

TESIS

**ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN BALOK-KOLOM
EKSTERIOR *CRUMB RUBBER CONCRETE* DENGAN
VARIASI TULANGAN GESER TERHADAP BEBAN
LATERAL SIKLIK**



**MUHAMMAD ANGGARA ADJI PRASETIYA
03022682327019**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

TESIS

ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR *CRUMB RUBBER CONCRETE* DENGAN VARIASI TULANGAN GESER TERHADAP BEBAN LATERAL SIKLIK

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Magister Teknik Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya**



**MUHAMMAD ANGGARA ADJI PRASETIYA
03022682327019**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR *CRUMB RUBBER CONCRETE* DENGAN VARIASI TULANGAN GESER TERHADAP BEBAN LATERAL SIKLIK

TESIS

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik pada Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Oleh:

MUHAMMAD ANGGARA ADJI PRASETIYA

NIM. 03022682327019

Palembang, Juli 2025

Dosen Pembimbing I,



Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.
NIP. 198605192019031007

Dosen Pembimbing II,



Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T., IPU.
NIP. 197705172008012039

Mengetahui/Menyetujui,
Dekan Fakultas Teknik,



Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T. IPM
NIP. 197502112003121002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan,



Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 197610312002122001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Tesis ini dengan judul “Analisis Perilaku Sambungan Balok-Kolom Eksterior *Crumb Rubber Concrete* Dengan Variasi Tulangan Geser Terhadap Beban Lateral Siklik” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 30 Juli 2025.

Palembang, 30 Juli 2025

Tim Penguji Karya Ilmiah berupa Tesis

Dosen Pembimbing 1:

Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.

NIP. 198605192019031007

()

Dosen Pembimbing 2:

Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T., IPU.

NIP. 197705172008012039

()

Dosen Penguji 1:

Dr. Ir. Rosidawani, S.T., M.T.

NIP. 197605092000122001

()

Dosen Penguji 2:

Dr. Ir. K.M. Aminuddin, S.T., M.T., IPU., ASEAN, Eng

NIP. 197203141999031006

()

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan



Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 197610312002122001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Anggara Adji Prasetya
NIM : 03022682327019
Judul : Analisis Perilaku Sambungan Balok-Kolom Eksterior *Crumb Rubber Concrete* Dengan Variasi Tulangan Geser Terhadap Beban Lateral Siklik

Menyatakan bahwa Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik di Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, Juli 2025



Muhammad Anggara Adji Prasetya
NIM. 03022682327019

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Anggara Adji Prasetya
NIM : 03022682327019
Judul : Analisis Perilaku Sambungan Balok-Kolom Eksterior *Crumb Rubber Concrete* Dengan Variasi Tulangan Geser Terhadap Beban Lateral Siklik

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu satu tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (corresponding author).

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Juli 2025



Muhammad Anggara Adji Prasetya
NIM. 03022682327019

RINGKASAN

ANALISIS PERILAKU SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR CRUMB RUBBER CONCRETE DENGAN VARIASI TULANGAN GESER TERHADAP BEBAN LATERAL SIKLIK

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 30 Juli 2025

Muhammad Anggara Adji Prasetya; Dibimbing oleh Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T., IPU.

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
xxii + 143 halaman, 118 gambar, 23 tabel, lampiran

Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku sambungan balok–kolom eksterior *crumb rubber concrete* (CRC) sebagai hasil substitusi parsial agregat halus dengan variasi tulangan geser terhadap beban lateral siklik. Latar belakang penelitian didasari oleh tingginya risiko gempa di Indonesia dan pentingnya sambungan balok–kolom sebagai elemen kritis struktur tahan gempa. Selain itu, pemanfaatan limbah ban bekas dalam bentuk *crumb rubber* menawarkan solusi konstruksi berkelanjutan, meskipun dihadapkan pada penurunan kuat tekan akibat lemahnya ikatan partikel karet dan pasta semen. Permasalahan tersebut diatasi melalui perlakuan *aqua-thermal* (pencucian dan pemanasan). Metodologi penelitian ini meliputi uji laboratorium untuk memperoleh karakteristik mekanik CRC dan simulasi numerik menggunakan ANSYS untuk menganalisis perilaku struktur sambungan balok–kolom eksterior terhadap beban lateral siklik. CRC dengan substitusi *crumb rubber* sebesar 5% menghasilkan kuat tekan optimal sebesar 34,25 MPa dan kuat tarik belah sebesar 2,74 MPa. Sementara itu, CRC 10% menunjukkan peningkatan modulus elastisitas hingga 12.842 MPa serta rasio Poisson sebesar 0,230, yang mengindikasikan peningkatan daktilitas. Deviasi beban lateral antara simulasi dan eksperimen sebesar 8–9%, masih dalam batas toleransi $\leq 10\%$. Variasi jarak antar tulangan geser (sengkang) pada zona sambungan meliputi Ø10–80 mm, Ø10–60 mm, Ø10–48 mm, dan Ø10–40 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin rapat jarak antar sengkang, semakin tinggi kekakuan dan kapasitas beban lateral sambungan akibat peningkatan efek pengekanan terhadap beton. Namun demikian, nilai daktilitas tertinggi sebesar 2,914 diperoleh pada model dengan konfigurasi sengkang paling renggang (Ø10–80 mm). Seluruh model tergolong dalam kategori daktilitas menengah (2–4) sesuai dengan kriteria FEMA 356 (2000).

Kata kunci: Sambungan balok-kolom eksterior, *crumb rubber concrete*, finite element method, beban lateral siklik, tulangan geser

SUMMARY

BEHAVIOR ANALYSIS OF EXTERIOR BEAM–COLUMN JOINTS IN CRUMB RUBBER CONCRETE WITH VARIATIONS IN SHEAR REINFORCEMENT UNDER CYCLIC LATERAL LOADING

Scientific Thesis, July 30, 2025

Muhammad Anggara Adji Prasetiya; *Supervised by* Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T. and Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T., IPU.

Master's Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sriwijaya University

xxii + 143 pages, 118 figures, 23 tables, appendices

This study aims to analyze the behavior of exterior beam–column joints made of crumb rubber concrete (CRC), which incorporates partial substitution of fine aggregate, under cyclic lateral loading with variations in shear reinforcement. The background of this research is based on the high seismic risk in Indonesia and the critical role of beam–column joints in earthquake-resistant structures. Additionally, the utilization of waste tires in the form of crumb rubber offers a sustainable construction solution, although it faces a reduction in compressive strength due to the weak bond between rubber particles and cement paste. This issue is addressed through an aqua-thermal treatment process (washing and heating). The research methodology includes laboratory testing to obtain the mechanical properties of CRC and numerical simulation using ANSYS to evaluate the structural behavior of exterior beam–column joints under cyclic lateral loads. CRC with a 5% crumb rubber substitution achieved an optimal compressive strength of 34.25 MPa and a splitting tensile strength of 2.74 MPa. Meanwhile, 10% CRC showed an increased elastic modulus of up to 12,842 MPa and a Poisson's ratio of 0.230, indicating enhanced ductility. The deviation in lateral load between simulation and experimental results was within 8–9%, which is acceptable under the $\leq 10\%$ tolerance limit. Variations in shear reinforcement spacing within the joint zone included $\emptyset 10$ –80 mm, $\emptyset 10$ –60 mm, $\emptyset 10$ –48 mm, and $\emptyset 10$ –40 mm. The analysis results indicate that closer stirrup spacing leads to higher stiffness and lateral load capacity of the joint due to increased confinement effects on the concrete. Nevertheless, the highest ductility value of 2.914 was observed in the model with the widest stirrup spacing ($\emptyset 10$ –80 mm). All models fall under the category of moderate ductility (2–4) by FEMA 356 (2000) criteria.

Keywords: *Exterior beam–column joint, crumb rubber concrete, finite element method, cyclic lateral load, shear reinforcement.*

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama Lengkap : Muhammad Anggara Adji Prasetya
Tempat, Tanggal Lahir : Martapura, 08 Maret 2002
Agama : Islam
Jenis Kelamin : Laki-laki
Nomor *Handphone* : 089502908008
E-mail : anggaraaji064@gmail.com

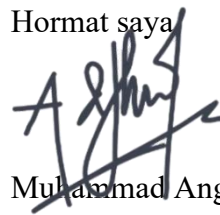
Riwayat Pendidikan :

Insititusi Pendidikan	Fakultas	Jurusan	Pendidikan	Masa
SD Negeri 6 Martapura	-	-	SD	2007-2013
SMP Negeri 1 Martapura	-	-	SMP	2013-2016
SMA Negeri 3 Martapura	-	MIPA	SMA	2016-2019
Universitas Sriwijaya	Teknik	Teknik Sipil	S-1	2019-2023
Universitas Sriwijaya	Teknik	Teknik Sipil	S-2	2023-2025

Demikian riwayat hidup penulis yang dibuat dengan sebenarnya.

Palembang, Juli 2025

Hormat saya



Muhammad Anggara Adji Prasetya

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan kesehatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Analisis Perilaku Sambungan Balok-Kolom Eksterior *Crumb Rubber Concrete* Dengan Variasi Tulangan Geser Terhadap Beban Lateral Siklik”. Dalam penyusunan tesis ini, penulis mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah Republik Indonesia melalui program Beasiswa Unggulan, yang telah memberikan kesempatan, dukungan pembiayaan, serta kepercayaan kepada penulis untuk melanjutkan studi di Program Magister Teknik Sipil Universitas Sriwijaya.
2. Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si., selaku Rektor Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Sriwijaya.
5. Ibu Dr. Ir. Yulindasari, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng., selaku Koordinator Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Sriwijaya, yang telah memberikan arahan dan kemudahan administrasi selama masa studi.
6. Bapak Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, atas segala arahan, masukan berharga, dan waktu yang telah diluangkan dalam proses konsultasi, khususnya terkait pengujian material *crumb rubber concrete*.
7. Ibu Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T., IPU., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah dengan penuh kesabaran dan ketekunan membimbing penulis dalam proses pemodelan struktur dengan *finite element method* menggunakan program ANSYS.
8. Ibu Dr. Ir. Rosidawani, S.T., M.T., dan Bapak Dr. Ir. K.M. Aminuddin, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan serta kritik membangun dalam penyempurnaan tesis ini.

9. Seluruh dosen dan staf Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Sriwijaya yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama masa studi.
10. Yang paling utama, Papa Drs. Gumunawan dan Mama Lisdarina, S.Pd., orang tua tercinta yang selalu menjadi sumber kekuatan, doa, dan semangat di setiap langkah perjalanan ini. Tanpa cinta, pengorbanan, dan dukungan tanpa henti dari Papa dan Mama, pencapaian ini tak akan pernah terwujud.
11. Adikku tersayang, Rara Intan Rahmawati, yang saat ini sedang menempuh studi kedokteran di Universitas Sriwijaya. Terima kasih atas semangat, doa, dan kebersamaan yang selalu menjadi penguat dalam setiap proses perjuanganku.
12. Bapak Ir. H. Novian Aswardani, S.T., M.M., IPM, ASEAN Eng., selaku Kepala Dinas Perumahan dan Kawasan Permukiman Provinsi Sumatera Selatan; Ibu Ir. Muallimah Gustini, S.T., M.Si., selaku Kepala UPTD PIP2B dan Jasa Konstruksi; Ayunda Budi Indah Hapsari, S.T., M.T. selaku Kasi Jasa Konstruksi, dan Bapak M. Syazari Yazuar, S.T., M.Si., M.T., selaku Kasi PIP2B, yang telah menjadi atasan sekaligus pembimbing selama penulis menjalankan peran sebagai konsultan individu.
13. Pakwo Reza Fahlevi, Makwo Triany Agustina, Wak Rinaldi Mansyur, Wak Yeni Widyawaty, Papi Heriansyah, Mami Maryeni, Wak Harlius, Wak Nirmalasari, serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan doa, dukungan, dan cinta yang tulus. Terima kasih atas kehangatan keluarga yang menjadi sumber kekuatan dan ketenangan hati di tengah segala tantangan selama menempuh studi ini.
14. Para sepupu dan sanak famili penulis yang memberikan dukungan moril dan doa di setiap tahap perjalanan ini, khususnya Ayunda Rosa Trifaza, Yay Aray Harnisa, Dek Selly Harnisa Fitri, Yay Sutan Revo Althariq, Dek Tasya Aulia Maharani, dan Kak Rizky Ajiya Boga. Terima kasih atas kehangatan keluarga, perhatian yang tulus, serta semangat yang secara tak langsung menjadi penguat dalam menyelesaikan studi ini.
15. Para penghuni ruang staf lantai 2 UPTD PIP2B dan Jasa Konstruksi, terima kasih atas kebersamaan, canda tawa, dan suasana kerja yang hangat yang selalu menjadi pelepas penat di sela kesibukan. Khusus untuk Nyayu Elvira Rosalina, *chairmate* setia penulis, terima kasih atas semangat, obrolan ringan,

dan dukungan yang tak ternilai. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Kak M. Trisno, Mbak Rizka Yuniarti, Mbak Endah Puspita Sari, Kak Arizli Romadhon, Hopipah Indah Sari, Untari Safitri Hidayati, dan Hany Juanika, yang telah memberikan kehangatan dan kebaikan yang berarti.

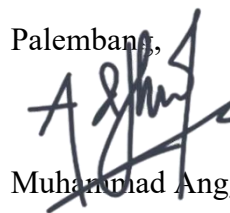
16. Saudara/i Mekanika Gemoy — M. Iqbal Iwang Sadewa, Akde Sekar Cendykia, Shinta Aprilia, Nurhidayah Anggraeni, Rizka Shafira, dan Adella Cahyani, *circle* ambis sejak masa S1 Teknik Sipil yang selalu saling menyemangati di tengah perjuangan akademik. Meskipun kini grup kita mulai sepi karena kesibukan masing-masing, kenangan perjuangan, tawa, dan ambisi bersama akan selalu hidup dalam ingatan.
17. Julian Dwi Tama, Candra Gunawan, Wayan Agung Lesmana HS, Krisna Bimantoro, Ageng Bagaskoro, Syahrul R, dan Pratama Satya Nugraha, teman sejawat sejak masa SMA yang hingga kini masih menjaga tali silaturahmi. Terima kasih atas doa, dukungan, dan perhatian, meski jarak dan waktu memisahkan langkah kita.
18. Sobat MAAS — Annisa Denti Pratiwi, Miranda Dimas Irawan, dan Sindy Agustia Dwita Putri, yang pertemanannya berawal dari satu kelompok kelas *excellent* di masa SMP. Terima kasih atas segala kekocakan, lelucon, dan kehangatan yang terus hidup hingga kini lewat berbagai grup media sosial; kalian adalah pengingat manis bahwa tawa dan persahabatan sejati tak lekang oleh waktu.
19. Sobat Braga, Kak Jose Andre Gunawan, selaku *partner* tesis bareng satu dosen pembimbing, serta Kak Budi Nayobi, Rifkah, dan Kak Aurora Lutfeonetta, terima kasih atas semangat dan kebersamaan selama studi ini.
20. Kando-kando — Kak Rudy Suryadi, Kak Muhamad Junaidi, dan Kak M. Imam Alhafiz, teman curhat sekaligus *partner* nongkrong yang selalu hadir dalam berbagai topik obrolan, dari yang serius hingga yang penuh canda. Terima kasih telah menjadi penasihat, tempat berbagi cerita, menyambat, dan melepas penat di tengah perjalanan panjang menyelesaikan tesis ini.
21. Farhan Fauzan, Ibnu Ahmad Zhafir Aly, Muhammad Rizal Fiqry, Muhammad Irham Dhafin, Imam Ash Shiddiqie, dan Muhammad Arief Arrafi, adik tingkat yang telah membantu penulis dalam berbagai hal di luar urusan tesis sehingga meringankan beban di tengah kesibukan studi.

22. Muhammad Savero Simamaru dan M. Sultan Nuruddin P.S., rekan satu tim dalam berbagai ajang lomba *Building Information Modeling* (BIM), terima kasih atas kerja sama dan semangat luar biasa yang terus terjaga bahkan di tengah padatnya masa studi S2 penulis saat itu. Kebersamaan dan dedikasi kita tidak hanya membuahkan prestasi dalam kompetisi, tetapi juga turut memberikan kontribusi positif bagi Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Sriwijaya hingga berhasil meraih akreditasi unggul.
23. Semua teman-teman S2 Teknik Sipil yang tak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas kebersamaan yang mewarnai perjalanan studi ini.
24. Seluruh pegawai Dinas Perumahan dan Kawasan Permukiman Provinsi Sumatera Selatan yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas dukungan, kerja sama, dan lingkungan kerja yang kondusif yang turut memberikan semangat selama proses penyelesaian studi ini.
25. Teman-teman *second account* IG penulis, yang mungkin jarang bertemu secara langsung, namun tetap setia menjadi tempat berbagi cerita dan *update* kehidupan dalam menjalani hari. Terima kasih telah menjadi ruang aman untuk mengekspresikan diri tanpa batas, dan hadir sebagai pengingat bahwa setiap perjuangan punya teman seperjalanan, walau hanya lewat layar.
26. Terakhir, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada diri sendiri, Muhammad Anggara Adji Prasetya. Terima kasih karena telah bertahan sejauh ini, melewati lelah, ragu, dan segala proses yang tak selalu mudah. Dan yang paling penting, terima kasih karena sudah berani memilih: memilih untuk mencoba, memilih untuk belajar, dan memilih untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan berbagai pihak lain yang membutuhkannya, khususnya civitas akademika Program Studi Magister Teknik Sipil.

Palembang,

Juli 2025



Muhammad Anggara Adji Prasetya

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
RINGKASAN	vii
SUMMARY	viii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxii
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Ruang Lingkup Penelitian	3
1.5. Metode Pengumpulan Data	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
 BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	 6
2.1. Beton.....	6
2.1.1. Kuat Tekan Beton.....	7
2.1.2. Kuat Tarik Beton	8
2.1.3. Modulus Elastisitas Beton.....	8
2.2. <i>Crumb Rubber Concrete</i>	10
2.3. Pengujian Beton.....	15
2.4. Baja Tulangan.....	18
2.4.1. Kuat Tarik Baja Tulangan	18
2.4.2. Modulus Elastisitas Baja Tulangan	20

2.4.3. Jenis Baja Tulangan	20
2.5. Sambungan Balok-Kolom	21
2.6. Tulangan Geser	25
2.7. Beban Siklik	27
2.8. Kurva Histeresis	30
2.9. Daktilitas.....	33
2.10. Kekakuan dan Kekuatan.....	35
2.11. <i>Finite Element Analysis</i>	36
2.11.1. Metode Matriks dalam <i>Finite Element Method</i>	39
2.11.2. Metode Pemecahan Kasus Non-Linier	42
2.11.3. Persamaan Non-Linier untuk Mendapatkan Solusi Model Numerik.....	45
2.12. Program ANSYS	46
2.12.1. Elemen ANSYS	47
2.12.2. Tahapan Simulasi Program ANSYS	48
 BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	 49
3.1. Umum	49
3.2. Studi Literatur.....	49
3.3. Alur Penelitian.....	50
3.4. Bahan Penyusun <i>Crumb Rubber Concrete</i>	51
3.5. Peralatan	55
3.6. Tahapan Penelitian dan Pengujian.....	59
3.7. Jadwal Penelitian	80
 BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	 81
4.1. Hasil Pengujian Material	81
4.1.1. Kadar Lumpur	81
4.1.2. Kadar Zat Organik.....	81
4.1.3. <i>Spesific Gravity</i>	82
4.1.4. Analisis Saringan.....	82
4.1.5. Kadar Air.....	83
4.2. Hasil Pengujian Beton dan Baja Tulangan	83
4.2.1. Pengujian Sifat Mekanik Beton.....	83

4.2.2. Pengujian Sifat Mekanik Baja.....	95
4.3. Pemodelan Struktur	97
4.3.1. Pemodelan Struktur Verifikasi	97
4.3.2. Pemodelan Struktur Variasi Tulangan Geser	100
4.4. Data <i>Input</i>	104
4.4.1. <i>Material Properties</i> Pemodelan Verifikasi	104
4.4.2. <i>Material Properties</i> Pemodelan Variasi Tulangan Geser	104
4.4.3. Pembebanan	106
4.5. <i>Meshing</i> Struktur	106
4.6. Analisis <i>Output</i> Program ANSYS	106
4.6.1. Analisis <i>Output</i> Pemodelan Verifikasi	107
4.6.2. Analisis <i>Output Crumb Rubber Concrete</i>	113
4.7. Perilaku Struktur Sambungan Balok-Kolom Beton Normal (Verifikasi)..	125
4.7.1. Daktilitas	125
4.7.2. Kekakuan dan Kekuatan.....	127
4.7.3. Disipasi Energi Kumulatif.....	128
4.8. Perilaku Struktur Sambungan Balok-Kolom <i>Crumb Rubber Concrete</i> Dengan Variasi Tulangan Geser	130
4.8.1. Daktilitas	130
4.8.2. Kekakuan dan Kekuatan.....	132
4.8.3. Disipasi Energi Kumulatif.....	135
BAB 5 PENUTUP.....	137
5.1. Kesimpulan.....	137
5.2. Saran	138
DAFTAR PUSTAKA	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1. Kurva tegangan-regangan beton akibat beban monotonik.....	7
Gambar 2.2. Kurva tegangan-regangan beton akibat beban siklik (Wight, 2016)	8
Gambar 2.3. Hubungan perlakuan <i>rubber</i> 15% terhadap kuat tekan beton (Youssef, dkk., 2019).....	11
Gambar 2.4. Hubungan perlakuan <i>rubber</i> 20% terhadap kuat tekan beton (Youssef, dkk., 2019).....	11
Gambar 2.5. Hubungan perlakuan <i>rubber</i> 15% terhadap kuat tarik beton (Youssef, dkk., 2019).....	12
Gambar 2.6. Hubungan perlakuan <i>rubber</i> 20% terhadap kuat lentur beton (Youssef, dkk., 2019).....	12
Gambar 2.7. Kuat tekan beton umur 28 hari tanpa perlakuan dan dengan <i>aqua-thermal treatment</i> (Sanjaya, dkk., 2025).....	13
Gambar 2.8. Hubungan antara tegangan dan regangan tarik material baja tulangan (Setiawan, 2013).....	19
Gambar 2.9. Detail bagian kurva tegangan regangan tarik material baja tulangan (Setiawan, 2013).....	19
Gambar 2.10. Kurva tegangan regangan tarik material baja tulangan akibat beban siklik (Mahronic, dkk., 2015).....	20
Gambar 2.11. Tipe sambungan balok-kolom (ACI-ASCE 352, 2002).....	22
Gambar 2.12. Sambungan balok-kolom yang rusak akibat beban gempa (Li dan Sanada, 2016)	23
Gambar 2.13. (a) <i>Detail</i> sambungan balok-kolom eksterior (b) Hasil pengujian perilaku sambungan balok-kolom eksterior (Li dan Sanada, 2016).	24
Gambar 2.14. (a) <i>Detail</i> sambungan balok-kolom eksterior kriteria seismik (b) Hasil pengujian eksperimental (Gao, dkk., 2020).....	24
Gambar 2.15. (a) Sambungan balok-kolom tanpa tulangan geser (b) Sambungan balok-kolom dengan tulangan geser horizontal (Saghafi dan Shariatmadar, 2018)	25
Gambar 2.16. Tulangan geser diagonal (Oinam, dkk., 2019).....	26
Gambar 2.17. Variasi tulangan geser bentuk diagonal (Shen, dkk., 2020).....	26
Gambar 2.18. <i>Set up</i> pengujian (Saghafi dan Shariatmadar, 2018)	27
Gambar 2.19. Riwayat beban siklik (Saghafi dan Shariatmadar, 2018).....	28
Gambar 2.20. Skema pengujian beban (Oinam, dkk., 2019)	28
Gambar 2.21. Riwayat perpindahan beban siklik (Oinam, dkk., 2019).....	29
Gambar 2.22. <i>Set up</i> beban siklik pada ujung kolom (Dehkordi, dkk., 2019).....	29
Gambar 2.23. Riwayat pembebanan siklik (Dehkordi, dkk., 2019).....	30
Gambar 2.24. Kurva histeresis tipikal (Mellodge, 2016).....	31
Gambar 2.25. Kurva histeresis sambungan balok-kolom eksterior dengan variasi tulangan geser (Saghafi dan Shariatmadar, 2018).....	31
Gambar 2.26. (a) Pola keretakan benda uji tanpa tulangan geser (b) Pola keretakan benda uji dengan tulangan geser horizontal (Saghafi dan Shariatmadar, 2018)	32

Gambar 2.27. (a) Kurva histeresis sambungan balok-kolom eksterior dengan tulangan geser diagonal (b) Pola keretakan sampel RC-1 (Oinam, dkk., 2019).....	32
Gambar 2.28. Kurva histeresis sambungan balok-kolom interior beton bertulang (Ketiyot, R., dan Hansapinyo, C., 2018)	33
Gambar 2.29. Parameter penilaian kinerja struktur terhadap batas standar (ACI 374.1-05, 2019 <i>re-approved</i>)	34
Gambar 2.30. Jenis nodal elemen hingga sederhana: (a) Elemen garis dua nodal (b) Elemen dua dimensi sederhana (c) Elemen tiga dimensi sederhana (d) Elemen segitiga dan segiempat <i>axisymmetric</i> (Logan, 2017).....	39
Gambar 2.31. <i>Finite motion</i> dari balok 3D (Zienkiewicz dan Taylor, 2000)	40
Gambar 2.32. Metode Newton-Raphson modifikasi dengan kenaikan tangen awal (Zienkiewicz dan Taylor, 2000)	43
Gambar 2.33. Metode Newton-Raphson modifikasi dengan kenaikan tangen (Zienkiewicz dan Taylor, 2000)	44
Gambar 2.34. <i>Secant method</i> dimulai dari prediksi K^0 (Zienkiewicz dan Taylor, 2000).....	44
Gambar 2.35. Model elemen SOLID65 (ANSYS Inc., 2013)	47
Gambar 2.36. Model elemen SOLID45 (ANSYS Inc., 2013)	47
Gambar 2.37. Model elemen LINK180 (ANSYS Inc., 2013)	48
 Gambar 3.1. Diagram alir (<i>flowchart</i>) metodologi penelitian.....	51
Gambar 3.2. Semen.....	52
Gambar 3.3. Agregat halus.....	52
Gambar 3.4. Agregat kasar.....	53
Gambar 3.5. <i>Crumb rubber</i>	53
Gambar 3.6. Air.....	54
Gambar 3.7. <i>Superplasticizer</i>	54
Gambar 3.8. Baja tulangan.....	55
Gambar 3.9. Neraca Digital	55
Gambar 3.10. Gelas ukur	56
Gambar 3.11. <i>Mixer</i>	56
Gambar 3.12. Cetakan benda uji	57
Gambar 3.13. Cetakan benda uji	57
Gambar 3.14. Alat uji <i>slump</i>	58
Gambar 3.15. <i>Universal testing machine</i>	58
Gambar 3.16. Alat uji kuat tarik belah.....	59
Gambar 3.17. a) <i>Crumb rubber</i> sebelum dipanaskan, b) <i>Crumb rubber</i> setelah dipanaskan	62
Gambar 3.18. Pencampuran material	62
Gambar 3.19. Uji <i>slump</i> beton	63
Gambar 3.20. Pencetakan benda uji	64
Gambar 3.21. <i>Curing</i>	64
Gambar 3.22. <i>Detail</i> model struktur sambungan balok-kolom eksterior (Saghafi dan Shariatmadar, 2018).....	65
Gambar 3.23. <i>Detail</i> variasi tulangan geser sambungan balok-kolom eksterior material CRC	67

Gambar 3.24. <i>Set up</i> uji pembebanan (Saghafi dan Shariatmadar, 2018).....	68
Gambar 3.25. Riwayat pembebanan (Saghafi dan Shariatmadar, 2018)	69
Gambar 3.26. Visualisasi Awal Pemodelan Sambungan Balok-Kolom dalam Tampilan 2D Menggunakan <i>Microsoft Excel</i>	70
Gambar 3.27. Pola Penomoran <i>Node</i> dalam Model Sambungan Balok-Kolom Berdasarkan Arah X, Y, dan Z	71
Gambar 3.28. Penggunaan Perintah N dan NGEN dalam Pembuatan <i>Node</i> secara Otomatis di ANSYS	72
Gambar 3.29. <i>Script</i> Input ANSYS untuk Definisi Tipe Elemen, <i>Material</i> <i>Properties</i> , dan Konstanta Real pada Model Sambungan Balok- Kolom	73
Gambar 3.30. Definisi Material Beton di ANSYS dengan Pendekatan Nonlinier Menggunakan Perintah MP, TB, dan TBDATA	74
Gambar 3.31. Pendefinisian dan Pembuatan Elemen Menggunakan Perintah EN dan ENGEN Berdasarkan <i>Node</i> pada Model Sambungan Balok- Kolom	75
Gambar 3.32. Pemberian Batasan dan Pembebanan <i>Displacement-Controlled</i> pada <i>Node</i> Menggunakan Perintah D di ANSYS	76
Gambar 3.33. Visualisasi Penerapan <i>Boundary Conditions</i> pada Model Sambungan Balok-Kolom di ANSYS	77
Gambar 3.34. Tahap Pembebanan <i>Displacement-Controlled</i> Menggunakan Perintah D untuk <i>Story Drift</i> 6%	78
Gambar 3.35. Kurva Histeresis Hasil Simulasi ANSYS untuk Validasi Model Sambungan Balok-Kolom	79
Gambar 3.36. Pemodelan <i>nodes SOLID65</i> struktur dengan ANSYS	79
Gambar 3.37. Pemodelan <i>element SOLID65</i> struktur dengan ANSYS	80
 Gambar 4.1. Analisis saringan agregat halus	82
Gambar 4.2. Analisis saringan <i>crumb rubber</i>	83
Gambar 4.3. Rata-rata kuat tekan <i>crumb rubber concrete</i>	84
Gambar 4.4. Pengujian kuat tekan <i>crumb rubber concrete</i>	86
Gambar 4.5. Hubungan tegangan-regangan <i>crumb rubber concrete</i>	87
Gambar 4.6. Rata-rata kuat tarik belah <i>crumb rubber concrete</i>	88
Gambar 4.7. Pengujian kuat tarik belah <i>crumb rubber concrete</i>	89
Gambar 4.8. Rata-rata modulus elastisitas <i>crumb rubber concrete</i>	91
Gambar 4.9. Hubungan tegangan-regangan <i>crumb rubber concrete</i> kondisi elastis	91
Gambar 4.10. Rata-rata rasio Poisson <i>crumb rubber concrete</i>	93
Gambar 4.11. Hubungan regangan longitudinal-transversal <i>crumb rubber concrete</i>	93
Gambar 4.12. Hubungan tegangan-regangan baja tulangan	96
Gambar 4.13. <i>Detail</i> pemodelan verifikasi (Saghafi dan Shariatmadar, 2018)	98
Gambar 4.14. <i>Nodes</i> elemen struktur	98
Gambar 4.15. Pemodelan elemen SOLID65 dan SOLID45	99
Gambar 4.16. Pemodelan elemen LINK180 model N1	99
Gambar 4.17. <i>Detail</i> pemodelan variasi tulangan geser	101
Gambar 4.18. Pemodelan elemen LINK180 model C1	102
Gambar 4.19. Pemodelan elemen LINK180 model C2	102

Gambar 4.20. Pemodelan elemen LINK180 model C3	103
Gambar 4.21. Pemodelan elemen LINK180 model C4	103
Gambar 4.22. Kurva tegangan regangan <i>crumb rubber concrete</i>	105
Gambar 4.23. Kurva tegangan regangan baja tulangan polos diameter 10 dan 14	105
Gambar 4.24. Siklus beban siklik	106
Gambar 4.25. Perbandingan kurva histeresis material beton normal	107
Gambar 4.26. Kontur tegangan model N1 <i>drift ratio</i> 4%	110
Gambar 4.27. Kondisi perpindahan model N1 <i>drift ratio</i> 4%	112
Gambar 4.28. Kurva histeresis material <i>crumb rubber concrete</i>	114
Gambar 4.29. Kontur tegangan model C1	117
Gambar 4.30. Kontur tegangan model C2	118
Gambar 4.31. Kontur tegangan model C3	119
Gambar 4.32. Kontur tegangan model C4	120
Gambar 4.33. Kondisi perpindahan model C1	122
Gambar 4.34. Kondisi perpindahan model C2	123
Gambar 4.35. Kondisi perpindahan model C3	124
Gambar 4.36. Kondisi perpindahan model C4	125
Gambar 4.37. Kurva <i>envelope</i> model N1	126
Gambar 4.38. Kurva hubungan kekakuan dan <i>drift ratio</i> model N1	127
Gambar 4.39. Kurva <i>backbone</i> model N1	128
Gambar 4.40. Kurva hubungan disipasi energi kumulatif dan <i>drift ratio</i> model N1	129
Gambar 4.41. Kurva <i>envelope</i> material <i>crumb rubber concrete</i>	131
Gambar 4.42. Kurva hubungan kekakuan dan <i>drift ratio</i> material <i>crumb rubber concrete</i>	133
Gambar 4.43. Kurva <i>backbone</i> material <i>crumb rubber concrete</i>	135
Gambar 4.44. Kurva hubungan disipasi energi kumulatif dan <i>drift ratio</i> material <i>crumb rubber concrete</i>	136

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1. Diameter tulangan polos	21
Tabel 2.2. Diameter tulangan ulir	21
Tabel 2.3. Kategori daktilitas	35
 Tabel 3.1. Komposisi <i>crumb rubber concrete</i> per 1 m ³	 60
Tabel 3.2. Variasi tulangan geser sambungan balok-kolom eksterior material CRC	 66
 Tabel 4.1. Hasil pengujian material	 81
Tabel 4.2. Rata – rata kuat tekan <i>crumb rubber concrete</i>	84
Tabel 4.3. Rata – rata kuat tarik belah <i>crumb rubber concrete</i>	88
Tabel 4.4. Rata – rata modulus elastisitas <i>crumb rubber concrete</i>	90
Tabel 4.5. Rata – rata rasio Poisson <i>crumb rubber concrete</i>	92
Tabel 4.6. Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan	95
Tabel 4.7. Variasi tulangan geser sambungan balok-kolom eksterior	100
Tabel 4.8. <i>Material properties</i> baja tulangan pemodelan verifikasi	104
Tabel 4.9. Selisih nilai beban lateral maksimum dan perpindahan pada eksperimental dan ANSYS	 108
Tabel 4.10. Nilai beban lateral maksimum dan perpindahan variasi tulangan geser	 115
Tabel 4.11. Nilai beban lateral <i>ultimate</i> dan perpindahan <i>ultimate</i> variasi tulangan geser	 116
Tabel 4.12. Daktilitas model N1	126
Tabel 4.13. Penurunan nilai kekakuan struktur N1	128
Tabel 4.14. Disipasi energi kumulatif model N1	129
Tabel 4.15. Daktilitas material <i>crumb rubber concrete</i>	131
Tabel 4.16. Penurunan nilai kekakuan arah pembebanan dorong material <i>crumb rubber concrete</i>	 134
Tabel 4.17. Penurunan nilai kekakuan arah pembebanan tarik material <i>crumb rubber concrete</i>	 134
Tabel 4.18. Disipasi energi kumulatif material <i>crumb rubber concrete</i>	136

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Jadwal Penelitian.....	
2. Perhitungan Modulus Elastisitas.....	
3. Perhitungan Rasio Poisson.....	
4. Lembar Asistensi	
5. Hasil Seminar Ujian Tesis.....	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Wilayah Kepulauan Indonesia berada di pertemuan tiga lempeng utama dunia, yaitu Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia, yang menyebabkan tingginya potensi gempa bumi. Aktivitas gempa ini disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik yang berkelanjutan sehingga secara signifikan mempengaruhi zona sambungan balok-kolom terutama pada bagian eksterior. Menurut Dehkordi, dkk., (2019), stabilitas lateral struktur sangat bergantung pada kekuatan sambungan balok-kolom, baik eksterior maupun interior. Sambungan balok-kolom eksterior menjadi bagian kritis dalam perubahan geometri akibat distribusi beban lateral siklik selama gempa, yang berpotensi menyebabkan pergeseran hingga keruntuhan struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai ketahanan sambungan balok-kolom eksterior terhadap beban lateral siklik untuk memastikan keamanan struktur dalam kondisi gempa.

Keruntuhan struktur pasca-gempa sangat berkaitan dengan kualitas sambungan balok-kolom. Sambungan yang dirancang dengan baik harus memenuhi kriteria kekuatan dan daktilitas untuk menghindari kegagalan akibat gaya geser. Salah satu solusi yang banyak dikaji adalah penambahan tulangan geser atau sengkang pada sambungan balok-kolom guna meningkatkan ketahanannya terhadap beban lateral siklik. Selain aspek desain, pemilihan material beton yang inovatif juga memiliki peran penting dalam meningkatkan performa sambungan struktur. Salah satu material inovatif yang semakin banyak diteliti adalah *crumb rubber concrete* (CRC), yaitu beton yang menggunakan *crumb rubber* sebagai substitusi agregat halus, yang dapat meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan beton terhadap retak akibat gaya siklik.

Indonesia merupakan salah satu produsen karet alam terbesar di dunia, dengan produksi mencapai 3,14 juta ton pada tahun 2022 yang berasal dari lahan seluas 3,67 juta hektar (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2022). Sebagian besar karet alam digunakan sebagai bahan baku pembuatan ban kendaraan dalam industri otomotif. Namun, seiring meningkatnya produksi ban, timbul permasalahan

lingkungan akibat limbah ban bekas. Menurut Alwesabi , dkk., (2021), setiap tahun lebih dari 1 miliar ton ban mencapai akhir masa pakainya, dan jumlah ini diperkirakan meningkat menjadi 1,2 miliar ton pada tahun 2030. Limbah ban ini dapat diolah kembali menjadi *crumb rubber*, yang kemudian digunakan sebagai bahan campuran beton untuk mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi (Ismail , dkk., 2017).

Meskipun penggunaan *crumb rubber* dalam beton menawarkan berbagai keunggulan seperti fleksibilitas dan keberlanjutan, tantangan utama yang dihadapi adalah penurunan kuat tekan akibat lemahnya ikatan antara partikel karet dan matriks semen. Hal ini disebabkan oleh sifat hidrofobik *crumb rubber* serta keberadaan kotoran dan partikel tekstil yang menghambat interaksi dengan pasta semen (Reddy , dkk., 2024; Mohammad , dkk., 2024). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, telah dikembangkan metode perlakuan seperti pencucian air dan pemanasan pada suhu 200°C selama 1,5–2 jam. Perlakuan ini terbukti meningkatkan sifat hidrofilik *crumb rubber*, menghilangkan kontaminan, serta meningkatkan kuat tekan beton hingga 10% (Abd-Elaal , dkk., 2024; Yousf , dkk., 2024). Di sisi lain, peningkatan kadar *crumb rubber* hingga 30% memberikan dampak positif terhadap performa beton dalam kondisi dinamis, yaitu meningkatkan kapasitas serap energi hingga 117%, menunjukkan perilaku plastis yang stabil, kapasitas redaman tinggi, serta respons histeretik yang baik terhadap beban kejutan dan siklik. Karakteristik ini menjadikannya ideal untuk struktur yang memerlukan daktilitas dan deformabilitas tinggi, seperti bangunan tahan gempa maupun elemen pelindung terhadap benturan dan ledakan (He , dkk., 2023).

Kemajuan teknologi telah memungkinkan penelitian terhadap perilaku struktur tidak lagi hanya terbatas pada uji coba eksperimental di laboratorium, tetapi juga melalui analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (*finite element method/FEM*) seperti perangkat lunak ANSYS. Program ANSYS mampu menghasilkan pendekatan numerik sebagai *output* dari analisis yang dilakukan. Atas dasar tersebut penelitian ini akan menganalisis perilaku sambungan balok-kolom eksterior terhadap beban lateral siklik, dengan tiga variasi tulangan geser menggunakan material *crumb rubber concrete* (CRC) yang telah mengalami pencucian dan pemanasan dalam oven. Hasil penelitian ini akan dibandingkan

dalam bentuk kurva histeresis, yang menggambarkan respons struktural sambungan balok-kolom eksterior terhadap beban lateral siklik.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian perilaku sambungan balok-kolom eksterior adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *crumb rubber* sebagai bahan pengganti sebagian agregat halus terhadap sifat mekanik beton?
2. Bagaimana metode analisis perilaku sambungan balok-kolom eksterior *crumb rubber concrete* dengan variasi tulangan geser terhadap beban lateral siklik?
3. Bagaimana hasil analisis perilaku sambungan balok-kolom eksterior *crumb rubber concrete* dengan variasi tulangan geser terhadap beban lateral siklik?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian perilaku sambungan balok-kolom eksterior adalah sebagai berikut:

1. Mengkarakterisasi sifat mekanik *crumb rubber concrete* sebagai data primer dalam melakukan analisis numerik menggunakan ANSYS.
2. Menerapkan dan mengevaluasi metode analisis perilaku sambungan balok-kolom eksterior terhadap beban lateral siklik melalui simulasi numerik ANSYS.
3. Menganalisis dan membandingkan perilaku sambungan balok-kolom eksterior *crumb rubber concrete* dengan variasi tulangan geser terhadap beban lateral siklik.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup pada perilaku sambungan balok-kolom eksterior dibatasi pada:

1. Pedoman tulangan geser yang digunakan pada sambungan balok-kolom sesuai dengan persyaratan seismik ACI 318-19.

2. Peraturan pembebanan siklik yang diterapkan merujuk pada standar ACI 374.1-05.
3. Pemodelan sambungan balok-kolom eksterior pada program ANSYS berupa pemodelan elemen jenis SOLID65 untuk merepresentasikan beton, SOLID45 untuk merepresentasikan pelat baja, dan LINK180 untuk merepresentasikan baja tulangan dengan analisis metode elemen hingga (*finite element method*).
4. Data sekunder diambil dari hasil penelitian eksperimental terdahulu oleh Saghafi dan Shariatmadar (2018) tentang perilaku sambungan balok-kolom eksterior beton bertulang terhadap beban lateral siklik.
5. Data *material properties crumb rubber concrete* dan baja tulangan didapatkan dari penelitian di laboratorium secara langsung yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI).
6. Persentase *crumb rubber* yang digunakan sebagai substitusi agregat halus pada penelitian ini adalah 5% dan 10%.
7. Benda uji *crumb rubber concrete* berbentuk silinder dengan ukuran 15 cm x 30 cm.
8. Pengujian kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas beton dilakukan pada umur beton 28 hari.

1.5. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dapat dilakukan dengan menggunakan dua cara, yaitu:

1. Data primer

Data primer merujuk pada data yang diperoleh melalui penelitian yang dilakukan secara langsung pada suatu objek penelitian. Dalam penelitian ini, data primer diperoleh melalui percobaan, pengamatan, dan pengujian yang dilakukan secara langsung di laboratorium.

2. Data sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari tinjauan pustaka atau literatur yang sudah ada. Dalam penelitian ini, digunakan data sekunder yang terdiri dari sumber referensi seperti jurnal-jurnal yang relevan dengan fokus penelitian.

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tesis ini yaitu meliputi pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, penutup dan daftar pustaka.

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, metode pengumpulan data, serta sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan hasil kajian studi literatur yang dilakukan mengenai teori yang berkaitan dengan sambungan balok-kolom, *finite element method*, pembebanan siklik, *crumb rubber concrete*, pengaruh tulangan geser, dan juga pengujian terdahulu sebagai acuan dalam penelitian ini.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang material dan peralatan yang digunakan dalam penelitian, serta metodologi yang dilakukan dalam penelitian yaitu penelitian *material properties* yang meliputi pengujian bahan penyusun *crumb rubber concrete*, pembuatan benda uji, dan pengujian benda uji, serta analisis numerik meliputi pengumpulan data sekunder, pemodelan elemen struktur pada program ANSYS, dan pembahasan terhadap hasil analisis.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil penelitian dari penelitian *material properties* dan analisis numerik. Hasil pengujian sifat mekanik *crumb rubber concrete* dijadikan sebagai data primer dalam melakukan analisis numerik menggunakan program ANSYS dan *output* yang dihasilkan dari pemodelan elemen struktur pada program ANSYS berupa kurva histeresis yang selanjutnya dilakukan analisis perilaku struktur tersebut.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk perbaikan penelitian di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Abramowitch, S., & Easley, D. (2016). Chapter Four - Introduction to classical mechanics. In L. Hoyte & M. Damaser (Eds.), *Biomechanics of the female pelvic floor* (pp. 89–107). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803228-2.00004-0>
- ACI-ASCE Committee 352. (2002). *Recommendation for design of beam-column connection in monolithic reinforced concrete structures* (ACI 352R-02). American Concrete Institute.
- ACI Committee 318. (2022). *Building code requirements for structural concrete and commentary* (ACI 318-19(22), Re-approved). American Concrete Institute.
- ACI Committee 374. (2019). *Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary* (ACI 374.1-05, Re-approved). American Concrete Institute.
- Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Tayeh, B. A., Sivalingam, S., Rosli, M. F. B., Haruna, S., & Khan, M. I. (2020). Mechanical and deformation properties of rubberized engineered cementitious composite (ECC). *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00385. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00385>
- Ali, M. H. (2018). Finite element analysis is a powerful approach to predictive manufacturing parameters. *Journal of Babylon University*, 26(1).
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Mechanical APDL introductory tutorials*. United States of America.
- ASTM International. (2009). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C39/C39M-05). ASTM International. <https://www.astm.org>
- ASTM International. (2011). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C496/C496M-11). ASTM International. <https://www.astm.org>
- ASTM International. (2010). *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression* (ASTM C469–10). ASTM International. <https://www.astm.org>
- Badshah, M., Badshah, S., & Jan, S. (2020). Comparison of computational fluid dynamics and fluid structure interaction models for the performance prediction of tidal current turbines. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(2), 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.10.001>

- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). Wiley.
- Dehkordi, S.A., Mostofinejad, D., & Alaei, P. (2019). Effects of high-strength reinforcing bars and concrete on seismic behavior of RC beam-column joints. *Engineering Structures*, 183, 702–719. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.040>
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2022). *Program percepatan hilirisasi usaha industri karet*. Dewan Karet Indonesia.
- Alwesabi, E. A. H., Abu Bakar, B. H., Alshaikh, I. M. H., Zeyad, A. M., Altheeb, A., & Alghamdi, H. (2021). Experimental investigation on fracture characteristics of plain and rubberized concrete containing hybrid steel-polypropylene fiber. *Structures*, 33, 4421–4432. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.011>
- El-Mandouh, M. A. (2020). Seismic behavior of HSC eccentric beam-column connections. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(7). <http://www.ijert.org>
- Fauzan, Putri, E. E., Evir, H. P., Agista, G. A., & Juliafad, E. (2023). Experimental investigation on the use of crumb rubber as partial replacement of coarse aggregate in concrete incorporating cement replacement materials. *International Journal of GEOMATE*, 25(111), 246–253. <https://doi.org/10.21660/2023.111.gxi399>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356). Federal Emergency Management Agency.
- Ganesan, N., Nidhi, M., & Indira, P. V. (2015). SFRHPC interior beam-column-slab joints under reverse cyclic loading. *Advances in Concrete Construction*, 3(3), 237–250. <https://doi.org/10.12989/acc.2015.3.3.237>
- Gao, F., Tang, Z., Chen, J., & Others. (2020). Seismic behavior of exterior beam-column joints with high-performance steel rebar: Experimental and numerical investigations. *Advances in Structural Engineering*, 24(1), 3–20. <https://doi.org/10.1177/1369433220942870>
- Ghoniem, A., & Aboul Nour, L. (2024). Experimental investigation into the properties of crumb rubberized concrete incorporating corrugated round steel fibers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24, Article 100. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00883-z>
- Hariandja, B. (2015). *Metode Elemen Hingga*. Universitas Pancasila.
- He, S., Jiang, Z., Chen, H., Chen, Z., Ding, J., Deng, H., & Mosallam, A. S. (2023). Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art review. *Sustainability*, 15(11), 8541.

<https://doi.org/10.3390/su15118541>

- Ismail, M. K., & Hassan, A. A. A. (2017). Shear behaviour of large-scale rubberized concrete beams reinforced with steel fibres. *Construction and Building Materials*, 140, 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.109>
- Jagota, V., Sethi, A. P. S., & Kumar, K. (n.d.). Finite element method: An overview. *Walailak Journal of Science and Technology*, 10 (1), 1-8, <http://wjst.wu.ac.th>
- Ketiyot, R., & Hansapinyo, C. (2018). Seismic performance of interior precast concrete beam-column connections with T-section steel inserts under cyclic loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17, 355–369. <https://doi.org/10.1007/s11803-018-0431-5>
- Kilani, A. J., Ikotun, B. D., & Abdulwahab, R. (2025). Effect of crumb rubber on concrete's and mortar's structural properties: A review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 49, 1037–1067. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01647-8>
- Li, Y., & Sanada, Y. (2016). Structural performance evaluation and strengthening of an earthquake-damaged beam-column joint in Indonesia. *Proceedings of the International Conference on Technology, Innovation and Society*, 357–367. <https://doi.org/10.21063/ICTIS.2016.1057>
- Li, H., Wu, X., Nie, Q., Yu, J., Zhang, L., Wang, Q., & Gao, Q. (2024). Lifetime prediction of damaged or cracked concrete structures: A review. *Structures*, 71, 108095. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108095>
- Lee, S. W., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2018). Seismic behaviour of interior reinforced-concrete beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites. *Magazine of Concrete Research*, 70(24), 1280–1296. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00380>
- Logan, D. L. (2017). *A First Course in the Finite Element Method* (6th ed). Cengage Learning.
- Marohnić, T., Basan, R., & Franulović, M. (2015). Evaluation of the possibility of estimating cyclic stress-strain parameters and curves from monotonic properties of steels. *Procedia Engineering*, 101, 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.02.029>
- Mellodge, P. (2016). Chapter 4 - Characteristics of nonlinear systems. In P. Mellodge (Ed.), *A practical approach to dynamical systems for engineers* (pp. 215–250). Woodhead Publishing.
- Mobin, J. S., Kazemi, M. T., & Attari, N. K. A. (2016). Cyclic behaviour of interior reinforced concrete beam-column connection with self-consolidating concrete. *Structural Concrete*, 17(4), 618–629. <https://doi.org/10.1002/suco.201500133>

- Mohd Nasir, N. A., Bakar, N. B., Safiee, N. A., Aziz, F. N. A. A., & Archnaah, N. (2023). Mechanical properties of blended-rubberized concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2521, 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2521/1/012016>
- Oinam, R. M., Ashwin Kumar, P. C., & Sahoo, D. R. (2019). Cyclic performance of steel fiber-reinforced concrete exterior beam-column joints. *Earthquakes and Structures*, 16(5), 533–546. <https://doi.org/10.12989/eas.2019.16.5.533>
- Paknejadi, A. H., & Behfarnia, K. (2020). Performance of reinforced self-consolidating concrete beam-column joints with headed bars subjected to pseudo-static cyclic loading. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(3), 751–765. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.12.008>
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. Wiley
- Reddy, M. A. K., Akhila, Y., Khed, V. C., Adamu, M., Ibrahim, Y. E., & Tippa, S. (2024). Optimizing the fresh and hardened properties of concrete containing bentonite and crumb rubber using response surface methodology. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 42, 101873. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101873>
- RSNI 2052:2024. *Baja tulangan beton*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Saghafi, M. H., & Shariatmadar, H. (2018). Enhancement of seismic performance of beam-column joint connections using high performance fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 180, 665–680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.221>
- Saghafi, M. H., Shariatmadar, H., & Kheyroddin, A. (2019). Seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composites beam-column connection with high damage tolerance. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13, Article 14. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0344-9>
- Sanjaya, B. G. V., Appuhamy, J. M. R. S., Bandara, W. M. K. R. T. W., Venkatesan, S., & Gravina, R. J. (2025). The potential of recovering design strength of rubberized concrete using aqua-thermally treated crumb rubber at lower replacement ratios. *Construction and Building Materials*, 458, 139627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139627>
- Setiawan, A. (2013). *Perencanaan struktur baja dengan metode LFRD*. Jakarta: Erlangga.
- Shen, X., Li, B., Chen, Y.-T., & Tizani, W. (2021). Seismic performance of reinforced concrete interior beam-column joints with novel reinforcement detail. *Engineering Structures*, 227, 111408. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111408>
- SNI 1729:2020. (2020). *Spesifikasi untuk bangunan baja struktural*. Jakarta:

Departemen Pekerjaan Umum.

SNI 2847:2019. (2019). *Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung*. Bandung: Departemen Pekerjaan Umum.

Tanash, A. O., Abu Bakar, B. H., Muthusamy, K., & AL Biajawi, M. I. (2024). Effect of elevated temperature on mechanical properties of normal strength concrete: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 107, 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.053>

Wanasinghe, D., Aslani, F., & Dai, K. (2021). Effect of age and waste crumb rubber aggregate proportions on flexural characteristics of self-compacting rubberized concrete. *Structural Concrete*, 23(4), 2041–2060. <https://doi.org/10.1002/suco.202000597>

Wang, B., Huo, G., Sun, Y., & Zheng, S. (2019). Hysteretic behavior of steel reinforced concrete columns based on damage analysis. *Applied Sciences*, 9(4), 687. <https://doi.org/10.3390/app9040687>

Wight, J. K. (2022). *Reinforced concrete: Mechanics and design* (8th ed.). Pearson.

Wu, H., Zhuang, X., Zhang, W., & Zhao, Z. (2022). Anisotropic ductile fracture: Experiments, modeling, and numerical simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 833–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.128>

Youssf, O., Hassanli, R., Mills, J. E., Skinner, W., Ma, X., Zhuge, Y., Roychand, R., & Gravina, R. (2019). Influence of mixing procedures, rubber treatment, and fibre additives on Rubcrete performance. *Journal of Composites Science*, 3(2), 41. <https://doi.org/10.3390/jcs3020041>

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2000). *The finite element method: Volume 1, The basis* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2000). *The finite element method: Volume 2, Solid mechanics* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

Zhang, Y., Zheng, Y., Hu, S., & Du, C. (2025). Size effect difference between uniaxial and splitting tensile strength of recycled aggregate concrete considering the maximum aggregate size: Meso-simulation. *Construction and Building Materials*, 462, 139961. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139961>