3.4	Ketentuan Penelitian	51
3.5	Analisis Hasil Penelitian	51
BAB IV HASIL PENGUJIAN TAHAP I (PENENTUAN JENIS EPOKSI).....		53
4.1	Pengujian Geser Epoksi	53
4.2	Pengujian <i>Pullout</i> Sambungan dengan 1 Batang Tulangan	58
4.3	Pembahasan.....	62
BAB V HASIL PENGUJIAN TAHAP I (PENENTUAN PANJANG PENYALURAN)		64
5.1	Pengujian Tulangan.....	64
5.2	Pengujian Epoksi.....	66
5.3	Pengujian <i>Pullout</i>	69
BAB VI HASIL PENGUJIAN TARIK SAMBUNGAN		86
6.1	Pengujian Material yang Digunakan	86
6.1.1	Tulangan.....	86
6.1.2	Selongsong	87
6.2	Pengujian <i>Pullout</i> Sambungan	88
6.3	Pola Kegagalan.....	97
6.4	Pendekatan Model Sambungan	99
BAB VII HASIL PENGUJIAN LENTUR		102
7.1	Pengujian Material yang Digunakan	102
7.2	Perancangan Penulangan Spesimen Balok.....	109
7.3	Analisis Teoritis Spesimen Balok	110
7.4	Analisis Hasil Pengujian Lentur Spesimen Balok.....	112
7.5	Pembahasan.....	125
BAB VIII ANALISIS NUMERIK SAMBUNGAN.....		127
8.1	Pengujian Numerik.....	127
8.2	Hasil Analisis FEM	131
BAB IX KESIMPULAN DAN SARAN		143
9.1	Kesimpulan.....	143

9.2	Saran.....	144
	REFERENSI	145
	LAMPIRAN.....	154

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Pola tegangan-regangan sambungan tulangan [13].....	2
Gambar 1. 2 Tipe-tipe sambungan mekanik menggunakan coupler [15]	3
Gambar 1. 3 Sambungan komponen struktur menggunakan selongsong dan grouting	4
Gambar 1. 4 Penyambungan tulangan yang bertemu pada as yang sama (<i>grout splice connector</i>)	4
Gambar 1. 5 Penyambungan tulangan overlapping (<i>grout lapping connector</i>)	5
Gambar 1. 6 <i>Corrugated steel duct</i>	6
Gambar 1. 7 Rancangan model sambungan ESO	7
Gambar 1. 8 Skema Alur Penelitian.....	12
Gambar 2. 1 Contoh sambungan menggunakan coupler	16
Gambar 2. 2 Setup pengujian tarik (a) <i>Grouted sleeve lapping connector</i> , (b) <i>Grouted splice connector</i> [22]	20
Gambar 2. 3 Lintasan transfer gaya pada sambungan tulangan tanpa <i>overlapping</i> (<i>grout splice connector</i>) [22]	21
Gambar 2. 4 Lintasan transfer gaya pada sambungan tulangan dengan <i>overlapping</i> (<i>grout lapping connector</i>) [22]	21
Gambar 2. 5 Pola kegagalan spesimen (a) <i>Grouted sleeve lapping connector</i> , (b) <i>Grouted splice connector</i> [22].....	22
Gambar 2. 6 Kurva beban-displacement [22]	22
Gambar 2. 7 Skematik pengujian pullout spesimen [56]	23
Gambar 2. 8 Pola kegagalan spesimen [56].....	23
Gambar 2. 9 Mekanisme transfer tegangan lekat [63]	25
Gambar 2. 10 Mekanisme tegangan lekat [31]	25
Gambar 2. 11 Mekanisme lekatan dan splitting pada permukaan tulangan ulir [65]	26
Gambar 2. 12 Mekanisme tumpu pada sirip tulangan [65].....	27
Gambar 2. 13 Hubungan tegangan lekat – slip [68][69].....	27
Gambar 2. 14 Keseimbangan gaya pada sambungan tanpa <i>overlapping</i> (<i>grout splice connector</i>) [22][23]	28
Gambar 2. 15 Distribusi tegangan antara tulangan dengan grouting pada sambungan overlapping [22]	29

Gambar 2. 16 Splitting pada tulangan overlapping [65], [70]	29
Gambar 2. 17 Mekanisme transfer gaya [22].....	30
Gambar 2. 18 Mekanisme tegangan lekat dan <i>splitting</i> pada balok [70].....	31
Gambar 2. 19 Model tegangan regangan dari coupler [49]	33
Gambar 2. 20 Pengaruh factor panjang rigid <i>coupler</i> pada grafik tegangan regangan [49].....	34
Gambar 2. 21 Pengujian tarik spesimen [77] [78]	34
Gambar 2. 22 Diagram tegangan-regangan baja [27]	35
Gambar 2. 23 Distribusi regangan penampang dan kurvatur dari elemen beton bertulang [31].....	37
Gambar 2. 24 Kurva tegangan-regangan beton tidak terkekang [27]	38
Gambar 2. 25 Hubungan M_u dan ϕ_u [27]	41
Gambar 3. 1 Spesimen geser epoksi	42
Gambar 3. 2 Epoksi Demp-X.....	42
Gambar 3. 3 Epoksi Mapei.....	43
Gambar 3. 4 Epoksi Epoxyndo Tipe A	43
Gambar 3. 5 Epoksi Epoxyndo Tipe B	43
Gambar 3. 6 Epoksi Epoxyndo Tipe C	43
Gambar 3. 7 Spesimen pengujian pullout	44
Gambar 3. 8 Setting pengujian pullout	45
Gambar 3. 9 Spesimen pengujian untuk tarik tulangan	46
Gambar 3. 10 Sambungan Epoksi <i>Selongsong Overlapping</i> (ESO)	47
Gambar 3. 11 Penempatan <i>strain gauge</i> pada spesimen.....	47
Gambar 3. 12 <i>Set-up</i> pembebanan balok uji	49
Gambar 3. 13 Penempatan LVDT.....	50
Gambar 4. 1 Hubungan gaya – defleksi pengujian geser epoksi Demp-X	53
Gambar 4. 2 Kegagalan benda uji epoksi Demp-X.....	54
Gambar 4. 3 Hubungan gaya – defleksi pengujian geser epoksi Mapei	54
Gambar 4. 4 Kegagalan benda uji epoksi Mapei	55
Gambar 4. 5 Hubungan gaya – slip pengujian geser epoksi Epoxyndo tipe A.....	55
Gambar 4. 6 Kegagalan benda uji Epoxyndo tipe A.....	56
Gambar 4. 7 Hubungan gaya – slip pengujian geser epoksi Epoxyndo tipe B	56

Gambar 4. 8 Kegagalan benda uji Epoxyndo tipe B.....	57
Gambar 4. 9 Hubungan gaya – slip pengujian geser epoksi Epoxyndo tipe C	57
Gambar 4. 10 Kegagalan benda uji Epoxyndo tipe C.....	58
Gambar 4. 11 Tegangan lekat – slip benda uji dengan epoksi Demp-X.....	58
Gambar 4. 12 Tegangan lekat – slip benda uji dengan epoksi Mapei.....	59
Gambar 4. 13 Grafik Tegangan lekat – slip benda uji dengan Epoxyndo tipe A .	60
Gambar 4. 14 Tegangan lekat – slip benda uji dengan Epoxyndo tipe B	61
Gambar 4. 15 Grafik Tegangan lekat – slip benda uji dengan Epoxyndo tipe C..	61
Gambar 4. 16 Visual sisi dalam spesimen menggunakan Mapei.....	63
Gambar 5. 1 Hubungan tegangan – regangan baja D13.....	64
Gambar 5. 2 Hubungan tegangan – regangan baja D16.....	65
Gambar 5. 3 Hubungan tegangan dan defleksi pengujian tekan epoksi	67
Gambar 5. 4 Hubungan tegangan dan defleksi pengujian geser epoksi.....	67
Gambar 5. 5 Hubungan tegangan dan regangan pada pengujian tarik epoksi	68
Gambar 5. 6 Hubungan tegangan dan defleksi pengujian lentur epoksi.....	69
Gambar 5. 7 Hubungan beban dan defleksi tulangan D13 dengan penanaman 5D	70
Gambar 5. 8 Pola kegagalan spesimen D13_5D.....	71
Gambar 5. 9 Hubungan beban dan defleksi tulangan D13 dengan penanaman 10D	71
Gambar 5. 10 Pola kegagalan spesimen D13_10D	72
Gambar 5. 11 Hubungan beban dan defleksi tulangan D13 dengan penanaman 15D	73
Gambar 5. 12 Pola kegagalan spesimen D13_15D.....	74
Gambar 5. 13 Hubungan beban dan defleksi tulangan D13 dengan penanaman 20D	75
Gambar 5. 14 Pola kegagalan spesimen D13_20D	76
Gambar 5. 15 Pola kegagalan spesimen D16_5D.....	76
Gambar 5. 16 Pola kegagalan spesimen D16_5D.....	77
Gambar 5. 17 Hubungan beban dan defleksi tulangan D16 dengan penanaman 10D	78
Gambar 5. 18 Pola kegagalan spesimen D16_10D.....	79
Gambar 5. 19 Hubungan beban dan defleksi tulangan D16 dengan penanaman 15D	79

Gambar 5. 20 Pola kegagalan spesimen D16_15D.....	81
Gambar 5. 22 Hubungan beban dan defleksi tulangan D16 dengan penanaman 20D	81
Gambar 5. 23 Pola kegagalan spesimen D16_20D.....	82
Gambar 6. 1 Grafik tegangan dan regangan tulangan D13.....	86
Gambar 6. 2 Grafik gaya aksial (P) terhadap regangan tulangan D13.....	87
Gambar 6. 3 Grafik tegangan-regangan selongsong.....	87
Gambar 6. 4 Pengujian <i>pullout</i> sambungan ESO.....	88
Gambar 6. 5 Kurva beban-regangan pada spesimen ESO_1.....	89
Gambar 6. 6 Kurva beban-regangan pada spesimen ESO_2.....	90
Gambar 6. 7 Kurva beban-regangan pada spesimen ESO_3.....	91
Gambar 6. 8 Kurva beban-regangan pada spesimen ESO_4.....	91
Gambar 6. 9 Kurva beban-regangan pada tulangan di luar selongsong (SG_1)....	92
Gambar 6. 10 Kurva beban-regangan pada tulangan di ujung selongsong (SG_2)	93
Gambar 6. 11 Kurva beban-regangan pada tulangan di tengah selongsong (SG_3)	94
Gambar 6. 12 Kurva beban-regangan pada tulangan di tengah selongsong (SG_3 dan SG_4).....	94
Gambar 6. 13 Kurva beban-regangan pada selongsong arah memanjang (SG_5)	95
Gambar 6. 14 Kurva beban-regangan pada selongsong arah radial (SG_6).....	96
Gambar 6. 15 Defleksi sambungan ESO setelah diuji.....	97
Gambar 6. 16 Pola kegagalan spesimen, (a) spesimen ESO_1, (b) spesimen ESO_2, (c) spesimen ESO_3. (d) spesimen ESO_4.....	98
Gambar 6. 18 Model mekanis sambungan ESO.....	99
Gambar 6. 19 Distribusi tegangan lekat sepanjang tulangan.....	100
Gambar 7. 1 Hasil pengujian modulus elastisitas beton.....	103
Gambar 7. 2 Pengujian tarik belah beton.....	103
Gambar 7. 3 Kurva tegangan-regangan tarik langsung beton.....	105
Gambar 7. 4 Setup pengujian tarik lentur beton.....	105
Gambar 7. 5 Kurva P-lendutan pada pengujian tarik lentur beton.....	106
Gambar 7. 6 Kurva tegangan-lendutan pada pengujian tarik lentur beton.....	106

Gambar 7. 7 Kurva tegangan-regangan tulangan D10.....	108
Gambar 7. 8 Kurva momen-kurvatur teoritis penampang spesimen balok.....	111
Gambar 7. 9 Pola retak spesimen balok B1	112
Gambar 7. 10 Pola retak spesimen balok B2	113
Gambar 7. 11 Pola retak spesimen balok B3	114
Gambar 7. 12 Pola retak spesimen balok BS_1	115
Gambar 7. 13 Pola retak spesimen balok BS_2	115
Gambar 7. 14 Pola retak spesimen balok BS_3	116
Gambar 7. 15 Sambungan ESO setelah dikupas.....	117
Gambar 7. 16 Letak sambungan terhadap momen maksimum.....	117
Gambar 7. 17 Kurva P-lendutan di tengah bentang spesimen balok	119
Gambar 7. 18 Profil lendutan spesimen balok B1 dengan beberapa beban P yang berbeda (a) beban 25% P_{maks} , (b) beban 50% P_{maks} , (c) beban 75% P_{maks} , (d) beban 100% P_{maks}	120
Gambar 7. 19 Kurva beban-regangan tulangan tarik pada spesimen balok tanpa sambungan	121
Gambar 7. 20 Kurva beban-regangan tulangan tarik pada spesimen balok dengan sambungan	122
Gambar 7. 21 Kurva momen-kurvatur spesimen balok eksperimen dibandingkan dengan teoritis	123
Gambar 8. 1 Kalibrasi material CDPM terhadap gaya uniaksial tekan	128
Gambar 8. 2 Kalibrasi material CDPM terhadap gaya uniaksial tarik.....	128
Gambar 8. 3 Kurva tegangan-regangan tulangan yang dimasukkan ke LS_Dyna	129
Gambar 8. 4 Kurva tegangan-regangan s yang dimasukkan ke LS_Dyna.....	130
Gambar 8. 5 Model tegangan lekat-slip dari Murcia	131
Gambar 8. 6 (a) tampak isometri, (b) tampak depan, dan (c) tampak samping spesimen dalam pemodelan numerik	132
Gambar 8. 7 (a) epoksi sebagai <i>solid element</i> , (b) selongsong dimodelkan sebagai <i>shell element</i> , dan (c) tulangan sebagai <i>beam element</i>	132
Gambar 8. 8 Kurva Beban (P) terhadap slip antara eksperimen dengan hasil analisis numerik	134
Gambar 8. 9 Kurva tegangan-regangan tulangan pada titik SG_1 sambungan ESO	135
Gambar 8. 10 Kurva beban (P) – regangan pada titik SG_1 spesimen ESO	136

Gambar 8. 11 Kurva beban (P) – regangan pada titik SG_2 sambungan ESO....	136
Gambar 8. 12 Kurva beban (P) – regangan tulangan pada titik SG_3 sambungan ESO	137
Gambar 8. 13 Kurva beban (P) – regangan tulangan pada titik SG_4 sambungan ESO	138
Gambar 8. 14 Kurva beban (P) – regangan selongsong pada titik SG_5 sambungan ESO	138
Gambar 8. 15 Kurva beban (P) – regangan selongsong pada titik SG_6 sambungan ESO	139
Gambar 8. 16 (a) pola kegagalan epoksi pada simulasi numerik, (b), (c), & (e) pola kegagalan spesimen dari eksperimen, (d) pola kegagalan tulangan dari simulasi numerik	141
Gambar 8. 17 Pola kegagalan spesimen sambungan ESO pada tinjauan arah transversal	142

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu mengenai <i>coupler</i> dengan pengujian <i>pullout</i>	16
Tabel 2. 2 Peraturan Mengenai Sambungan Mekanis.....	24
Tabel 3. 1 Rancangan pengujian <i>pullout</i>	45
Tabel 3. 2 Rancangan pengujian tahap II.....	48
Tabel 5. 1 Hasil pengukuran diameter tulangan.....	66
Tabel 5. 2 Nilai <i>bond index</i> tulangan	66
Tabel 5. 3 Nilai rata-rata hasil pengujian sifat mekanik epoksi	69
Tabel 5. 4 Rekapitulasi pola kegagalan pengujian tarik langsung	83
Tabel 6. 1 Hasil Pengukuran diameter tulangan	86
Tabel 6. 2 Gaya maksimum dan pola kegagalan spesimen setelah diuji <i>pullout</i> ...97	
Tabel 6. 3 Perbandingan antara L_{hit} hasil hitungan dengan L yang dipakai pada eksperimen	101
Tabel 7. 1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton.....	102
Tabel 7. 2 Hasil pengujian tarik belah beton.....	104
Tabel 7. 3 Hasil pengujian tarik langsung beton.....	104
Tabel 7. 4 Hasil pengujian tarik tulangan D10	107
Tabel 7. 5 Hasil pengujian epoxy tipe C.....	108
Tabel 7. 6 Rangkuman spesifikasi material spesimen balok	109
Tabel 7. 7 Rangkuman nilai Momen dan kurvatur penampang spesimen	111
Tabel 7. 8 Nilai beban, lendutan, dan daktilitas <i>displacement</i> spesimen balok...118	
Tabel 7. 9 Momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur spesimen balok tanpa sambungan, dengan sambungan, dan teoritis.....	123

DAFTAR NOTASI

d	= tinggi efektif balok
d'	= tebal selimut beton
f_y	= Tenggangan leleh baja
f_u	= Tenggangan tarik baja
k	= faktor pengali bagian tertekan beton
p_{cr}	= luasan bidang retak
D	= diameter tulangan
D_b	= panjang perimeter ke-2 tulangan yang <i>overlapping</i>
E_s	= modulus elastisitas baja (MPa)
E_c	= modulus elastisitas beton (MPa)
F_b	= tegangan lekat (MPa)
L_{cr}	= zona <i>coupler</i> (mm)
L_o	= panjang sambungan tulangan <i>overlapping</i> (mm)
L_{sp}	= panjang <i>coupler</i> (mm)
N_{sp}	= gaya <i>splitting</i> (kN)
P	= gaya tarik (<i>pullout</i>)
P_b	= resultan gaya akibat tegangan lekat (N)
P_g	= resultan gaya yang diperoleh dari tegangan tarik <i>grouting</i> (N)
P_g^u	= kekuatan tarik <i>grouting</i> (N)
P_s^u	= kekuatan tarik tulangan (N)
P_{leleh}	= gaya pada saat leleh (N)
P_{maks}	= gaya maksimum (N)
α	= faktor pengali zona <i>coupler</i>
α	= koefisien block stress beton tertekan
β	= faktor panjang kekakuan <i>coupler</i>
ϵ_{cu}	= regangan meksimum beton
ϵ_{sp}	= regangan pada zona <i>coupler</i> ,
ϵ_s	= regangan pada tulangan
ϵ_y	= regangan pada tulangan saat leleh
ϵ_{sh}	= regangan pada tulangan saat <i>strain hardening</i>
ϵ_{su}	= regangan pada tulangan saat putus

- γ = koefisien tinggi block stress beton tertekan
- σ_h = tegangan *splitting* tarik (MPa)
- σ_{leleh} = tegangan leleh tulangan (MPa)
- σ_{maks} = tegangan maksimum tulangan (MPa)
- σ_n = tegangan lekat arah radial (MPa)
- μ = koefisien friksi
- μ_ϕ = daktilitas kurvatur
- ϕ_y = rotasi pada saat tulangan leleh
- ρ = rasio luas tulangan yang menerima gaya tarik terhadap luas penampang balok
- ρ' = rasio luas tulangan yang menerima gaya tekan terhadap luas penampang balok

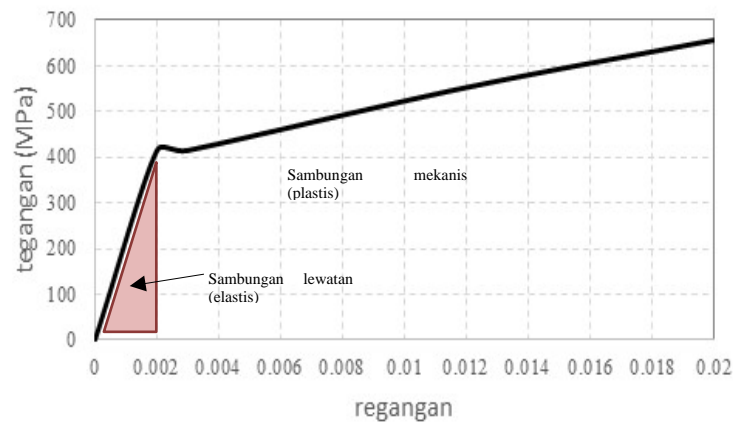
BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tulangan yang tersedia di pasaran memiliki panjang terbatas, sedangkan kebutuhan tulangan untuk penulangan komponen struktur mengharuskan memiliki panjang tertentu sehingga perlu adanya penyambungan tulangan. Penyambungan tulangan ini diperlukan untuk memberikan kontinuitas struktur pada beton bertulang. Penyambungan tulangan juga diperlukan untuk sambungan beton pracetak.

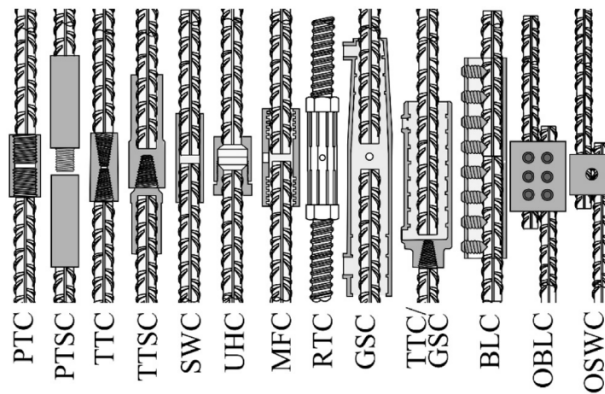
Terdapat berbagai tipe sambungan tulangan yang dapat digunakan pada komponen struktur salah satunya adalah sambungan mekanis. Contoh sambungan mekanis antara lain sambungan las, sambungan menggunakan *coupler*, sambungan kombinasi antara *coupler* dan *grouting*, dan sambungan menggunakan pelat baja [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Dari berbagai model sambungan tersebut tentu memiliki kelebihan dan kekurangan, jika menggunakan sambungan las, pengerjaan mudah namun baja dapat mengalami perubahan sifat mekanik terutama kekuatannya dan terjadi tegangan residual [8], [9]. Sambungan harus mampu mentransfer gaya-gaya antar elemen dan mempunyai kekuatan serta daktilitas yang baik [10], [11].

Penyambungan *lap splice* yaitu sambungan tulangan yang dipasang berdampingan dengan panjang tertentu (sambungan lewatan) sangat umum dan mudah dilakukan namun terdapat kekurangan antara lain, kerapatan tulangan meningkat, perlu panjang penyaluran tertentu, dan tegangan yang terjadi pada sambungan lewatan hanya pada kondisi elastis (Gambar 1.1). Tulangan pada daerah sambungan lewatan saat menerima beban berlebih cenderung mengalami slip terutama pada tulangan diameter besar, kegagalan yang terjadi tidak disebabkan oleh tulangan putus [12]. Berbeda dengan sambungan lewatan, diagram tegangan-regangan yang dapat dicapai dari sambungan mekanis hingga tulangan terjadi kondisi plastis (Gambar 1.1) [13]. Ini adalah kelebihan dari sambungan mekanis, kegagalan tulangan mengalami pengembangan inelastik hingga mencapai kondisi leleh dan putus.



Gambar 1. 1 Pola tegangan-regangan sambungan tulangan [13]

Sambungan mekanis merupakan teknik penyambungan tulangan yang lazim digunakan. Berbagai tipe sambungan mekanis tulangan dengan *coupler* disajikan pada Gambar 1.2. Pada sistem ini kedua ujung tulangan yang disambung dibuat ulir agar coupler bisa dipasang, contoh sambungan mekanis tipe ini antara lain: PTC (*Parallel Threaded Coupler*), PTSC (*Parallel Threaded Sleeve Coupler*), TTC (*Taper Threaded Coupler*), TTSC (*Taper Threaded Sleeve Coupler*), UHC (*Upset Headed Coupler*), RTC (*Rib Threaded Coupler*) [14]. Ulir dibuat melalui serangkaian proses, antara lain dengan penempaan dingin dilanjutkan dengan pembentukan ulir. Proses ini menyebabkan kekuatan tariknya meningkat namun baja menjadi lebih getas, sehingga daktilitas baja mengalami penurunan. Selain menggunakan ulir ada juga yang menggunakan kombinasi salah satu ujung ulir sedangkan ujung satunya memakai grouting, contohnya TTC/GSC (*Taper Threaded-Grouted Sleeve Coupler*). Ada juga model sambungan yang mengandalkan baut, yaitu: BLC (*Bolt Lock Coupler*), OBLC (*Offset Bolt Lock Coupler*), dan OSWC (*Offset Swaged Wedge Coupler*).



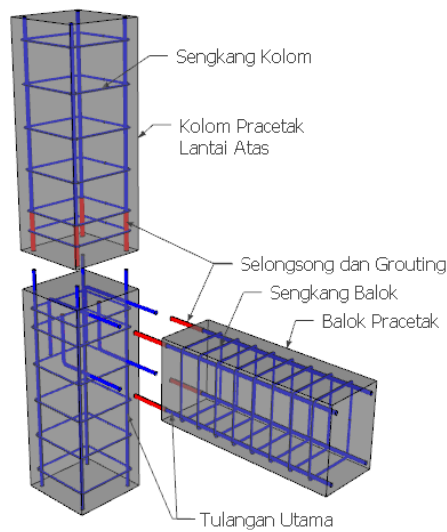
Gambar 1. 2 Tipe-tipe sambungan mekanik menggunakan coupler [15]

Keterangan Gambar 1.2:

PTC (*Parallel Threaded Coupler*), PTSC (*Parallel Threaded Sleeve Coupler*), TTC (*Taper Threaded Coupler*), TTSC (*Taper Threaded Sleeve Coupler*), SWC (*Swaged Wedge Coupler*), UHC (*Upset Headed Coupler*), MFC (*Metal Filled Coupler*), RTC (*Rib Threaded Coupler*), TTC/GSC (*Taper Threaded-Grooved Sleeve Coupler*), BLC (*Bolt Lock Coupler*), OBLC (*Offset Bolt Lock Coupler*), OSWC (*Offset Swaged Wedge Coupler*).

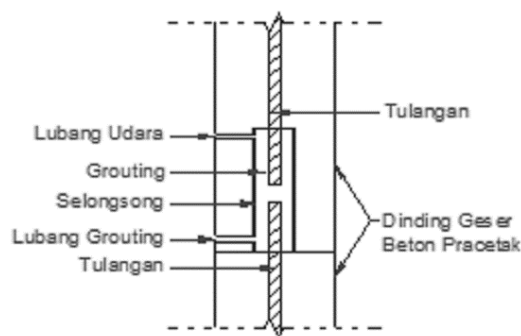
Dalam peraturan beton bertulang mulai ACI, AASTHO, dan SNI telah diatur sistem penyambungan tulangan mekanis [16], [17], [18]. Sambungan mekanis dapat dipakai pada daerah sendi plastis jika kekuatan tarikny mencapai 125% dari tegangan leleh, kondisi tersebut mirip dengan tulangan yang tidak disambung. Ketika diuji tarik, tulangan diharapkan putus di luar lokasi sambungan dan tidak terjadi slip [19], . Saat sambungan digunakan pada komponen struktur diharapkan mampu berdefleksi namun kekakuan batang masih dalam kondisi baik sehingga batang mencapai kondisi plastis [20].

Penerapan sistem sambungan mekanis untuk penyambungan komponen beton pracetak seperti pada Gambar 1.3. Sambungan ini menggunakan selongsong dan grouting untuk menyatukan tulangan dengan memasukkan tulangan pada selongsong selanjutnya selongsong diisi grouting [21]. Cara penyambungan dengan tulangan yang disambung bertemu pada as yang sama (*splice connector*) disajikan pada Gambar 1.4. Sambungan seperti ini memerlukan panjang penanaman yang cukup agar kekuatan lekatnya setara dengan kekuatan tarik tulangan [22]. Panjang selongsong yang diperlukan menjadi dua kali panjang penanaman tulangan, dengan demikian material selongsong dan grouting yang diperlukan menjadi lebih banyak.

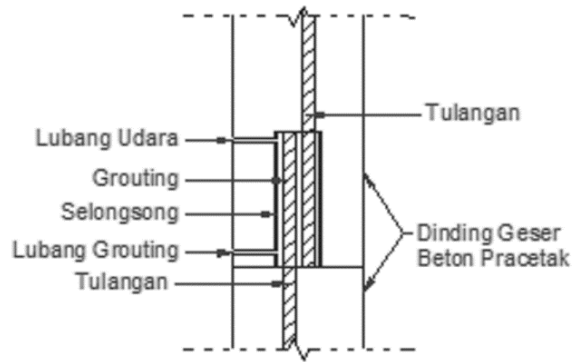


Gambar 1. 3 Sambungan komponen struktur menggunakan selongsong dan grouting

Penyambungan tulangan dengan selongsong dan grouting dapat dilakukan dengan overlapping antar tulangan (*lapping connector*) seperti pada Gambar 1.5. Dengan panjang penanaman tulangan yang sama pada *lapping connector* diperoleh kapasitas tarik 2,45 kali lebih besar dibanding *splice connector* [22]. Riset mengenai sambungan mekanik dengan menggunakan selongsong pipa dan grouting telah dilakukan Yu & Xu (2017) Selongsong diperoleh dari pipa standar yang dipotong-potong sesuai kebutuhan tanpa adanya fabrikasi tambahan sehingga dapat menghemat biaya [23].



Gambar 1. 4 Penyambungan tulangan yang bertemu pada as yang sama (*grout splice connector*)



Gambar 1. 5 Penyambungan tulangan overlapping (grout lapping connector)

Sifat mekanik pada sambungan *grout splice connector* yang diperoleh dari penelitian terdahulu meliputi: mekanisme transfer gaya [24], kekuatan lekat sepanjang tulangan yang tertanam [25], dan mekanisme pengekangan [26]. Penelitian lain yang masih terkait dengan sambungan *grout splice connector* telah banyak dilakukan dan hasil penelitian tersebut merekomendasikan bahwa sambungan *grout splice connector* sudah layak digunakan [10][27]–[30]. Namun penelitian mengenai sambungan *grout lapping connector* yang telah dilakukan belum sebanyak *grout splice connector* sehingga dipilih penelitian tentang sambungan *grout lapping connector*. Penelitian terdahulu yang membahas sambungan *grout lapping connector* meliputi kelayakan, mekanisme kerja, persamaan untuk menghitung tegangan lekat *overlapping* rata-rata dan panjang *overlapping* kritis menggunakan regresi linier [23]. Sifat mekanis pada sambungan *grout lapping connector* meliputi mekanisme transfer beban, gaya-gaya pada penampang, dan distribusi tegangan lekat sepanjang tulangan *overlapping* [22].

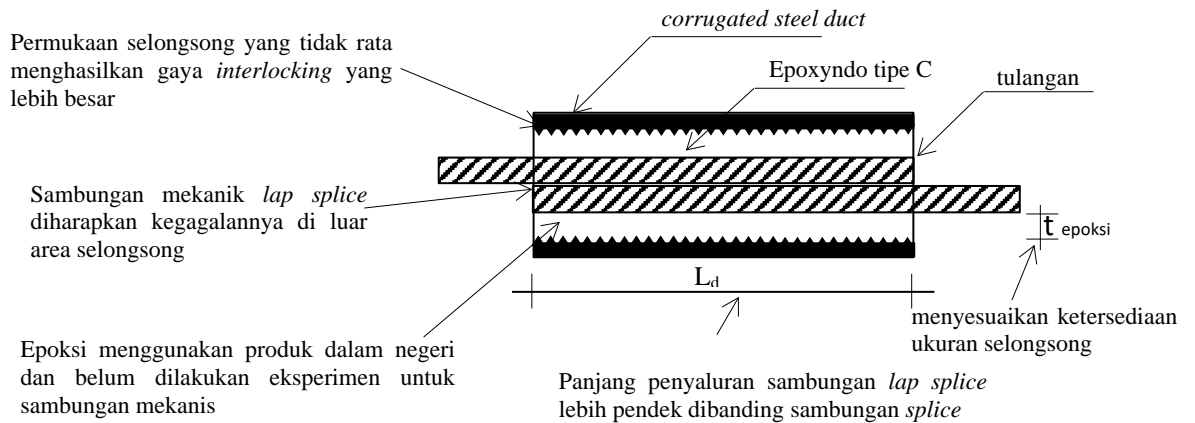
Penelitian mengenai sambungan mekanis ini dilakukan sebagai alternatif model sambungan untuk memperkaya pilihan tipe sambungan dengan model sambungan tulangan mekanis menggunakan epoksi dan selongsong. Lazimnya selongsong yang digunakan untuk sambungan menggunakan *coupler* produksi dari pabrik atau pipa besi standar atau tulangan dibentuk spiral, namun pada penelitian ini menggunakan selongsong berbentuk *corrugated*. Selongsong berbentuk *corrugated* (Gambar 1.6). dengan permukaan dinding berlekuk dapat meningkatkan kekuatan lekat, baik antar epoksi dengan selongsong maupun selongsong dengan beton. Permukaan selongsong yang tidak rata memiliki gaya *interlocking* yang besar. Hal ini tidak dimiliki oleh selongsong dengan permukaan halus.

Gambar 1. 6 *Corrugated steel duct*

Lekatan tulangan pada epoksi dengan lekatan tulangan dengan beton memiliki pola kurva tegangan lekat terhadap slip yang relatif sama namun epoksi memiliki kurva dengan tegangan yang lebih tinggi [31]. Berdasarkan hal itu maka model tegangan lekat-slip tulangan dengan beton digunakan pada lekatan tulangan dengan epoksi [32]. Adapun komponen lain yang dapat menentukan besarnya kekuatan lekat adalah kuat tekan material di sekitar tulangan, baik beton atau epoksi. Faktor lain yang menentukan kekuatan lekat yaitu tebal epoksi. Tebal epoksi untuk sambungan pengisi selongsong berkisar antara 9 mm – 50 mm [26][22][33]–[35]. Tebal epoksi ini dipengaruhi oleh ketersediaan selongsong yang tersedia dipasaran. Komponen lain yang menentukan lekatan adalah kondisi sirip atau *relative rib area* [36][37]. Data-data hasil penelitian terdahulu selanjutnya menjadi rujukan dalam penelitian ini.

Adapun epoksi sebagai pengisi selongsong untuk penyambungan tulangan menggunakan *epoxy oil base* dibuat di dalam negeri sehingga memiliki kelebihan dari segi harga. Material epoksi ini diproduksi oleh PT. Epoxyndo untuk mendukung penelitian ini. Epoksi ini memiliki kekuatan yang cukup tinggi dan kekentalannya dapat diatur serta waktu pengerasannya tidak terlalu cepat sehingga memudahkan proses pengerjaan dan dapat mengisi ruang selongsong yang terbatas. Sistem penyambungan tulangan ini dibuat secara *overlapping (grout lapping connector)*. Sistem sambungan ini dapat memperpendek panjang sambungan sehingga penggunaan epoksi menjadi berkurang, dan memiliki kekuatan yang lebih

besar dibanding sambungan tanpa *overlapping*. Model sambungan tersebut diberi nama sambungan ESO (Epoksi Selongsong Overlapping), bentuk model sambungan disajikan pada Gambar 1.7.



Gambar 1. 7 Rancangan model sambungan ESO

Model sambungan ESO ini memiliki dua (2) bidang kontak yaitu (1) tulangan dengan epoksi dan (2) epoksi dengan dinding dalam selongsong. Sambungan ini mengandalkan kekuatan lekat yang dibangun antara tulangan, epoksi, dan selongsong. Tulangan dengan sirip-siripnya akan memberikan kekuatan lekat yang baik, sedangkan selongsong dengan sisi dalam kasar diharapkan dapat memberikan kontribusi kekuatan lekat yang baik pula. Epoksi yang berfungsi sebagai perekat antara tulangan dengan selongsong dipilih jenis epoksi yang memiliki kekuatan geser yang baik. Sambungan ESO ini diharapkan dapat diimplementasikan untuk penyambungan tulangan beton konvensional atau untuk penyambungan tulangan pada beton pracetak. Model sambungan ESO ini diprediksi memiliki kinerja yang baik, mulai dari grafik tegangan-regangan dengan kekuatan tarik mencapai 125% dan letak putusnya tulangan ketika diuji berada di luar sambungan.

Untuk mendapatkan kinerja rancangan sambungan mekanis ini perlu diujicobakan pada komponen struktur. Parameter yang lazim digunakan untuk menyatakan daktilitas dan cukup representatif dalam mendeskripsikan kinerja suatu komponen struktur, baik balok maupun kolom, adalah daktilitas kurvatur (μ_ϕ) [38]. Pengujian tarik sebagai pengujian tahap awal dilakukan untuk mendapatkan nilai

tegangan lekat dan grafik beban-lendutan dari masing-masing benda uji [13] [39]. Sambungan-sambungan tersebut selanjutnya diterapkan pada benda uji skala penuh untuk komponen struktur lentur (balok). Berdasarkan hasil eksperimen dapat diperoleh grafik hubungan momen-kurvatur dan nilai daktilitas kurvatur komponen struktur lentur. Hasil penelitian lainnya yang diharapkan adalah pola kegagalan dari masing-masing spesimen.

1.2 Perumusan masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

Tahap I

1. Epoksi apa yang akan digunakan dalam sambungan ESO ini?
Epoksi yang dipilih tidak hanya mempunyai kekuatan ditinjau dari kemampuan lekatan yang besar namun sebaiknya mudah dikerjakan sebab pengerjaan ini akan mempengaruhi hasil.
2. Bagaimana kekuatan *pullout* tulangan tunggal dengan epoksi yang terpilih di dalam *corrugated steel duct* dengan beberapa variasi panjang penyaluran?
Pada pengujian ini diperoleh tegangan lekat dan pola kegagalan spesimen. Kekuatan spesimen yang diharapkan berupa kegagalan tulangan putus. Ini menunjukkan bahwa kekuatan spesimen ini lebih besar daripada kekuatan tarik tulangan. Panjang penyaluran yang diuji adalah 5D, 10D, 15D, dan 20D. Tebal epoksi yang digunakan menyesuaikan ukuran selongsong yang tersedia di pasaran, yaitu 52 mm. Tebal epoksi dalam penelitian ini sekitar 10 – 20 mm. Hasil eksperimen ini dipakai untuk menentukan panjang penyaluran tulangan yang disambung secara *overlapping* untuk penelitian selanjutnya.

Tahap II

1. Bagaimana kemampuan tarik yang mampu ditahan sambungan ESO yang diuji *pullout* dan regangan yang terjadi pada setiap komponen material meliputi: tulangan, epoksi, dan selongsong?
2. Bagaimana pola kegagalan yang terjadi pada sambungan ESO?
Dalam tahap kedua ini dilakukan pengujian *pullout* sambungan ESO secara individu dan belum tertanam pada beton. Panjang sambungan ditentukan dari hasil pengujian *pullout* dengan tulangan tunggal pada tahap I. Meskipun pada

pengujian tahap II ini digunakan dua tulangan yang saling *overlapping* namun mekanisme ikatan tulangan *lap splice* ini serupa dengan tulangan *splice*/tunggal [40].

Tahap III

1. Bagaimana kinerja sambungan tulangan ESO ditinjau dari diagram momen kurvatur dan daktilitas kurvatur penampang balok?

Untuk mendapatkan momen kurvatur dan daktilitas kurvatur penampang balok menggunakan sambungan ESO dipilih benda uji berupa balok dengan posisi sambungan di tengah bentang.

Meskipun sambungan ESO ini lebih cocok untuk sambungan beton pracetak pada dinding geser dan kolom namun tidak menutup kemungkinan dapat dimanfaatkan untuk sambungan balok.

2. Bagaimana pola kegagalan masing-masing spesimen balok?

1.3 Tujuan

Berdasarkan perumusan masalah maka tujuan penelitian adalah:

Tahap I

1. Menentukan jenis epoksi yang digunakan pada sambungan ESO.
2. Menentukan panjang penyaluran tulangan tunggal menggunakan epoksi yang terpilih di dalam *corrugated steel duct*.

Tahap II

1. Meneliti kemampuan tarik yang mampu ditahan sambungan ESO yang diuji *pullout* dan regangan yang terjadi pada setiap komponen material meliputi: tulangan, epoksi, dan selongsong.
2. Meneliti pola kegagalan yang terjadi pada sambungan ESO.

Tahap III

1. Meneliti kinerja sambungan tulangan ESO yang diimplementasikan pada balok dengan posisi sambungan di tengah bentang ditinjau dari diagram momen-kurvatur dan nilai daktilitas kurvatur penampang balok.
2. Meneliti pola kegagalan balok menggunakan sambungan ESO yang diberi beban terpusat.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Sambungan ESO merupakan sambungan tulangan menggunakan selongsong, tulangan dimasukkan dalam selongsong dengan posisi tulangan saling *overlapping* selanjutnya selongsong diisi epoksi. Selongsong yang digunakan adalah *corrugated steel duct*.
2. Tulangan yang disambung berdiameter 13 mm, digunakan produk dari Krakatau Steel.
3. Panjang penyaluran dibuat bervariasi antara 5 sampai 20 kali diameter tulangan.
4. Mutu beton yang digunakan mutu beton normal sekitar 30 MPa.
5. Epoksi yang digunakan adalah *oil base*.
6. Tebal epoksi yang digunakan antara 10 – 20 mm.
7. Sambungan ini tinjauannya dibatasi terhadap gaya tarik saja, mengingat perilaku sambungan lebih rawan akibat gaya tarik.
8. Grafik tegangan regangan diperoleh dari pengujian tarik menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) dan nilai regangan diperoleh dari hasil pembacaan strain gauge.

1.5 Metode Penelitian

Tahap awal penelitian ini adalah telusur pustaka mulai dari tesis, disertasi, publikasi jurnal maupun prosiding, dan paten yang saat ini bisa diakses dengan mudah dan cepat. Dari telusur pustaka ini dapat dipetakan penelitian yang belum dilakukan oleh peneliti sebelumnya, selanjutnya dirumuskan permasalahan, tujuan, ruang lingkup, hipotesis, metode yang akan digunakan, dan temuan yang diharapkan.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian eksperimen di laboratorium. Untuk keperluan analisis sambungan ESO dan kinerja balok perlu dilakukan pengujian awal terhadap komponen material yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai propertiesnya. Pengujian ini meliputi: (1) pengujian sifat mekanik tulangan, (2) pengujian sifat mekanik epoksi, (3) pengujian sifat mekanik selongsong dan (4)

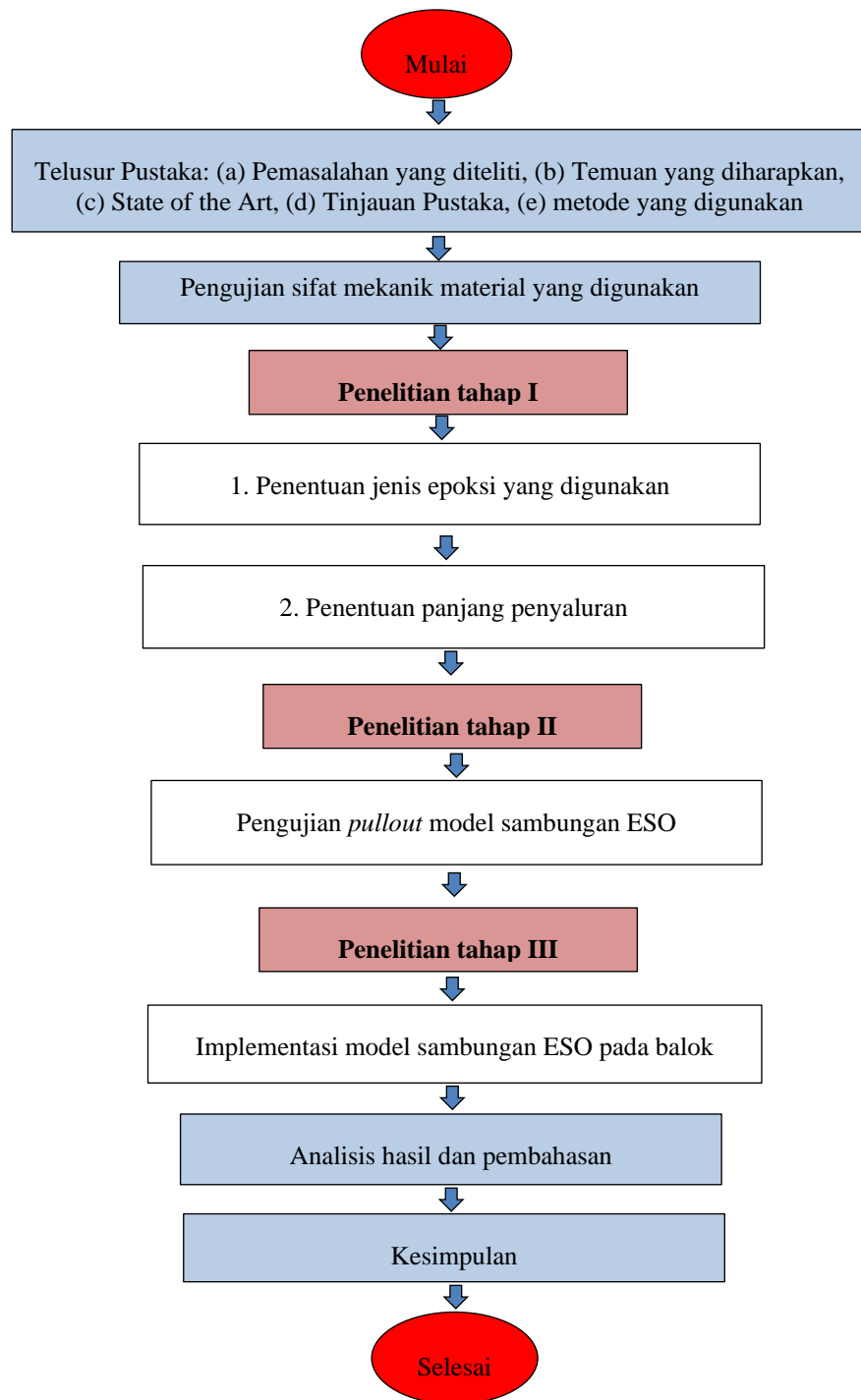
pengujian sifat mekanik beton. Data-data yang diperoleh dari pengujian ini digunakan untuk analisis hasil.

Alur utama dalam penelitian ini ada tiga (3) tahapan, **tahap pertama** pengujian geser epoksi dan *pullout* untuk menentukan jenis epoksi yang digunakan. Setelah diperoleh jenis epoksi dilanjutkan dengan pengujian tarik langsung satu tulangan dimasukkan dalam selongsong yang diberi epoksi dan pengujian geser epoksi dengan variasi panjang penyaluran. Hasil yang diharapkan dari pengujian tarik langsung ini untuk mendapatkan grafik diagram beban-slip tulangan tunggal di dalam selongsong menggunakan epoksi. Hasil ini dipakai untuk menentukan panjang sambungan ESO. Mekanisme ikatan antara tulangan dengan epoksi pada pengujian *pullout* tulangan tunggal (pengujian tahap I) relatif serupa dengan *pullout lap splice* (pengujian tahap II) maka hasil pengujian tahap I berupa panjang penyaluran dapat digunakan sebagai referensi untuk pengujian tahap II [40].

Setelah ditentukan jenis epoksi dan panjang penyaluran yang digunakan selanjutnya masuk **tahap kedua** pada penelitian ini, yaitu pembuatan benda uji dua batang tulangan yang disambung menggunakan selongsong (*corrugated steel duct*) dan epoksi. Benda uji tersebut diuji tarik langsung, untuk mendapatkan kekuatan tarik sambungan dan regangan yang terjadi pada tulangan, epoksi, dan selongsong, serta tegangan lekat, juga pola kegagalan yang terjadi.

Tahap ketiga dari penelitian ini yaitu penerapan sambungan ESO pada komponen struktur balok secara eksperimental. Sambungan tulangan diletakkan pada bagian tengah, selanjutnya benda uji dibebani dua (2) gaya terpusat dengan beban monotonik. Dahal dkk (2019) dalam risetnya menguji sambungan selongsong menggunakan beban monotonik dan siklik menunjukkan tidak ada perbedaan perilaku yang signifikan dari kedua pengujian tersebut [39][19][41].

Dari penelitian ini diperoleh model sambungan tulangan ESO dan dapat diidentifikasi sebagai sambungan mekanis sesuai dengan kategorinya, yaitu tipe 1 atau tipe 2 [42] [16]. Skema alur penelitian disajikan pada Gambar 1.8.



Gambar 1. 8 Skema Alur Penelitian

1.6 Hipotesis

1. Sambungan tulangan ESO yang merupakan sambungan tulangan modifikasi memiliki kurva diagram tegangan-regangan yang mendekati sama dengan

tulangan tanpa sambungan. Kurva tegangan-regangan hasil eksperimen relatif sama dengan pemodelan numerik

2. Pada sambungan tulangan ESO dengan posisi tulangan saling *overlapping* (*lap splice*) di dalam selongsong dan diisi epoksi memiliki gaya aksial yang relatif sama dengan gaya aksial tulangan tanpa sambungan. Letak titik leleh dan putus tulangan berada di luar sambungan ESO, dengan panjang selongsong maksimum 15 kali diameter tulangan utama (15D).
3. Berdasarkan pengujian lentur spesimen balok menggunakan sambungan ESO di tengah dengan pembebanan dua (2) titik terpusat memiliki kinerja sama dengan spesimen balok tanpa sambungan. Kinerja struktur yang ditinjau meliputi: momen kapasitas, daktilitas *displacement*, daktilitas kurvatur, grafik momen kurvatur, dan pola kegagalan.

1.7 State of the Art dan Novelty

Penyambungan tulangan sistem mekanis dapat menghasilkan pola kegagalan hingga kondisi inelastis yang tidak didapatkan dari penyambungan tulangan konvensional. Kekuatan sambungan mekanis mengandalkan kekuatan dari epoksi, permukaan selongsong, dan panjang penanaman tulangan. Ditinjau dari konfigurasi tulangan yang disambung terdiri dari *splice* dan *lap splice connector*. Untuk mengurangi panjang sambungan dapat menggunakan *lap splice*. Berdasarkan identifikasi ini maka dibuat model sambungan epoksi selongsong *overlapping* (ESO) yang mengandalkan panjang *overlapping* tulangan yang diberi epoksi dan selongsong sebagai *confinement* dengan permukaan selongsong yang kasar dan berlekuk. Permukaan selongsong yang berlekuk-lekuk dapat meningkatkan kemampuan lekatan antara epoksi maupun beton karena meningkatnya gaya *interlocking*. Selongsong yang dipakai dalam penelitian ini adalah *corrugated steel duct*. Epoksi sangat menentukan kekuatan sambungan, sehingga setiap epoksi yang belum pernah digunakan untuk bahan pengisi selongsong pada sambungan perlu dilakukan eksperimen. Epoksi yang dipakai pada sambungan ini adalah Epoxyndo tipe C, selain kuat juga workable yang dapat mempengaruhi mutu sambungan. Kelebihan lain Epoxyndo tipe C ini adalah produk dalam negeri, sehingga selama pandemic ini mudah diperoleh. Kekuatan

sambungan juga ditentukan dari panjang *overlapping* tulangan. Perlu ditentukan panjang penyaluran yang tepat sehingga transfer gaya dapat menghasilkan pola kegagalan hingga kondisi inelastis.

1.8 Temuan yang Diharapkan

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan temuan berupa:

- 1 Diagram beban-slip tulangan pada sambungan ESO.
- 2 Tegangan lekat yang terjadi antara tulangan, epoksi, dan selongsong.
- 3 Pola kegagalan spesimen balok menggunakan sambungan ESO.
- 4 Diagram momen-kurvatur penampang balok menggunakan sambungan ESO.
- 5 Daktilitas kurvatur penampang balok menggunakan sambungan ESO.
- 6 Pola kegagalan balok menggunakan sambungan ESO.

Penelitian ini juga dapat memberikan informasi mengenai kinerja sambungan tulangan menggunakan selongsong dengan epoksi yang diberi nama sambungan Epoksi Selongsong *Overlapping* (ESO). Sambungan ESO selanjutnya diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai alternatif metode penyambungan tulangan untuk beton konvensional maupun beton pracetak.