

**KAJIAN PERILAKU SAMBUNGAN ANGKUR PADA BETON SEBAGAI
MODEL PREDIKSI BERBASIS ANALISIS ELEMEN HINGGA
MENGUNAKAN *ABAQUS CAE***

(Skripsi)

Oleh

**MILDARIEZKA SALSABILA RAMADHAN
NPM 1715011054**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

KAJIAN PERILAKU SAMBUNGAN ANGKUR PADA BETON SEBAGAI MODEL PREDIKSI BERBASIS ANALISIS ELEMEN HINGGA MENGUNAKAN ABAQUS CAE

Oleh

MILDARIEZKA SALSABILA RAMADHAN

Sistem pengangkuran merupakan salah satu cara yang digunakan untuk penyambungan suatu struktur baru dengan struktur eksisting. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui perilaku yang dihasilkan antara model sambungan angkur pada struktur kolom eksisting dengan balok baru menggunakan sistem *adhesive anchoring*, dan model struktur kolom-balok monolit menggunakan program berbasis metode elemen hingga, *Abaqus CAE*. Analisis dilakukan pada dua model, yaitu model struktur monolit dan struktur sambungan angkur. Kedua struktur diberikan beban yang sama di ujung balok. Pada struktur monolit, hubungan interaksi antara kolom-balok menggunakan *tie-constraint*. Sedangkan struktur sambungan angkur, hubungan antara kolom-balok menggunakan *surface-to-surface contact*. Untuk epoksi dimodelkan menggunakan hubungan *cohesive behaviour-contact*. Dari hasil analisis, disimpulkan bahwa sambungan struktur monolit memiliki sifat yang lebih kaku dibandingkan struktur menggunakan sambungan angkur dengan perbedaan nilai displacement antara dua struktur tersebut mencapai 26,2% terhadap struktur monolit. Pola retakan pada struktur monolit berada pada muka kolom di daerah sekitar sambungan, sedangkan pada struktur sambungan angkur pola retakan membentuk kerucut di daerah sekitar angkur kolom.

Kata kunci: angkur, metode elemen hingga, *Abaqus CAE*, pemodelan

ABSTRACT

STUDY OF CONCRETE ANCHOR CONNECTION BEHAVIOUR AS A PREDICTION MODEL BASED ON FINITE ELEMENT ANALYSIS USING ABAQUS CAE

By

MILDARIEZKA SALSABILA RAMADHAN

The anchorage system is one of techniques used to connect a new structure to the existing structure. The intention of this study was to determine the behaviour between the anchorage connection model in the existing column structure and new beam using an adhesive anchoring system, and the monolith column-beam structure model using a program based on finite element method, Abaqus CAE. The analysis was executed on two models, the monolithic construction model and the anchor joint connection structure model. Both models are given the same loads at the ends of the beams. In the monolithic construction model, interaction relationship between column and beam is using a tie-constraint, while for structure of the anchor joint connection were using surface-to-surface contact. Epoxy model in anchor joint structure were using a cohesive behaviour-contact relationship. As the outcome of the analysis, it can be concluded that monolithic construction have stiffer joint compared to the structures with anchor joint connections with the difference of displacement values between the two structures reaching 26.2% to the monolithic construction. The crack pattern in the monolithic construction is in the column face on the area around beam connection, while in the anchor connection, the crack pattern forms a cone in the area around the column anchor.

Keyword: anchor, finite element analysis, Abaqus CAE, modelling

**KAJIAN PERILAKU SAMBUNGAN ANGKUR PADA BETON SEBAGAI
MODEL PREDIKSI BERBASIS ANALISIS ELEMEN HINGGA
MENGUNAKAN *ABAQUS CAE***

Oleh

MILDARIEZKA SALSABILA RAMADHAN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

Judul Skripsi

: **KAJIAN PERILAKU SAMBUNGAN ANGKUR
PADA BETON SEBAGAI MODEL PREDIKSI
BERBASIS ANALISIS ELEMEN HINGGA
MENGUNAKAN *ABAQUS CAE***

Nama Mahasiswa

: **Mildariezka Salsabila Ramadhan**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715011054

Program Studi

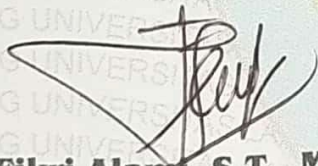
: Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



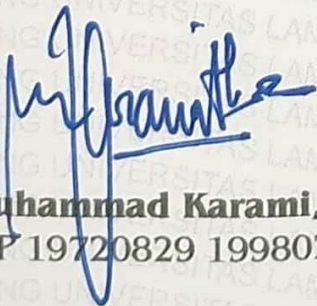
Ir. Fikri Alam, S.T., M.Sc., M.Phil.
NIP 19720308 199802 1 004



Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.
NIP 19721026 200003 1 001

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

3. Ketua Jurusan Teknik Sipil



Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19720829 199802 1 001



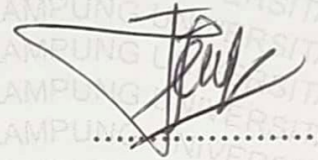
Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.



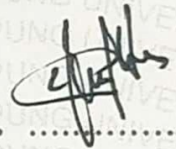
Sekretaris

: Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Ir. Vera A. Noorhidana, S.T., M.T., Ph.D.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. ✓

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 25 November 2022

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi saya yang berjudul "*Kajian Perilaku Sambungan Angkur Pada Beton Sebagai Model Prediksi Berbasis Analisis Elemen Hingga Menggunakan Abaqus CAE*" adalah bagian dari penelitian Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil mengenai perilaku angkur pada sambungan struktur bangunan eksisting dan baru.
2. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
3. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah berlaku di Universitas Lampung.

Bandar Lampung, November 2022

Mengetahui,
Dosen Pembimbing Skripsi



Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.
NIP. 19720308 199802 1 004



Milad Alizka Salsabila Ramadhan
NPM. 1715011054

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, pada tanggal 1 Januari 1999, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Aries Dirgantoro dan Ibu Martika Sari Anom. Penulis memiliki satu orang saudara, yaitu yang bernama Muhammad Ardika Rasyid.

Penulis menempuh pendidikan tingkat dasar di SDN Sukadamai 3 Bogor yang diselesaikan pada tahun 2011, lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMPN 1 Kota Bogor yang diselesaikan pada tahun 2014, dan dilanjutkan ke pendidikan tingkat atas di SMAN 1 Kota Bogor yang diselesaikan pada tahun 2017.

Penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur tes SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada tahun 2017. Selama menjadi mahasiswi, penulis berperan aktif didalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS UNILA) sebagai anggota Departemen Advokasi periode tahun 2018 - 2019. Pada tahun 2020 Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di RT 013, Kelurahan Kencana, Kecamatan Tanah Sareal, Kota Bogor selama 40 hari pada periode II, Juli – Agustus 2020. Dalam pengaplikasian ilmu di bidang Teknik Sipil, penulis juga telah melaksanakan Kerja Praktik di Proyek Renovasi Kantor, Gudang, Dan Pembangunan Prasarana PT. Gudang Garam Tbk Lampung yang berlokasi di Jl. Yos Sudarso No.11, Way Lunik, Kecamatan Teluk Betung Selatan, Kota Bandar Lampung selama 4 bulan sejak akhir bulan Agustus hingga awal bulan Desember 2020.

Selama masa perkuliahan, penulis pernah diangkat menjadi Asisten Dosen mata kuliah Praktikum Hidrolika tahun ajaran 2020/2021, Asisten Dosen mata kuliah

Balok Beton Bertulang dan Pelat dan Kolom Beton Bertulang tahun ajaran 2020/2021, dan Asisten Dosen mata kuliah Mekanika Bahan tahun ajaran 2020/2021 dan 2021/2022 untuk jurusan Teknik Sipil di Universitas Lampung. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul Kajian Perilaku Sambungan Angkur Pada Beton Sebagai Model Prediksi Berbasis Analisis Elemen Hingga Menggunakan *Abaqus CAE*.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil'alamin dengan ridho-Mu ya Allah Akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Semoga dengan terselesainya skripsi ini dapat menjadikanku insan yang berguna dan bermanfaat. Ku persembahkan skripsi ini kepada:

Kedua orangtuaku, Bapak Aries Dirgantoro dan Ibu Martika Sari Anom yang selalu mendoakan, memberikan kasih sayang, dukungan, dan menjadi penyemangat suka maupun duka dari aku kecil hingga aku dapat menyelesaikan perkuliahanku

Adikku tersayang, Muhammad Ardika Rasyid yang selalu menjadi teman, tempat berkeluh kesah, dan penyemangat hingga aku dapat menyelesaikan perkuliahanku

Seluruh keluarga besar Idrus Santri Anom dan Soedarsono yang sudah menjadi tempat bernaung dan penyemangat selama berada di Bandar Lampung sebagai wali orang tuaku di daerah rantauan hingga aku dapat menyelesaikan perkuliahanku

Seluruh dosen yang telah mengajarkan banyak hal. Terima kasih untuk ilmu, pengetahuan dan pelajaran hidup yang sudah diberikan.

Sahabat-sahabatku, Rekan Seperjuangan Teknik Sipil Angkatan 2017, yang selalu menemani dalam suka maupun duka, memberikan semangat, dan pengalaman-pengalaman berharga selama perkuliahanku

Almamaterku Universitas Lampung, Kampus yang selalu aku banggakan dengan penuh kenangan indah selama aku menjadi anak rantau

MOTTO

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi pula kamu menyukai sesuatu padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui sedang kamu tidak mengetahui.”

(QS. Al-Baqarah : 216)

“Yakinlah, ada sesuatu yang menantimu selepas banyak kesabaran yang kau jalani, yang akan membuatmu terpana hingga kau lupa betapa pedihnya rasa sakit”

(Ali bin Abi Thalib)

“In every job that must be done, there is an element of fun”

(Mary Poppins)

“Even miracles take a little time”

(Fairy Godmother, Cinderella)

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis diberikan kemudahan dan kelancaran dalam menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi dengan judul "*Kajian Perilaku Sambungan Angkur Pada Beton Sebagai Model Prediksi Berbasis Analisis Elemen Hingga Menggunakan Abaqus CAE*" adalah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik di Universitas Lampung. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Pembimbing I atas segala waktu, arahan, masukan, bimbingan, dan dukungan dalam hal penyusunan skripsi.
5. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing II atas bimbingan, arahan, dan saran yang diberikan selama proses penyelesaian skripsi.
6. Ibu Vera A. Noorhidana., S.T., M.T., Ph.D, selaku Dosen Penguji yang telah memberi saran, arahan, dan dukungan dalam pengerjaan skripsi.
7. Seluruh dosen Program Studi S1 Teknik Sipil atas semua bekal ilmu pengetahuan yang telah diberikan.

8. Seluruh staf (Mba Putri, Mba Ida, Mba Suci, Mas Kemi) Fakultas Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah banyak membantu dalam proses penyelesaian skripsi khususnya terkait perihal administrasi akademik.
9. Seluruh teknisi dan karyawan di Laboratorium Bahan dan Kontruksi, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, yang telah memberikan bantuan dan bimbingan selama penulis melakukan penelitian.
10. Kedua orangtuaku tercinta, Bapak Aries Dirgantoro dan Ibu Martika Sari Anom, yang selalu menyebut namaku dalam setiap doanya, memberikan nasehat, dukungan, mengajarkanku hal-hal yang Allah cintai, dan selalu menjadi orang yang paling berjasa dalam hidupku.
11. Adikku tersayang, Muhammad Ardika Rasyid, yang selalu aku rindukan dan sayangi, terima kasih atas dukungan yang sudah diberikan.
12. Keluarga besar Idrus Santri Anom dan Soedarsono, yang telah menjadi tempat bernaungku selama merantau di Bandar Lampung. Terima kasih atas kasih sayang kalian sebagai wali pengganti orang tuaku selama berada di Bandar Lampung baik di saat senang maupun sakit.
13. Rekan seperjuanganku dalam menyelesaikan skripsi, Godyna Septania, terima kasih sudah sabar dalam menemani, membantu, dan mengingatkan aku banyak hal selama proses penyelesaian skripsi ini.
14. Rekan satu kos, Zanirah Nuraini, yang selalu menjadi tempat berkeluh kesah terdekotku selama di Bandar Lampung. Terima kasih atas bantuan yang diberikan selama ini, baik ruang, waktu, serta semangat yang diberikan.
15. Sahabat-sahabatku tersayang Basing Group, Goldyna Septania, Evanthe Calosa, Netta Riana, Diana williani Y.K, Corry Jayaputri S, dan Millenia Yessy D, yang sudah menjadi teman, sahabat, dan tempat berbagi cerita selama perkuliahan, sangat senang mengenal kalian semoga persahabatan kita selalu awet sampai kapanpun.
16. Sahabat-sahabatku tersayang Teletubbies, Ica, Una, Yali, terimakasih sudah menjadi sabahatku yang selalu mendukungku, tempat berbagi cerita selama menjalani perkuliahan meski jarak memisahkan kita untuk menuntut ilmu, semoga kebahagiaan selalu bersama kita dan persahabatan ini tak lekang oleh waktu.

17. Keluarga Besar Teknik Sipil Universitas Lampung angkatan 2017, yang selalu berjuang bersama serta berbagi kenangan, pengalaman, dan membuat kesan yang tak terlupakan, terimakasih atas kebersamaan kalian. Sukses selalu untuk kita semua.
18. Seluruh keluarga besar HIMATEKS (Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil) Universitas Lampung yang telah mendukung dalam menyelesaikan skripsi ini.
19. Semua pihak yang telah membantu tanpa pamrih yang tidak dapat disebutkan secara keseluruhan satu per satu, semoga kita semua berhasil menggapai impian.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Besar harapan semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat sebagai sumber informasi dan literatur bagi penulisan karya ilmiah lainnya. Aamiin.

Bandar Lampung, November 2022
Penulis,

Mildariezka Salsabila Ramadhan
NPM 1715011054

**KAJIAN PERILAKU SAMBUNGAN ANGKUR PADA BETON SEBAGAI
MODEL PREDIKSI BERBASIS ANALISIS ELEMEN HINGGA
MENGUNAKAN *ABAQUS CAE***

Oleh

MILDARIEZKA SALSABILA RAMADHAN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan	4
1.4. Batasan Masalah	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Balok Beton Bertulang.....	6
2.2. Angkur	8
2.3. Tipe Keruntuhan pada Angkur.....	13
2.4. Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Analysis</i>)	21
III. METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1. Lokasi Penelitian.....	24
3.2. Metode Numerik	24
3.3. Prosedur Penelitian	25
3.4. Diagram Alir Penelitian	57
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1. Umum	58
4.2. Hasil Uji Model.....	58
4.2.1. Struktur Monolit	58
4.2.2. Struktur Sambungan Kolom Eksisting dan Balok Baru	81
4.3. Perbandingan Struktur Monolit & Struktur Sambungan Angkur	109
4.3.1. <i>Displacement</i>	109
4.3.2. Tegangan (<i>Stress</i>)	111
4.3.3. Regangan (<i>Strain</i>).....	115
4.3.4. Pola Retak.....	115
V. KESIMPULAN DAN SARAN	119
5.1. Kesimpulan	119
5.2. Saran	120

DAFTAR PUSTAKA	ii
Lampiran A (Gambar Kerja)	
Lampiran B (Panjang Penyaluran)	
Lampiran C (Katalog Hilti HIT RE 500 V3)	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Faktor Reduksi Kekuatan (\emptyset) Berdasarkan SNI 2847:2019	8
2.2. Perbedaan Nilai Parameter Kurva Bond Stress-Slip	11
2.3. Spesifikasi Angkur Hilti HIT-RE 500 V3	13
2.4. Rumus Kegagalan Baja Angkur	14
2.5. Rumus Kegagalan Kerucut Beton	15
2.6. Rumus Kegagalan Cabut Angkur atau Kegagalan Lekatan Adhesif.....	18
3.1. Material Properties Beton.....	26
3.2. Material Properties Baja Tulangan dan Angkur	29
3.3. Hasil Perhitungan Parameter Kurva Bond Stress-Slip	30
3.4. Parameter CDP Kuat Tekan Beton.....	42
3.5. Parameter CDP Kuat Tarik Beton	42
4.1. Nilai <i>Load-Displacement</i> yang Terjadi Pada Kolom-Balok Monolit.....	60
4.2. Nilai <i>Stress</i> Terhadap Waktu Pada Sambungan Kolom-Balok	64
4.3. Nilai Kurva <i>Strain-Load</i> Pada Sambungan Monolit	72
4.4. Nilai <i>Load-Displacement</i> Pada Struktur dengan Sambungan Angkur	83
4.5. Pengaruh Beban Terhadap Perubahan Nilai Regangan di Sekitar Angkur .	88
4.6. Perbandingan Gaya Tarik Angkur dengan Parameter Hilti.....	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. RSIA Belleza Kedaton Lampung.	2
1.2. Denah site plan RSIA Belleza Kedaton.....	2
1.3. Daerah yang akan ditambahkan struktur kolom, balok, dan pelat baru.....	3
1.4. Struktur eksisting dan struktur baru.....	4
2.1. Jenis penampang beton dan tulangan baja berdasarkan konsep regangan (Setiawan, 2016).....	6
2.2. Blok tegangan Whitney (Setiawan, 2016),.....	7
2.3. Hubungan bond stress-slip berdasarkan Model Code 2010.	10
2.4. Kegagalan baja angkur.	14
2.5. Kegagalan kerucut beton.	15
2.6. Kegagalan cabut angkur atau kegagalan lekatan adhesif.	18
2.7. Kegagalan belah.....	21
2.8. Geometri elemen hingga (Pranata, 2019).	22
2.9. Perbandingan antara respon tensile load-displacement antara FEA dan eksperimental untuk angkur diameter 6,4 mm (Saeb,2019).	23
2.10. Tipe kegagalan yang didapatkan dari hasil FEA dan eksperimental (Saeb,2019).....	23
3.1. Lokasi RS. Belleza Lampung.	24
3.2. Kurva tegangan-regangan kuat tekan beton (Hognestad, 1951).....	27
3.3. Kurva sress-displacement kuat tarik beton (Hordjik, 1991).....	28
3.4. Kurva tegangan-regangan baja (European Committee for Standardization, 2005).....	29
3.5. Kurva bond stress-slip epoksi (Tang dan Cheng, 2020).....	31
3.6. Nilai momen dan lintang dari program ETABS.	32
3.7. Struktur balok, kolom, dan Angkur yang akan dimodelkan dengan Abaqus CAE.	34
3.8. Model pada program abaqus.....	35
3.9. Model balok dan kolom untuk struktur monolit pada abaqus.	36
3.10. Model balok dan kolom untuk struktur monolit pada abaqus.	36

3.11. Dimensi balok B1.....	37
3.12. Memodelkan <i>part</i> balok	38
3.13. Dimensi kolom K3.....	38
3.14. Memodelkan <i>part</i> kolom.	39
3.15. Memodelkan <i>part</i> tulangan.	40
3.16. Penggabungan <i>part</i> kolom, balok, dan tulangan.	41
3.17. Memasukkan data material yang digunakan.....	44
3.18. Mendefinisikan interaksi antar elemen.	44
3.19. Penempatan titik <i>reference point</i>	45
3.20. Mendefinisikan <i>step</i> pada pemodelan.....	46
3.21. Memilih solusi yang akan ditampilkan setelah proses <i>running</i>	47
3.22. Mendefinisikan tumpuan pada model.....	48
3.23. Mendefinisikan pembebanan pada model.	48
3.24. <i>Mesh module</i> pada elemen.....	49
3.25. Pengaturan <i>job module</i>	50
3.26. Model balok dengan angkur.	51
3.27. Tahapan melubangi elemen.	52
3.28. Model <i>part</i> angkur.....	53
3.29. Mesh pada angkur.....	56
4.1. Titik pengambilan data kurva <i>load-displacement</i>	59
4.2. A) displacement sebelum dibebani, B) displacement setelah dibebani.....	59
4.3. Kurva <i>load-displacement</i> pada model kolom balok monolit.....	60
4.4. Pola retak pada model sambungan kolom balok monolit.....	61
4.5. Titik pengambilan nilai kurva pada muka kolom saat kondisi tarik (panah hitam) dan tekan (panah merah).	63
4.6. Kurva load-stress untuk kondisi tarik dan tekan pada muka kolom daerah sambungan struktur monolit.	63
4.7. Perubahan nilai stress saat beban 0 kN – 4,45 kN.....	65
4.8. Perubahan nilai stress saat beban 7,78 kN – 20,28 kN.....	66
4.9. Perubahan nilai stress saat beban 31,53 kN – 70,63 kN.....	67
4.10. Perubahan nilai stress saat beban 92,86 kN – 137,31 kN.....	68
4.11. Perubahan nilai stress saat beban 159,53 kN – 203,98 kN.....	69
4.12. Perubahan nilai stress saat beban 222,25 kN.....	70

4.13. Pola tegangan pada potongan bagian tengah struktur monolit.	71
4.14. Pola retak pada sambungan kolom-beton monolit.	72
4.15. Kurva <i>strain-load</i> pada sambungan kolom-balok monolit.	72
4.16. Perubahan nilai strain saat beban 0 kN.	73
4.17. Perubahan nilai strain saat beban 2,22 kN - 7,78 kN.	74
4.18. Perubahan nilai strain saat beban 12,78 kN - 31,53 kN.	75
4.19. Perubahan nilai strain saat beban 48,41 kN - 92,86 kN.	76
4.20. Perubahan nilai strain saat beban 115,08 kN - 159,08 kN.	77
4.21. Perubahan nilai strain saat beban 181,76 kN - 222,25 kN.	78
4.22. Pola keretakan pada potongan struktur di 200 mm, 300 mm, dan 400 mm.	80
4.23. <i>Displacement</i> saat struktur diberikan beban maksimum.	82
4.24. Kurva <i>load-displacement</i> pada model sambungan kolom balok dengan angkur.	82
4.25. Visualisasi kegagalan pada keseluruhan model.	84
4.26. Visualisasi kegagalan pada sambungan ankur.	84
4.27. Tegangan yang terjadi pada muka kolom sambungan.	85
4.28. Tegangan yang terjadi pada muka balok sambungan.	86
4.29. <i>Stress</i> yang terjadi pada seluruh model dengan sambungan ankur.	87
4.30. Jarak yang terbentuk pada model dengan sambungan ankur.	87
4.31. Perubahan nilai strain sekitar ankur 1 saat beban 0 kN - 2,22 kN.	89
4.32. Perubahan nilai strain sekitar ankur 1 saat beban 4,45 kN - 12,78 kN.	90
4.33. Perubahan nilai strain sekitar ankur 1 saat beban 20,28 kN - 48,41 kN.	91
4.34. Perubahan nilai strain sekitar ankur 1 saat beban 70,63 kN - 115,08 kN.	92
4.35. Perubahan nilai strain sekitar ankur 1 saat beban 137,31 kN - 181,76 kN.	93
4.36. Perubahan nilai strain sekitar ankur 1 saat beban 203,98 kN - 222,25 kN.	94
4.37. Perubahan nilai strain sekitar ankur 2 saat beban 0 kN - 2,22 kN.	95
4.38. Perubahan nilai strain sekitar ankur 2 saat beban 4,45 kN - 12,78 kN.	96
4.39. Perubahan nilai strain sekitar ankur 2 saat beban 20,28 kN - 48,41 kN.	97
4.40. Perubahan nilai strain sekitar ankur 2 saat beban 70,63 kN - 115,08 kN.	98
4.41. Perubahan nilai strain sekitar ankur 2 saat beban 137,31 kN - 181,76 kN.	99
4.42. Perubahan nilai strain sekitar ankur 2 saat beban 203,98 kN - 222,25 kN.	100
4.43. Perubahan nilai strain sekitar ankur 3 saat beban 0 kN - 2,22 kN.	101

4.44. Perubahan nilai strain sekitar angkur 3 saat beban 4,45 kN - 12,78 kN....	102
4.45. Perubahan nilai strain sekitar angkur 3 saat beban 20,28 kN - 48,41 kN..	103
4.46. Perubahan nilai strain sekitar angkur 3 saat beban 70,63 kN - 115,08 kN.	104
4.47. Perubahan nilai strain sekitar angkur 3 saat beban 137,31 kN - 181,76 kN.	105
4.48. Perubahan nilai strain sekitar angkur 3 saat beban 203,98 kN - 222,25 kN.	106
4.49. Faktor keamanan angkur (Hilti, 2021).	107
4.50. Angkur yang dianalisis untuk mendapatkan nilai stress.	108
4.51. Perbandingan nilai displacement yang terjadi antara struktur monolit dan struktur sambungan dengan angkur.	110
4.52. Tidak terbentuk jarak di sambungan pada struktur monolit.	111
4.53. Jarak yang terbentuk pada struktur sambungan dengan angkur.	111
4.54. Perbandingan stress pada muka kolom di daerah sambungan antar struktur monolit dengan struktur sambungan dengan angkur.	113
4.55. Perbandingan stress pada muka balok daerah sambungan antar struktur monolit dengan struktur sambungan dengan angkur.	114
4.56. Perbandingan retakan yang terjadi pada struktur monolit dan struktur dengan sambungan angkur.	117
4.57. Pola keretakan pada sambungan dengan angkur.	118

I. PENDAHULUAN

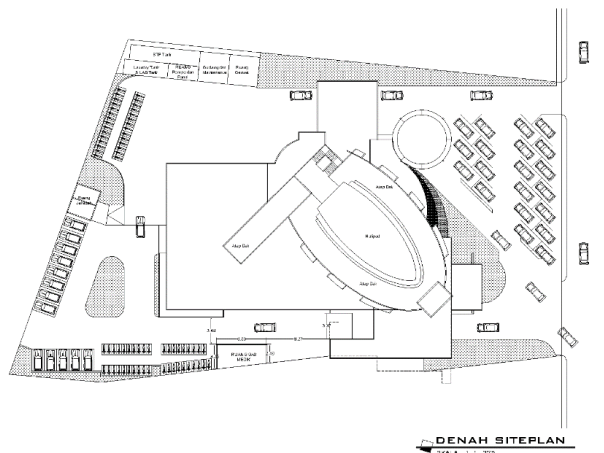
1.1. Latar Belakang

Peningkatan mutu pelayanan kesehatan merupakan bagian dari salah satu tiga pilar utama rencana strategis pembangunan kesehatan periode 2015-2019 yang terus dilaksanakan secara kontinyu sampai saat ini (Misnaniarti, dkk, 2017). Menurut Ridwan dan Saftarina (2015), peningkatan pelayanan akan berbanding lurus dengan tingkat kepuasan dan kesetiaan pasien. Maka dari itu, Rumah Sakit Ibu dan Anak (RSIA) Belleza Kedaton memutuskan untuk melakukan suatu peningkatan terhadap pelayanannya berupa penambahan lantai pada gedung rumah sakit. Penambahan sebagian lantai pada rumah sakit ini direncanakan sebanyak 6 (enam) lantai dimulai dari lantai 3 pada bagian belakang dan samping kanan gedung, sementara gedung yang berada di tengah dan samping kiri sudah berdiri setinggi 6 lantai sejak awal dibangun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.3.

Pada Gambar 1.4 ditunjukkan daerah yang akan dibangun dilakukan pada struktur beton eksisting lantai 3, sehingga struktur seperti balok dan pelat lantai baru akan dihubungkan dengan struktur eksisting tersebut. Untuk menghubungkan struktur baru tersebut, pemasangan angkur mekanik maupun *chemical* merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan. Namun, tantangan yang dihadapi pada permasalahan kali ini yaitu bagaimana cara mendesain sambungan antara bangunan eksisting dengan bangunan baru karena sistem sambungan untuk kondisi seperti ini akan berbeda dengan kondisi apabila struktur dicor secara bersamaan (monolit).



Gambar 1.1. RSIA Belleza Kedaton Lampung.



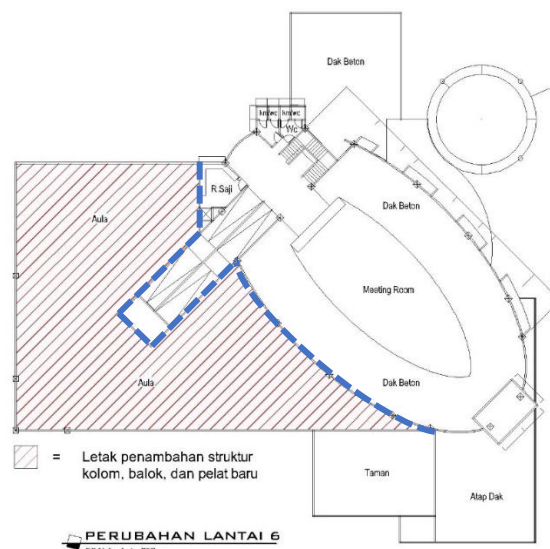
Gambar 1.2. Denah *site plan* RSIA Belleza Kedaton.

Sistem pengankuran merupakan salah satu solusi yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan penyambungan struktur baru dengan struktur eksisting. Angkur merupakan benda yang terbuat dari baja dengan sistem pemasangannya dapat dilakukan sebelum maupun sesudah beton mengeras dengan tujuan untuk menyalurkan beban yang bekerja pada suatu struktur (SNI 2847:2019). Dari berbagai macam jenis angkur, penggunaan angkur *post installed* banyak digunakan dalam dunia konstruksi karena faktor-faktor seperti pemasangan yang mudah dan cepat serta banyaknya variasi yang dapat menyesuaikan dengan kebutuhan di lapangan (Wiguntoro dan Apriyatno, 2020). Angkur jenis ini merupakan angkur dengan sistem *adhesive anchoring*, di mana dalam pemasangannya digunakan zat kimia berupa epoksi untuk

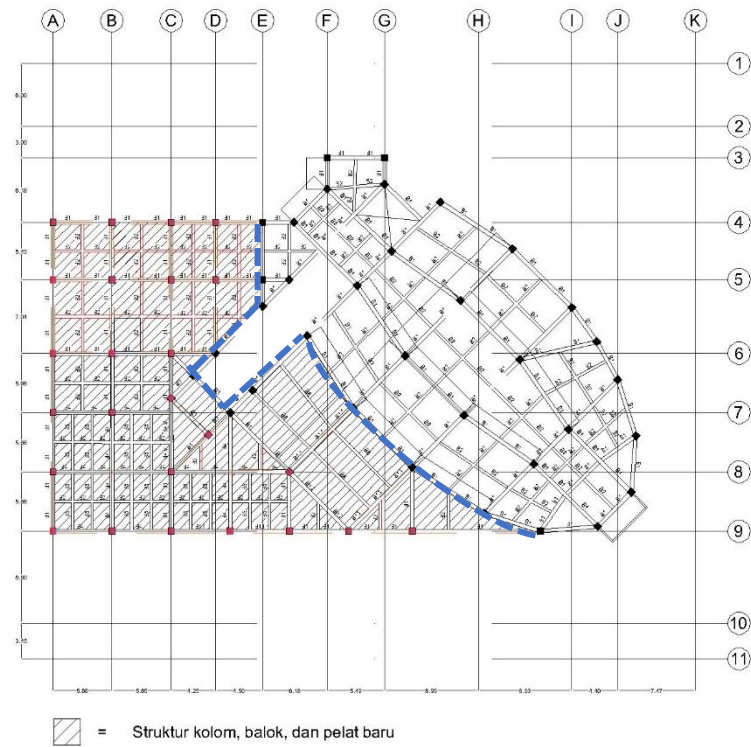
melekatkan angkur pada beton, sehingga angkur jenis ini cocok untuk digunakan sebagai solusi penyambungan antara struktur baru dengan struktur eksisting.

Akibat gaya-gaya yang bekerja, angkur dapat mengalami kegagalan, baik yang diakibatkan oleh gaya tarik maupun gaya geser. Apabila kegagalan diakibatkan oleh gaya tarik, maka akan terjadi keretakan pada beton sehingga dapat mengakibatkan beton hancur dan terangkat serta angkur akan terputus bahkan dapat terlepas dari beton. Sedangkan apabila keruntuhan diakibatkan oleh gaya geser, beton di bagian dalam akan pecah serta angkur akan berdeformasi hingga mencapai titik lelehnya dan putus (Dary, Barus, dan Tarigan, 2014).

Angkur pada penelitian ini terletak pada bidang sambungan antara kolom eksisting dan struktur balok tambahan. Daerah sambungan yang akan diteliti adalah daerah yang ditandai dengan garis putus-putus pada Gambar 1.3. Pada penelitian ini, akan dilakukan analisis terhadap perilaku sambungan menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga untuk mempelajari hal-hal yang akan terjadi saat sambungan diberikan beban ultimit.



Gambar 1.3. Daerah yang akan ditambahkan struktur kolom, balok, dan pelat baru.



Gambar 1.4. Struktur eksisting dan struktur baru.

1.2. Rumusan Masalah

Bedasarkan latar belakang yang telah dijelaskan di atas, permasalahan mengenai perilaku sambungan angkur dengan beton perlu diketahui untuk menganalisa kegagalan apa yang akan terjadi saat beban ultimit diberikan dan perbedaannya dengan sambungan struktur yang dicor secara monolit jika diberikan gaya yang sama. Maka dari itu, rumusan masalah yang diambil adalah “Bagaimana perilaku yang akan dihasilkan oleh model sambungan antara sistem angkur *post installed* pada beton dan sistem sambungan jika struktur di cor secara monolit dengan bantuan program *Abaqus CAE*?”

1.3. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui perbedaan hubungan beban dan deformasi (*load-deformation*) yang terjadi pada sambungan kolom-balok jika struktur dicor secara monolit dengan sambungan menggunakan sistem ankur *post-installed*.
2. Mengetahui perilaku yang terjadi di sambungan berupa perilaku tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada struktur monolit dan struktur sambungan menggunakan ankur.
3. Mengetahui pola retak yang terjadi pada sambungan struktur monolit dan struktur menggunakan ankur.
4. Mengetahui kapasitas ankur yang digunakan pada pemodelan.

1.4. Batasan Masalah

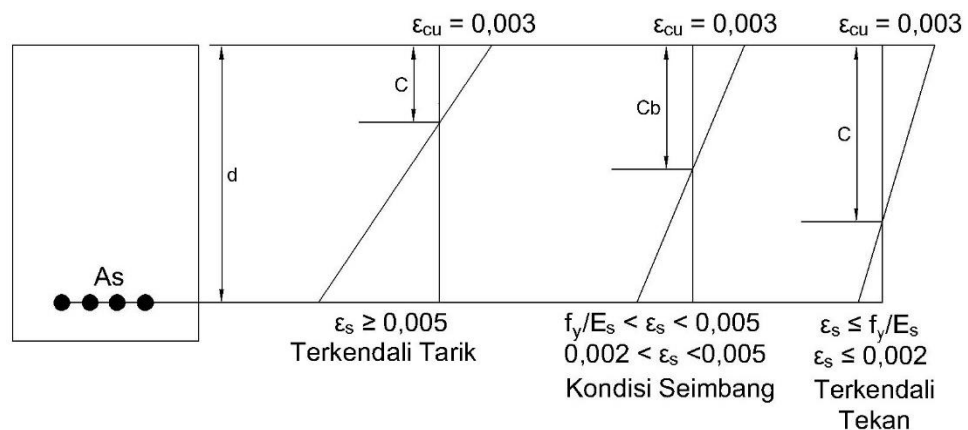
Pada penelitian ini, pembahasan dan masalah dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Sambungan yang akan diteliti adalah sambungan pada daerah kolom dan balok.
2. Panjang balok yang dimodelkan hanya sampai dengan daerah tumpuan.
3. Tipe pemasangan ankur adalah *post installed anchor* dengan sistem *adhesive anchor*.
4. Ankur yang akan digunakan adalah ankur dengan merk dagang HILTI.
5. Analisis elemen hingga dibantu menggunakan *software Abaqus CAE*.
6. Kapasitas yang diperhitungkan hanya kapasitas ankur saja.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Balok Beton Bertulang

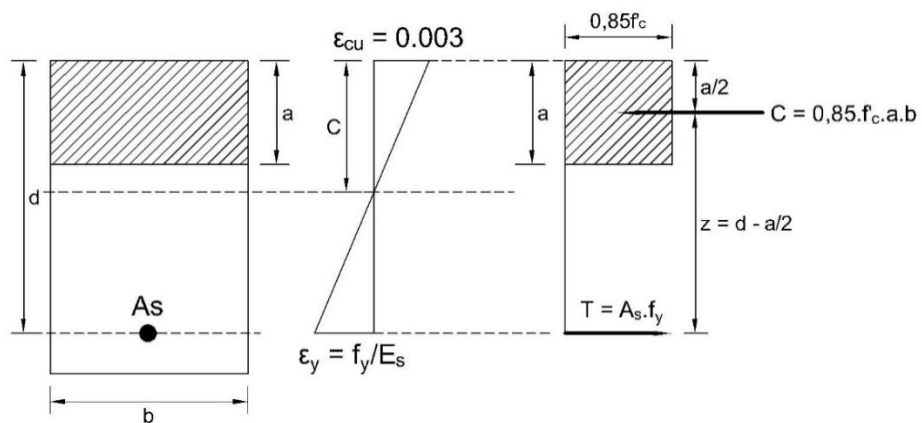
Balok merupakan salah satu elemen terpenting dalam struktur suatu bangunan. Elemen ini mampu menahan lentur maupun geser yang diakibatkan oleh adanya beban yang bekerja pada struktur. Pengaruh dari beban yang bekerja pada balok antara lain terjadinya suatu distribusi tegangan dan regangan serta gaya-gaya dalam pada beton untuk mengimbangi gaya luar yang diberikan. Konsep tegangan dan regangan ini menjadi suatu hal yang penting untuk diperhatikan dalam mendesain suatu balok beton bertulang. Menurut Setiawan (2016), konsep regangan yang terjadi dapat mendefinisikan jenis-jenis penampang yang dapat dibagi menjadi penampang dengan kondisi regangan seimbang, penampang terkendali tekan, dan penampang terkendali tarik yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Jenis penampang beton dan tulangan baja berdasarkan konsep regangan (Setiawan, 2016).

Konsep tegangan dan regangan pada beton dapat dibuat menjadi suatu grafik yang kemudian disederhanakan dan dapat diuraikan dalam bentuk matematika. Penyederhanaan grafik ini dibuat menjadi suatu model blok

tegangan yang disebut sebagai blok tegangan *Whitney* (Setiawan, 2016). Apabila balok diberikan suatu beban secara terus-menerus, maka dapat mengakibatkan kegagalan atau keruntuhan balok karena kapasitas balok tidak cukup kuat untuk menahan beban yang diberikan. Untuk mencegah hal tersebut, dapat diperhitungkan nilai kuat rencana (M_n) pada balok untuk mengetahui bahwa momen yang dihasilkan oleh suatu penampang balok dapat menahan beban yang diberikan. Nilai M_n dapat diterjemahkan dari Gambar 2.2 blok tegangan *Whitney* sebagai persamaan di bawah ini:



Gambar 2.2. Blok tegangan *Whitney* (Setiawan, 2016),

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2.1)$$

Keterangan :

M_n = momen nominal (kNm)

f'_c = mutu beton (MPa)

a = tinggi tekanan tekan dalam blok tegangan *Whitney* (mm)

b = lebar balok (mm)

d = jarak dari serat tekan terluar ke titik berat

A_s = luas tulangan (mm^2)

f_y = mutu baja tulanga (MPa)

Nilai Mn tersebut kemudian dikalikan dengan faktor reduksi (\emptyset) sebesar 0,65 - 0,9 yang dijelaskan pada SNI 2847:2019 seperti pada Tabel 2.1 di bawah.

Tabel 2.1. Faktor Reduksi Kekuatan (\emptyset) Berdasarkan SNI 2847:2019

Regangan Tarik Netto (ϵ_t)	Klasifikasi	\emptyset	
		Jenis Tulangan Spiral sesuai 25.7.3	Tulangan Transfersal Tulangan lainnya
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Tekanan terkontrol	0,75	0,65
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,005$	Transisi	$0,75 + 0,15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	$0,65 + 0,25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$
$\epsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,9	0,9

2.2. Angkur

Menurut SNI 2847-2019, angkur merupakan suatu material baja yang dipasang pada beton untuk menyalurkan beban yang diberikan ke beton. Salah satu jenis angkur yang banyak digunakan adalah angkur tanam pasca cor (*post installed*). Angkur ini dipasang setelah beton di cor dan mengeras (beton eksisting). Angkur jenis ini memiliki keunggulan keleluasaan dalam waktu pemasangannya. Untuk angkur pabrikasi, umumnya spesifikasi sudah ditentukan dari pabrik.

Terdapat beberapa jenis *post installed anchor*, salah satunya adalah *chemical anchor*. *Chemical Anchor* memiliki cara kerja untuk menyalurkan beban melalui lekatan yang berbahan *adhesive* ke beton. Perekat *adhesive* ini merupakan suatu campuran zat kimia yang ditujukan untuk meningkatkan kekuatan dan tahan terhadap kondisi yang lembab maupun basah. Angkur ini memiliki metode pemasangan dengan cara melubangi dan membersihkan bagian struktur yang akan dipasang angkur sehingga terjadi sebuah *interlocking* antara pasta perekat, angkur dan material beton itu sendiri. Menurut SNI 2847:201 Pasal R17.1.2, umumnya kuat tekan beton tidak

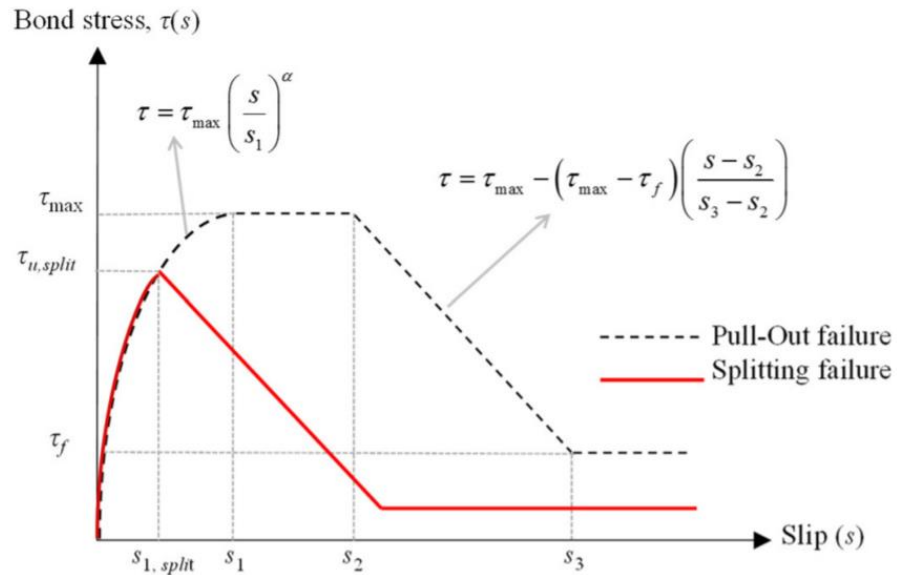
terlalu memengaruhi kuat lekatnya dengan kinerja angkur dapat dipastikan pada beton dengan umur minimal 21 hari.

1. Lekatan (*bond*)

Chemical anchor disebut juga sebagai *adhesive anchor* atau *bonded anchor*, dengan pasta perekat yang biasa disebut sebagai mortar yang berbahan resin *epoxy* maupun *vinylester*. Hal yang diperhatikan dari suatu perekat ini adalah daya rekatnya. Rekatan terjadi karena adanya beberapa gaya yang bekerja pada permukaan tulangan, gaya-gaya tersebut antara lain gaya adhesi antara beton dan tulangan, gaya friksi antara permukaan dan tulangan dengan beton, dan gaya tumpu pada gerigi (*rib*) dari tulangan terhadap beton. Menurut Huda (2020), daya rekat antara material baja dan beton merupakan gaya luar yang akan ditahan bersama, sehingga dibutuhkan daya rekat (*bonding*) yang cukup untuk mencegah terjadinya slip atau gelincir.

Mekanisme kerja rekatan (*bond*) antara tulangan polos dan tulangan ulir berbeda. Pada tulangan polos, rekatan dibentuk oleh adanya adhesi dan friksi hingga mencapai beban maksimumnya. Setelah mencapai beban maksimum, adhesi akan rusak, sehingga rekatan hanya akan ditahan oleh friksi. Akibat dari hal ini, kapasitas rekatan pada tulangan polos akan berkurang seiring berkurangnya daerah kontak akibat slip yang terjadi. Sedangkan pada tulangan ulir, rekatan dibentuk oleh adanya adhesi, friksi, dan yang mendominasi adalah adanya *interlocking* antara tulangan dengan material beton. Bentuk profil tulangan ulir akan memperkecil adhesi dan friksi.

Kemampuan lekatan dan slip dapat digambarkan dalam suatu kurva tegangan rekatan-slip. Kurva pada Gambar 2.3 merupakan kurva tegangan rekatan-slip berdasarkan model Model Code 2010 (MC10) akibat *pullout* dan *splitting* (Sajedi dan Huang, 2017).



Gambar 2.3. Hubungan *bond stress-slip* berdasarkan Model Code 2010.

Dari model di atas, diketahui bahwa kegagalan pada bond stress dapat berupa kegagalan *pullout* dan kegagalan *split*. Dari grafik keruntuhan *pullout*, fase pertama, nilai *bond stress* meningkat hingga mencapai ultimit (τ_u) saat nilai slip (s) kurang dari sama dengan s_1 ($s < s_1$). Pada fase ke 2, nilai slip meningkat ($s_1 < s < s_2$) sedangkan nilai *bond stress* konstan $\tau = \tau_u$. Fase ke 3, nilai *bond stress* mengalami penurunan secara linear saat s_2 hingga s_3 , penurunan ini dikarenakan penurunan kemampuan friksi antara tulangan dengan beton. Fungsi dari fase-fase yang telah dijelaskan di atas dapat dituliskan menjadi:

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_u \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & \text{saat } 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau = \tau_u & \text{saat } s_1 < s \leq s_2 \\ \tau = \tau_u - (\tau_u - \tau_f) \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2}\right) & \text{saat } s_2 < s \leq s_3 \\ \tau = \tau_f & \text{saat } s_3 < s \end{cases} \quad (2.2)$$

Keterangan:

τ_s = Bond stress (MPa)

τ_u = Bond stress ultimit (MPa)

- τ_f = Residual bond stress (MPa)
 s = slip (mm)
 s_1 = slip saat awal ultimit bond stress
 s_2 = slip saat akhir ultimit bond stress
 s_3 = slip saat awal residual bond stress
 α = *curve fitting parameter*

Pengembangan dan penelitian lebih lanjut secara eksperimental dilakukan oleh Tang dan Cheng (2020) terhadap model kurva di atas. Dari hasil penelitian tersebut, didapatkan adanya perbedaan nilai-nilai parameter antara model MC10 dengan model Tang dan Cheng (2020). Perbedaan tersebut dijelaskan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Perbedaan Nilai Parameter Kurva Bond *Stress-Slip*

Parameter	Model Code 2010 (MC10)	Tang dan Cheng (2020)
s_1	1 mm	Persamaan 2.3
s_2	3 mm	3 mm
s_3	Jarak antar rusuk tulangan	Jarak antar rusuk tulangan
α	0,4	0,3
τ_u	$2,5\sqrt{f'c}$	Persamaan 2.4
τ_f	$0,4\tau_u$	$0,4\tau_u$

Perbedaan nilai ini terdapat pada parameter s_1 , α , dan τ_u . Pada parameter s_1 , nilai pada MC10 adalah sebesar 1 mm, sedangkan menurut Tang dan Cheng, nilai parameter tersebut dijelaskan pada persamaan :

$$s_1 = s_3(0,025685s_3 - 0,04244d_b + 0,566648) \quad (2.3)$$

Dari persamaan di atas, nilai s_1 dipengaruhi oleh nilai s_3 . S_3 merupakan jarak antar rusuk dari tiap tulangan. Jarak rusuk antar tulangan ini diatur dalam *British Standard* (BS) 4449:2005 pasal 7.4.2.1, yaitu sebesar 0,4d sampai 1,2d dengan d adalah diameter. Perbedaan nilai parameter juga terjadi pada nilai ultimit *bond stress*. Menurut MC10, persamaan nilai ultimit bond stress (τ_u) adalah $2,5\sqrt{f'_c}$ sedangkan menurut penelitian Tang dan Cheng, nilai τ_u dipengaruhi oleh selimut beton (c) dan diameter tulangan yang digunakan. Nilai τ_u dijelaskan pada persamaan:

$$\tau_u = 0,384702f'_c - 1,73018d_b - 7,40325 \frac{c}{d_b} + 65,90284 \quad (2.4)$$

2. Hilti HIT-RE 500 V3 mortar wih rebar (as anchor)

Hilti HIT-RE 500 V3 merupakan salah satu produk *chemical anchor* yang dikeluarkan oleh perusahaan Hilti. Menurut *Hilti Anchor Factoring Technology Manual* tahun 2019, produk ini merupakan produk angkur dengan *epoxy* berupa mortar yang didesain untuk material beton dengan kondisi kering maupun basah dan dengan pembebanan statik maupun dinamik. Hilti HIT-RE V3 sudah tersertifikasi oleh *European Technical Assessment* menggunakan standar Eropa (ETAG).

Hilti HIT-RE V3 dapat bekerja pada beton dengan mutu 25 MPa – 60 MPa dengan diameter angkur yang digunakan adalah sebesar Ø8 – Ø40. Kekuatan dari angkur ini dipengaruhi oleh sistem pengeboran yang digunakan, antara lain *hammer drilling* dan *diamond coring*. Dalam *Hilti Anchor Fastening Technology Manual* tahun 2019, sudah tertera spesifikasi produk yang dapat digunakan sebagai variabel penting dalam perhitungan angkur seperti kedalaman efektif angkur, ketebalan minimum beton, nilai minum spasi, dan lain sebagainya yang diterangkan pada Tabel 2.3 di bawah.

Tabel 2.3. Spesifikasi Angkur Hilti HIT-RE 500 V3

Diameter Angkur	Ø8	Ø10	Ø12	Ø14	Ø16	Ø20	Ø25	Ø28	Ø30	Ø32	Ø36	Ø40	
d0 (mm)	10 12	12 14	14	16	18	20	25	30 32	35	37	40	45	55
Hef, min (mm)	60	60	70	70	75	80	90	100	112	120	128	144	160
Hef,max (mm)	160	200	240	240	280	320	400	500	560	600	640	720	800
Hmin	Hef + 30 mm ≥ 100 mm						Hef + 2 d0						
Smin (mm)	40	50	60	60	70	80	100	125	140	150	160	180	200
Cmin (mm)	40	45	45	45	50	50	65	70	75	80	80	180	200
Scr,sp (mm)	2 Ccr,sp												
Ccr,sp (mm)	1,0 hef ; untuk $h/hef \geq 2$ 4,6 hef – 1,8 h ; untuk $2,0 > h/hef > 1,3$ 2,26 hef ; untuk $h/hef \leq 1,3$												
Scr,N (mm)	2 Ccr,N												
Ccr,N (mm)	1,5 hef												

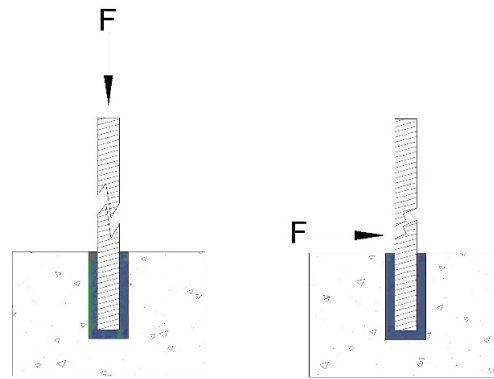
(Sumber : Hilti Anchor Fastening Technical Manual)

2.3. Tipe Keruntuhan pada Angkur

Pada *bonded anchor*, kegagalan yang dialami umumnya dikarenakan gaya tarik maupun gaya geser. Terdapat 5 kegagalan utama pada angkur akibat gaya-gaya tersebut, yaitu:

1. Kegagalan baja angkur (*steel failure*)

Pada tipe kegagalan ini, angkur tidak mampu menahan tegangan ultimit yang diberikan sehingga menyebabkan angkur putus. Faktor yang mempengaruhi kegagalan ini antara lain kekuatan tarik maupun geser dari angkur tersebut dan luas penampang dari angkur yang digunakan (Alhaidary dan Al-Tamimi, 2021). Kegagalan baja angkur dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Kegagalan baja angkur.

Kegagalan baja angkur (*steel failure*) untuk kondisi tarik dapat diperhitungkan dengan rumus pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Rumus Kegagalan Baja Angkur

	SNI 2847-2019 (ACI 318-14)	ETAG 001 Annex C
Tarik	$N_{sa} = A_{se,N} \cdot f_{uta}$	$N_{RK,s} = A_s \cdot f_{uk}$

Keterangan :

N_{sa} = kekuatan nominal angkur dalam tarik (N)

$A_{se,N}$ = luas penampang efektif angkur dalam tarik (mm^2)

f_{uta} = kuat nominal angkur baja dalam keadaan tarik (MPa)

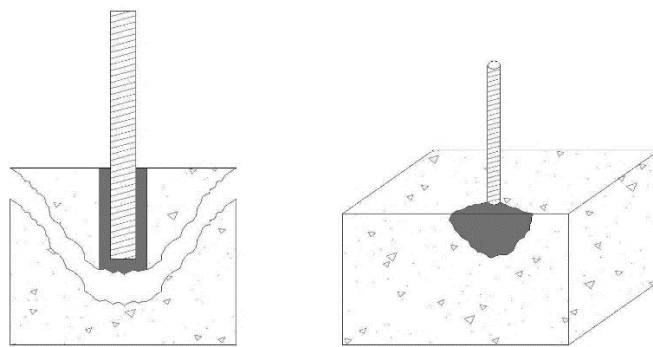
f_{uk} = kuat tarik karakteristik ultimate baja

Nilai f_{uta} tidak boleh diambil lebih besar dari yang terkecil dari $1,9f_{ya}$ dan 860 MPa.

2. Kegagalan kerucut beton (*concrete-cone failure*)

Kegagalan ini merupakan kegagalan yang paling umum terjadi pada angkur, yaitu terbentuknya kerucut beton disekitar angkur seperti terlihat di Gambar 2.5. Kegagalan ini dapat diakibatkan oleh sifat-sifat beton itu

sendiri maupun kedalaman tertanam angkur (h_{ef}). Kedalaman efektif angkur umumnya berkisar antara $3d - 5d$ untuk *bonded anchor* agar kegagalan ini tidak terjadi (Alhaidary dan Al-Tamimi, 2021). Sudut yang terbentuk tidak seragam disetiap kegagalan, yaitu berkisar antara $30-40^\circ$ dengan rata-rata sudut yang terbentuk adalah sekitar 35° . Seiring bertambahnya kedalaman tertanam (h_{ef}), maka kegagalan yang terbentuk bukan hanya kegagalan *concrete-cone* tapi juga kegagalan campuran, yaitu antara kegagalan *concrete-cone* dan kegagalan lekatan (*bond*) serta sudut yang terbentuk akan semakin besar.



Gambar 2.5. Kegagalan kerucut beton.

Kegagalan kerucut beton (*concrete-cone failure*) untuk kondisi akibat tarik dapat diperhitungkan dengan rumus pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Rumus Kegagalan Kerucut Beton

SNI 2847-2019 (ACI 318-14)	ETAG 001 Annex C
Tarik 1) Angkur tunggal: $N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b$ $A_{nco} = 9h_{ef}^2$ $N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f_c'} h_{ef}^{1,5}$	$N_{RK,c} = N_{RK,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \Psi_{s,N} \Psi_{re,N} \Psi_{ec,N}$ $N_{RK,c}^0 = k_1 \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1,5}$

Tabel 2.5. (lanjutan)

SNI 2847-2019 (ACI 318-14)	ETAG 001 Annex C
2) Angkur Kelompok	
$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ec,N} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b$	

Keterangan:

N_{cb} = kekuatan nominal *break out* beton dalam tarik

K_c = 7 untuk angkur tanam pasca cor

λ_a = $0,6\lambda$, dengan nilai $\lambda = 1$ untuk beton normal

h_{ef} = panjang penanaman efektif angkur

Penjelasan untuk masing-masing variabel di atas menurut SNI 2847:2019 (ACI 318-14) yaitu:

a. Ψ_{ec} merupakan faktor modifikasi untuk angkur yang dibebani secara eksentris (e'_N). Nilai ini dihitung sebagai berikut:

$$\Psi_{ec,N} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2e'_N}{3h_{ef}}\right)} \leq 1 ; \text{ untuk kondisi tarik} \quad (2.5)$$

b. Ψ_{ed} adalah faktor modifikasi pengaruh tepi. Pada kondisi tarik, faktor modifikasi ini didasari pada nilai jarak minimum dari pusat batang angkur ke tepi beton ($c_{a,min}$) dengan kedalaman tertanam efektif angkur (h_{ef}). Sedangkan pada kondisi geser, hal ini didasari pada nilai c_{a1} dan c_{a2} :

- Kondisi tarik

$$1) \text{ Jika } c_{a,min} \geq 1,5h_{ef} \text{ maka } \Psi_{ed,N} = 1,0 \quad (2.6)$$

$$2) \text{ Jika } c_{a,min} < 1,5h_{ef} \text{ maka } \Psi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{c_{a,min}}{1,5h_{ef}} \quad (2.7)$$

c. Ψ_c memiliki nilai 1,4 untuk angkur pasca cor pada beton tak retak baik pada keadaan tarik dan geser.

d. $\Psi_{cp,N}$ adalah faktor modifikasi untuk mengontrol pembelahan beton tanpa menggunakan tulangan tambahan. Hal ini didasari pada nilai jarak kritis (c_{ac}) untuk angkur adhesif harus sebesar lebih dari $2h_{ef}$.

$$1) \text{ Jika } c_{a,min} \geq c_{ac} \text{ maka } \Psi_{cp,N} = 1,0 \quad (2.8)$$

$$2) \text{ Jika } c_{a,min} < c_{ac} \text{ maka } \Psi_{cp,N} = \frac{c_{a,min}}{c_{ac}} \geq \frac{1,5h_{ef}}{c_{ac}} \quad (2.9)$$

Dengan asumsi bahwa kegagalan ini dapat dipenuhi jika nilai $c_{a,min}$ adalah sebesar $1,5h_{ef}$.

Penjelasan untuk masing-masing variabel di atas menurut *ETAG 001 Annex C* yaitu:

a. $\Psi_{s,N}$ merupakan faktor gangguan distribusi tegangan pada beton yang diakibatkan oleh jarak tepi komponen struktur. Nilai ini ditunjukkan pada persamaan:

$$\Psi_{s,N} = 0,7 + 0,3 \frac{c}{c_{cr,N}} \leq 1 \quad (2.10)$$

Dengan nilai yang disarankan adalah $s_{cr,N} = 2c_{cr,N} = 3h_{ef}$.

b. $\Psi_{re,N}$ merupakan *shell spalling factor* yang ditunjukkan pada persamaan:

$$\Psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1 \quad (2.11)$$

c. $\Psi_{ec,N}$ merupakan faktor yang diakibatkan oleh perbedaan pembebanan tarik pada angkur. Nilai ini ditunjukkan pada persamaan:

$$\Psi_{ec,N} = \frac{1}{1 + \frac{2e_N}{s_{cr,N}}} \leq 1 \quad (2.12)$$

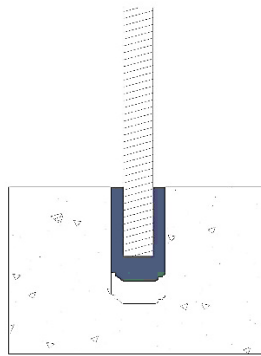
d. Nilai k_1 untuk persamaan di atas adalah sebesar $k_1 = 1,7$ untuk beton retak dan $k_1 = 2,4$ untuk beton tidak retak. Nilai α dan β dijelaskan pada persamaan di bawah:

$$\alpha = 0,1 \left(\frac{l_f}{c_1} \right)^{0,5} \text{ dan } \beta = 0,1 \left(\frac{d_{nom}}{c_1} \right)^{0,2} \quad (2.13)$$

e. $\Psi_{re,N}$ merupakan faktor yang diakibatkan oleh tipe-tipe *reinforcement* yang digunakan pada beton. $\Psi_{re,N}$ bernilai sama dengan 1,0 dalam keadaan angkur pada beton tidak retak dan angkur pada beton retak tanpa *reinforcement* pada tepi nya.

3. Kegagalan cabut – kegagalan lekatan angkur adhesif

Kegagalan ini mengakibatkan angkur tertarik keluar dari lubang bor dengan beton mengalami kerusakan ataupun tidak. Hal ini diakibatkan oleh mekanisme friksi yang terjadi antara antara zat perekat dengan angkur lebih kecil dibandingkan zat perekat dengan beton. Maka dari itu, kualitas dari zat perekat perlu diperhitungkan. Kegagalan ini dapat dilihat seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Kegagalan cabut angkur atau kegagalan lekatan adhesif.

Kegagalan cabut angkur atau kegagalan lekatan adhesif untuk kondisi akibat tarik dapat diperhitungkan dengan rumus pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Rumus Kegagalan Cabut Angkur atau Kegagalan Lekatan Adhesif

SNI 2847-2019 (ACI 318-14)	Eurocode 2 part 4
Tarik 1) Angkur tunggal: $N_a = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \Psi_{ed,Na} \Psi_{cp,Na} N_{ba}$ $A_{Na0} = (2c_{Na})^2$ $N_{ba} = \lambda_a \tau_{cr} \pi d_a h_{ef}$ $c_{Na} = 10d_a \sqrt{\frac{\tau_{uncr}}{7,6}}$	$N_{Rk,p} =$ $N_{Rk,p}^0 \frac{A_{p,N}}{A_{p,N}^0} \Psi_{g,Np} \Psi_{s,Np} \Psi_{re,N} \Psi_{ec,Np}$ $N_{Rk,p}^0 = \tau_{Rk} \pi d h_{ef}$

Tabel 2.6. (lanjutan)

SNI 2847-2019 (ACI 318-14)	Eurocode 2 part 4
2) Angkur kelompok:	
$N_{ag} = \frac{A_{Na}}{A_{Na0}} \Psi_{ec,Na} \Psi_{ed,Na} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,Na} \Gamma$	

Keterangan:

N_{ba} = kekuatan lekatan dasar angkur adhesif tunggal dalam tarik pada beton retak

c_{ac} = jarak tepi kritis minimal untuk angkur adhesif, 2hef

Penjelasan untuk masing-masing dari variabel di atas menurut SNI 2847:2019 (ACI 318-14) yaitu:

a. $\Psi_{ec,Na}$ merupakan faktor modifikasi untuk angkur yang dibebani secara eksentris (e'_N). Nilai ini dihitung sebagai berikut:

$$\Psi_{ec,Na} = \frac{1}{\left(1 + \frac{e'_N}{c_{NA}}\right)} \leq 1 \quad (2.14)$$

b. $\Psi_{ed,Na}$ adalah faktor modifikasi untuk pengaruh tepi untuk angkur yang dibebani tarik. Nilai ini didasarkan pada nilai $c_{a,min}$ dan c_{an} , maka dari itu:

$$1) \text{ Jika } c_{a,min} \geq c_{an}, \text{ maka } \Psi_{ed,Na} = 1,0 \quad (2.15)$$

$$2) \text{ Jika } c_{a,min} < c_{an}, \text{ maka } \Psi_{ed,Na} = 0,7 + 0,3 \frac{c_{a,min}}{c_{NA}} \quad (2.16)$$

c. $\Psi_{cp,Na}$ adalah faktor modifikasi untuk angkur adhesif yang didesain untuk angkur tak retak tanpa tulangan tambahan untuk mengontrol belah beton. Nilai $\Psi_{cp,Na}$ didasarkan pada nilai:

$$1) \text{ Jika } c_{a,min} \geq c_{ac} \text{ maka } \Psi_{cp,Na} = 1,0 \quad (2.17)$$

$$2) \text{ Jika } c_{a,min} < c_{ac}, \text{ maka } \Psi_{cp,Na} = \frac{c_{a,min}}{c_{ac}} \geq \frac{c_{Na}}{c_{ac}} \quad (2.18)$$

Penjelasan untuk masing-masing dari variabel di atas menurut *EN 1992 Part 4* yaitu:

- a. $\Psi_{g,Np}$ adalah faktor yang diakibatkan oleh spasi kelompok angkur yang berdekatan. Nilai $\Psi_{g,Np}$ diberikan pada persamaan:

$$\Psi_{g,Np} = \Psi_{g,Np}^0 - \left(\frac{s}{s_{cr,Np}} \right)^{0,5} (\Psi_{g,Np}^0 - 1) \geq 1 \quad (2.19)$$

Dengan nilai :

$$\Psi_{g,Np}^0 = \sqrt{n} - (\sqrt{n} - 1) \left(\frac{\tau_{Rk}}{\tau_{Rk,c}} \right)^{1,5} \geq 1 \quad (2.20)$$

$$\tau_{Rk,c} = \frac{k_8}{\pi d} \sqrt{h_{ef} f_{ck}} \quad (2.21)$$

Dengan nilai k_8 adalah sebesar $k_8 = 7,7$ untuk beton retak dan $k_8 = 11,0$ untuk beton tidak retak.

- b. $\Psi_{s,Np}$ adalah faktor yang diakibatkan oleh gangguan distribusi tegangan pada beton diakarenakan dekatnya jarak tepi angkur.

$$\Psi_{s,Np} = 0,7 + 0,3 \frac{c}{c_{cr,Np}} \leq 1 \quad (2.22)$$

- c. $\Psi_{re,N}$ adalah faktor *shell spalling factor* dipakai ketika $h_{ef} < 100$ mm

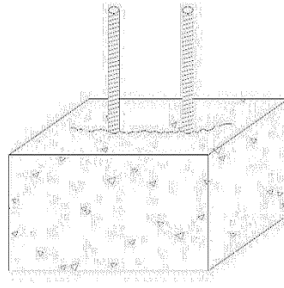
$$\Psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1 \quad (2.23)$$

- d. $\Psi_{ec,Np}$ adalah faktor yang diakibatkan perbedaan pembebanan (eksentrisitas) tarik pada angkur tunggal dari suatu kelompok.

$$\Psi_{ec,Np} = \frac{1}{1 + \frac{2e_N}{s_{cr,Np}}} \leq 1 \quad (2.24)$$

4. Kegagalan belah pada beton (*splitting of the concrete*)

Kegagalan ini diakibatkan oleh jarak atau spasi yang tidak sesuai dengan persyaratan antara tepi beton dengan angkur maupun jarak antar angkur. Kegagalan ini dapat mengakibatkan keretakan yang merambat sehingga mengakibatkan penurunan kekuatan angkur.



Gambar 2.7. Kegagalan belah.

Beberapa syarat yang dianjurkan menurut SNI 2847-2019 (ACI 318-14) antara lain:

- a. Spasi minimum pusat ke pusat angkur adalah sebesar $6d_a$ untuk angkur pasca cor.
- b. Jarak tepi minimum untuk angkur tanam pasca cor harus lebih besar dari selimut beton atau sekitar $6d_a$.
- c. Jarak tepi kritis (c_{ac}) minimum untuk angkur pasca cor adalah sebesar $2h_{ef}$.
- d. Nilai $c_{a,min}$ adalah sebesar $1,5h_{ef}$.

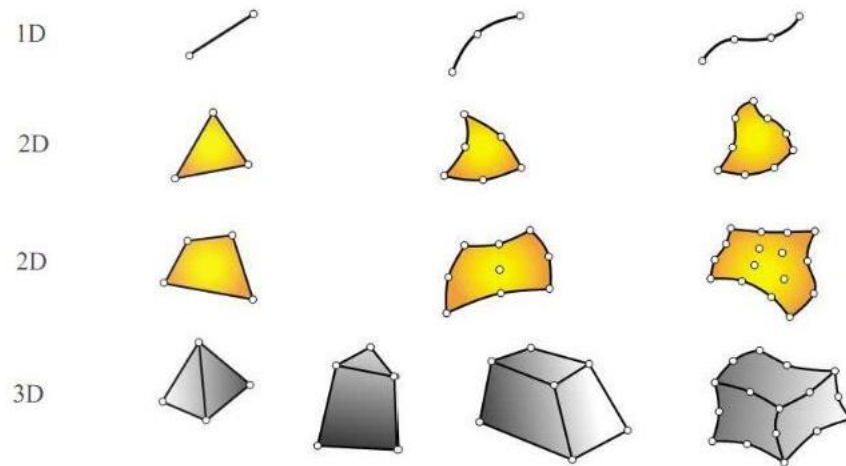
Sedangkan menurut *ETAG 001 Annex C*, kegagalan *splitting* akibat pembebanan diberikan pada syarat-syarat berikut:

- a. Nilai minimum c adalah sebesar $c \geq 1,2c_{cr,sp}$ dan kedalaman $h \geq 2h_{ef}$.

2.4. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Analysis*)

Metode elemen hingga (FEA) merupakan sebuah prosedur pemecahan solusi numerik dengan membagi model menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dari struktur sebenarnya. Pada Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa elemen-elemen tersebut antara lain berupa elemen 1D yaitu elemen berupa garis, elemen 2D berupa elemen triangular dan kuadrilateral, serta elemen 3D yaitu berupa elemen solid bervolume yang dihubungkan oleh suatu titik nodal (node) yang kemudian akan membentuk suatu jaring (*mesh*). Penyelesaian masalah dari metode ini adalah dengan cara pendekatan, sehingga semakin

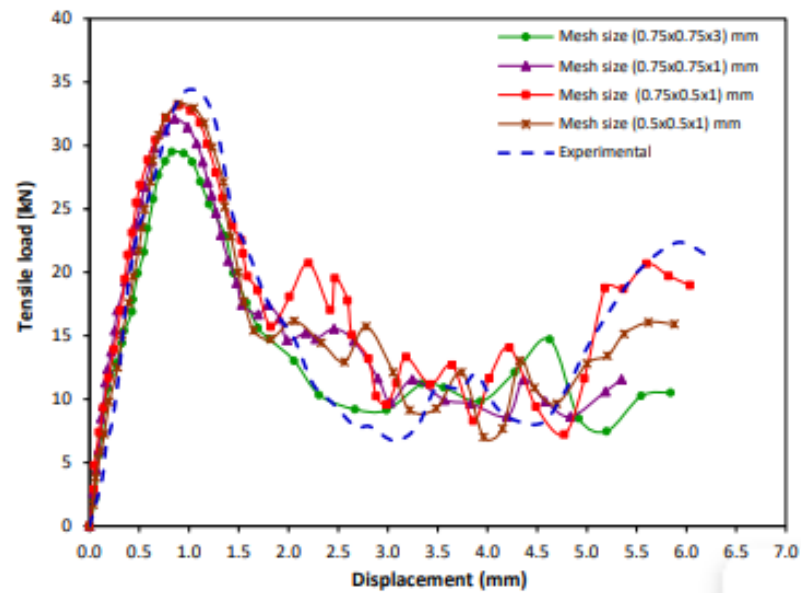
banyak elemen dan data yang digunakan akan semakin teliti hasil yang didapatkan.



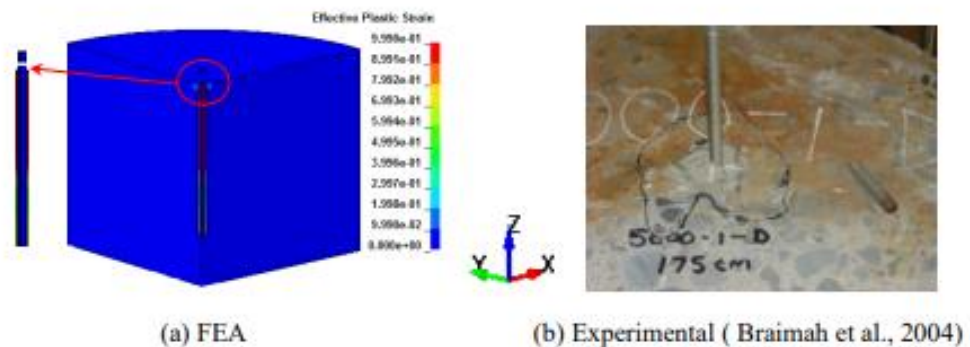
Gambar 2.8. Geometri elemen hingga (*Pranata, 2019*).

Solusi yang ditampilkan oleh metode elemen hingga adalah pendekatan dari permasalahan persamaan diferensial parsial pada model yang kompleks. Permasalahan ini dapat dibuat dalam suatu simulasi numerik yang terkomputerisasi sehingga dapat memprediksikan faktor-faktor penting yang dipelajari secara akurat (Amru, 2021). Seiring dengan perkembangan teknologi dan peningkatan kebutuhan penyelesaian pemodelan kompleks menggunakan metode ini, maka berkembang *software-software* berlandaskan metode elemen hingga yang dapat digunakan untuk kebutuhan berbagai industri termasuk konstruksi.

Saeb (2019) melakukan penelitian mengenai analisis efek dari tingkat regangan berbeda pada kondisi tarik dan geser ankur menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* LS-DYNA. Investigasi ini dilakukan dengan memodelkan ankur dengan diameter 6,4 mm dan 9,5 mm yang ditanamkan pada balok beton sedalam 114 mm dan 89 mm. Model yang dibuat dan divalidasi menggunakan data-data hasil eksperimental yang dilakukan oleh Braimah et al. (2004). Hasil dari penelitian yang dilakukan oleh Saeb (2019) ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10.



Gambar 2.9. Perbandingan antara respon *tensile load-displacement* antara FEA dan eksperimental untuk angkur diameter 6,4 mm (Saeb,2019).



Gambar 2.10. Tipe kegagalan yang didapatkan dari hasil FEA dan eksperimental (Saeb,2019).

Dari hasil yang didapat, disimpulkan bahwa model yang telah dibuat dapat memprediksi perilaku tarik dah geser, kegagalan akibat beban dan kegagalan pada angkur terhadap perbedaan regangan yang diberikan. Hasil ini menunjukkan hasil yang mirip dengan hasil eksperimental seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 di atas. Maka dari itu, penggunaan pemodelan menggunakan metode elemen hingga dapat digunakan sebagai model prediksi suatu permasalahan yang dihadapi secara aktual.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Objek penelitian ini adalah bangunan pelayanan kesehatan Rumah Sakit Belleza Lampung yang terletak di Jalan Sultan Haji Labuan Ratu, Kecamatan Kedaton, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.



Gambar 3.1. Lokasi RS. Belleza Lampung.

3.2. Metode Numerik

Metode yang akan digunakan pada penelitian ini berupa analisis menggunakan metode numerik elemen hingga (*Finite Element Analysis*). Metode ini digunakan untuk menganalisis kemampuan yang dimiliki oleh angkur saat diberikan beban berupa gaya yang bekerja pada elemen struktur yang ada. Oleh karena itu, dipilih program *Abaqus CAE* untuk membantu proses analisis yang kompleks dari penelitian ini. *Abaqus* merupakan peranti lunak simulasi numerik untuk memecahkan permasalahan kombinasi secara statik dan dinamik baik linear ataupun nonlinear menggunakan metode

elemen hingga (*finite element method*). *Abaqus* memiliki beberapa tahapan dalam proses analisisnya, antara lain *preprocessing*, *simulation*, dan *post processing* (Mubarok, 2019).

Tahapan *pre-processing* merupakan tahapan pemodelan geometri dan memasukkan data yang diperlukan. Memasukkan data ini dibedakan menjadi beberapa modul yang saling berkesinambungan untuk menentukan hasil perhitungan. Modul-modul tersebut antara lain modul *part*, *property*, *assembly*, *step*, *interaction*, *load*, *mesh*, dan *job*. Modul-modul ini memiliki fungsinya masing-masing dalam penentuan model yang akan dianalisis. Pada tahapan *simulation* atau simulasi, akan dilakukan proses analisis numerik dari data-data yang sudah diinputkan sebelumnya. Hasil dari analisis tersebut dapat berupa informasi gambar maupun hasil perhitungan. Pada tahapan *post processing*, hasil dari simulasi akan dibaca dan ditampilkan menjadi sebuah modul visualisasi antara lain dapat berupa plot kontur warna, animasi, perubahan bentuk, bahkan grafik.

3.3. Prosedur Penelitian

Tahapan-tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini antara lain:

3.3.1. Studi literatur

Pada tahapan ini dilakukan beberapa serangkaian kegiatan sebagai kajian dasar dalam penelitian yang akan dilakukan. Studi yang digunakan sebagai kajian dalam penelitian ini antara lain:

- a. SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.
- b. *ETAG 001 Edition 1997 – 3rd Amendment 2010: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchor for Use in Concrete - Annex C: Design Methods for Anchorage.*
- c. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 4: Design of Fastenings for Use in Concrete* (2013).

- d. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and rules for buildings* (2004).
- e. Buku, jurnal, dan sumber kredibel lainnya yang berkaitan dengan penelitian mengenai angkur.

3.3.2. Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa data primer dan data sekunder. Data primer yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa data gambar serta data struktur RSIA Belleza Kedaton yang diperoleh dari subjek penelitian dan digunakan sebagai pedoman dalam pemodelan dengan program *Abaqus CAE*. Data sekunder yang digunakan antara lain diperoleh dari sumber-sumber berupa kajian studi literatur yang berkaitan dengan penelitian. Data-data tersebut antara lain berupa:

a. Data Material Beton

Pada *Abaqus*, terdapat beberapa parameter umum yang perlu dimasukkan, parameter-parameter tersebut antara lain berupa nilai *mass density*, *Young's Modulus*, dan *Poisson's Ratio*. Nilai-nilai tersebut dijelaskan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. *Material Properties* Beton

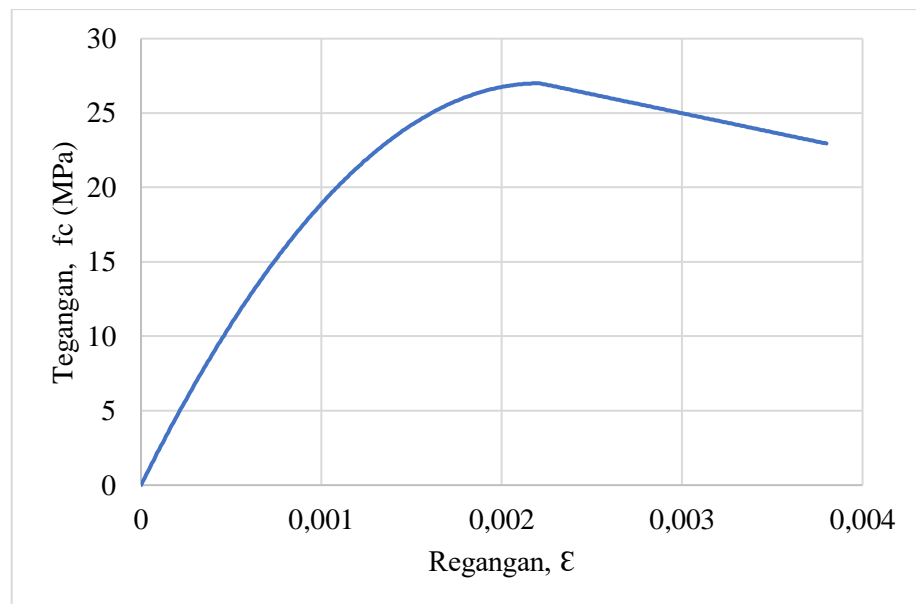
Material	Kuat Tekan (Mpa)	Modulus Elastisitas (MPa)	Berat Volume (kg/m ³)	<i>Poisson's Ratio</i>
Beton	27	24421,92	2400	0,2

Untuk mengetahui efek kerusakan pada beton, *Abaqus* menggunakan model *Concrete Damage Plasticity* (CDP). Model ini didapat dengan cara mengkonversikan beberapa nilai dari kurva *stress-strain* untuk kuat tekan beton serta kurva tegangan *stress-displacement* untuk kuat tarik beton. Beberapa nilai yang dikonversi

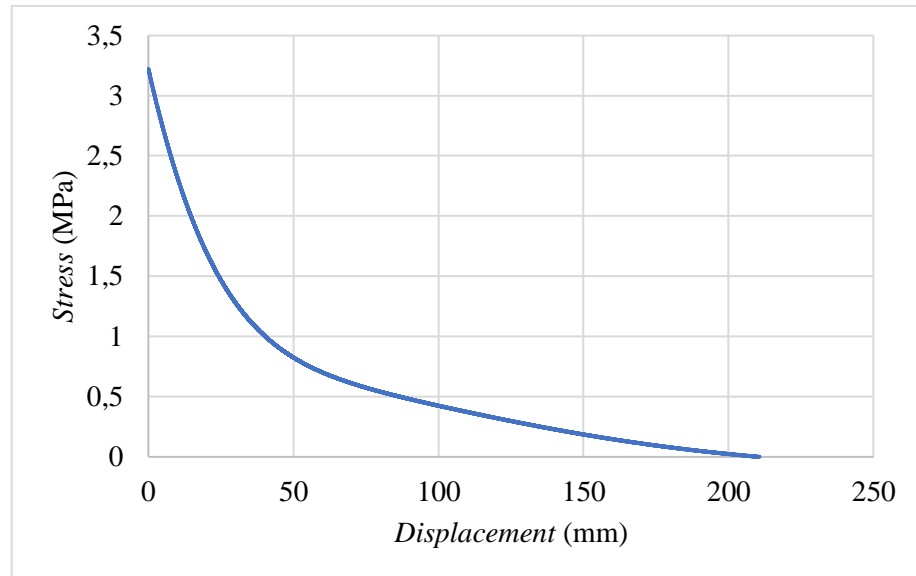
tersebut antara lain berupa nilai *inelastic strain* dan *damage parameter*. Pada penelitian ini, model yang digunakan untuk kuat tekan beton adalah model Hognestad (1951) dengan mutu beton 27 MPa, sedangkan model kuat tarik beton yang digunakan adalah model Hordjik (1991) dengan kuat tarik beton diperhitungkan melalui persamaan 3.1 menurut SNI 2847-2019 Pasal 19.2.3.1.

$$f_r = 0,62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \quad (3.1)$$

Dari hasil persamaan tersebut, didapatkan nilai kuat tarik beton adalah sebesar 3,222 MPa. Kurva kuat tekan beton dan kurva kuat tarik beton dengan mutu 27 MPa ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Kurva tegangan-regangan kuat tekan beton (Hognestad, 1951).



Gambar 3.3. Kurva *stress-displacement* kuat tarik beton (Hordjik, 1991).

Beberapa parameter kurva di atas akan dikonversikan menjadi model CDP, parameter model CDP ini antara lain *nilai inelastic strain* dan *damage parameter*. Nilai parameter tersebut berlaku untuk kuat tekan dan kuat tarik beton. Nilai parameter tersebut didapatkan dari persamaan di bawah ini yang ditunjukkan pada persamaan 3.2 sampai persamaan 3.5.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (3.3)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (3.4)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \quad (3.5)$$

Keterangan =

ε_c^{in} = *inelastic compression strain*

ε_t^{ck} = *cracking strain*

ε_c = *compression strain*

ε_t = *tension strain*

d_c = *compression damage*

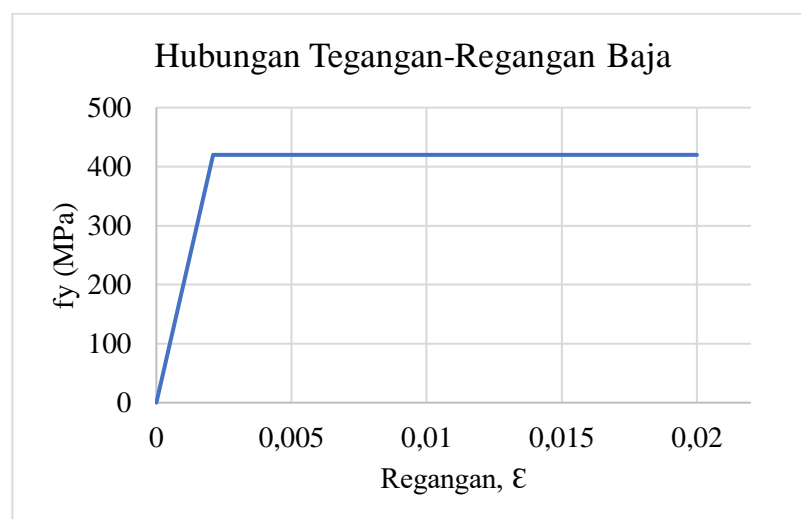
d_t	=	tension damage
σ_c	=	compression stress
σ_t	=	tension stress
σ_{cu}	=	maximum compression stress
σ_{t0}	=	maximum tension stress
E_0	=	modulus of elasticity

b. Data Material Baja Tulangan dan Angkur

Tulangan baja dan angkur dianggap memiliki mutu baja yang sama, yaitu f_y 420 MPa. Tulangan baja digunakan untuk tulangan longitudinal dan transversal pada kolom dan balok. Data material baja yang digunakan mengacu pada model hubungan bilinear tegangan-regangan menurut EN 1993-1-1 yang tertera pada Tabel 3.2 dengan hubungan tegangan regangan baja yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Tabel 3.2. Material Properties Baja Tulangan dan Angkur

Material	Tegangan Leleh Baja (Mpa)	Modulus Elastisitas (MPa)	Berat Volume (kg/m ³)	Poisson's Ratio
Baja	420	200.000	7850	0,3



Gambar 3.4. Kurva tegangan-regangan baja (European Committee for Standardization, 2005).

c. Data Epoksi

Data epoksi diolah menggunakan penelitian model kurva *bond stress-slip* yang dilakukan oleh Tang dan Cheng (2020). Parameter-parameter yang digunakan antara lain berupa nilai s_1 , s_2 , s_3 , α , τ_u , dan τ_f . Nilai s_3 merupakan jarak antar rusuk tulangan. Jarak antar rusuk tulangan ini diatur pada *British Standard* (BS 4999:2005) Pasal 7.4.2.1 dengan nilai jarak diambil antara $0,4d$ sampai $1,2d$ di mana d adalah diameter tulangan. Diameter angkur yang digunakan adalah sebesar 30 mm, maka $0,4d$ adalah sebesar 12 mm dan $1,2d$ adalah sebesar 36 mm. Untuk mendapatkan nilai s_1 positif, maka diambil jarak antar rusuk pada tulangan sebesar 28 mm.

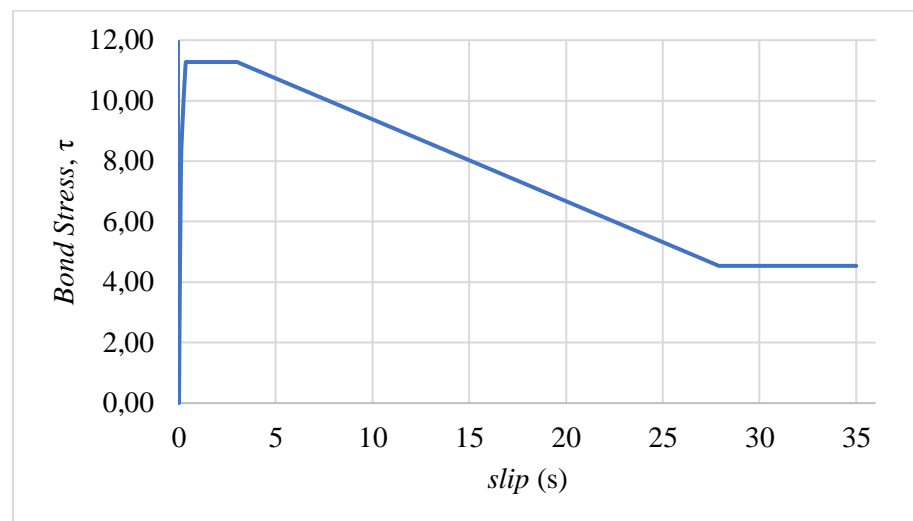
Untuk parameter s_1 , jika nilai s_3 sebesar 28 mm dimasukkan ke dalam persamaan 2.3, maka didapatkan nilai s_1 sebesar 0,354 mm. Nilai ultimit *bond stress* didapat dari persamaan 2.4. Nilai yang mempengaruhi persamaan tersebut adalah nilai ketebalan selimut beton dan diameter tulangan yang digunakan. Pada penelitian ini digunakan selimut beton sebesar 40 mm dan diameter angkur sebesar 30 mm. Jika nilai-nilai tersebut dimasukkan ke persamaan 2.4, maka didapatkan nilai τ_u adalah sebesar 11,276 MPa. Jika nilai τ_u sudah didapatkan, maka nilai τ_f akan didapat sebesar 4,511 MPa. Nilai-nilai parameter yang digunakan dijelaskan pada Tabel 3.3 serta kurva *bond stress-slip* yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Tabel 3.3. Hasil Perhitungan Parameter Kurva *Bond Stress-Slip*

Parameter	Tang dan Cheng (2020)	Hasil Perhitungan
s_1	Persamaan 2.3	0,354 mm
s_2	3 mm	3 mm
s_3	Jarak antar rusuk tulangan	28 mm
α	0,3	0,3

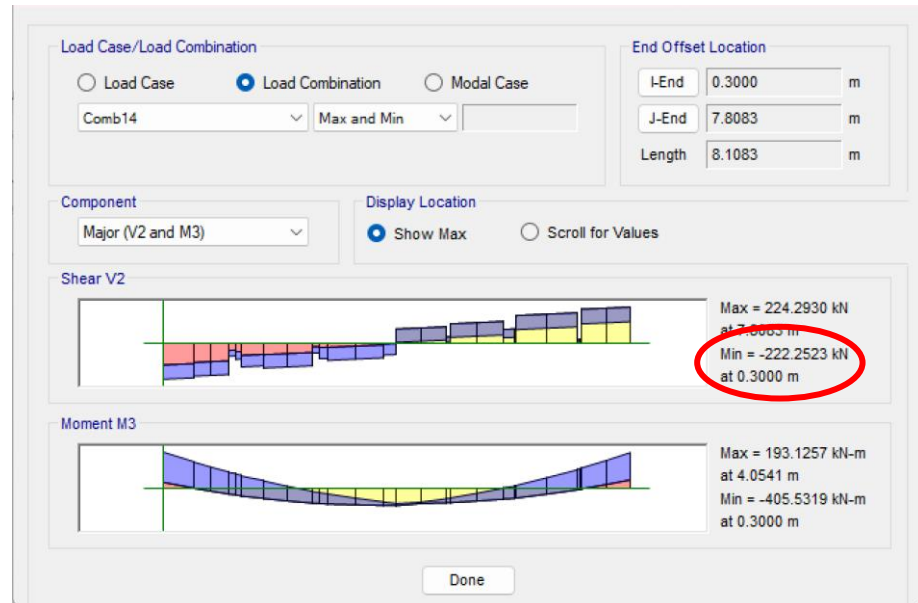
Tabel 3.3. (lanjutan)

Parameter	Tang dan Cheng (2020)	Hasil Perhitungan
τ_u	Persamaan 2.4	11,276 MPa
τ_f	$0,4\tau_u$	4,511 Mpa

Gambar 3.5. Kurva *bond stress-slip* epoksi (Tang dan Cheng, 2020).

d. Data Beban

Data yang digunakan untuk pembebanan model didapatkan dari hasil pengolahan data menggunakan program ETABS. Hasil pengolahan data tersebut menunjukkan bahwa beban terbesar dihasilkan dari kombinasi pembebanan $U = 1,2D + 1,0L - 0,3E_x - E_y$ dengan pengaruh dari gaya gempa. Dari pembebanan tersebut, didapatkan nilai momen pada tumpuan terbesar adalah 405,5319 kN.m dan nilai lintang pada tumpuan terbesar adalah 222,2523 kN. Gaya yang digunakan pada pemodelan adalah gaya lintang sebesar 222,2523 kN. Hasil tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Nilai momen dan lintang dari program ETABS.

e. Panjang Pengankuran

1) Struktur monolit

Pada struktur monolit, tulangan longitudinal pada balok diangkurkan pada kolom. Bagian tulangan longitudinal balok yang masuk ke daerah kolom disebut sebagai panjang penyaluran. Panjang penyaluran ini diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 25.4.3.1 dan dapat dilihat pada persamaan 3.6.

$$l_{dh} = \left(\frac{0,24f_y\psi_e\psi_c\psi_r}{\lambda\sqrt{f_c'}} \right) d_b \quad (3.6)$$

Keterangan =

l_{dh} = Panjang penyaluran (mm)

f_y = Mutu baja tulangan (MPa)

ψ_e = Faktor modifikasi epoksi (nilai faktor diambil sebesar 1,0)

ψ_c = Faktor modifikasi selimut beton (nilai faktor diambil sebesar 1,0)

ψ_r = Faktor tulangan pengegang (nilai faktor diambil sebesar 1,0)

- λ = Faktor modifikasi bobot beton untuk beton normal (1,0)
 $f'c$ = mutu beton (MPa)
 db = diameter tulangan yang digunakan

Dari persamaan tersebut didapatkan nilai panjang penyaluran untuk struktur monolit adalah sebesar 365,214 mm, kemudian nilai ini dibulatkan menjadi 366 mm. Perhitungan secara menyeluruh mengenai panjang penyaluran untuk struktur monolit tertera pada Lampiran.

2) Sambungan struktur eksisting dan struktur baru

Untuk panjang sambungan angkur pada daerah kolom, atauran yang digunakan mengacu pada aturan yang digunakan oleh Hilti yaitu *Eurocode 2*. Panjang penyaluran menurut *Eurocode 2* diatur pada Pasal 8.4 dapat dilihat pada persamaan 3.7 di bawah ini.

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \quad (3.7)$$

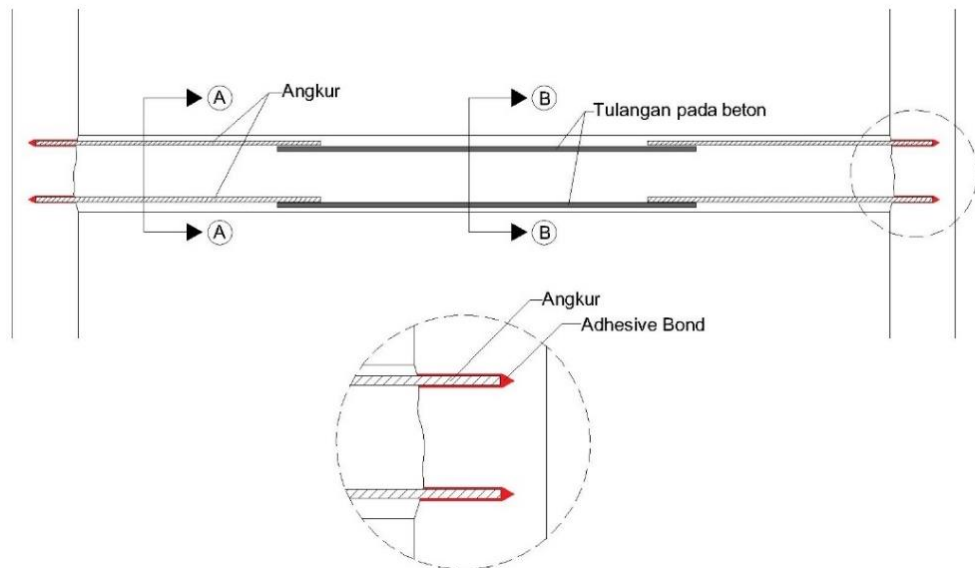
Keterangan =

- L_{bd} = Panjang pengankuran
 α_1 = Faktor bentuk tulangan
 α_2 = Faktor selimut beton
 $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ = faktor tulangan transversal

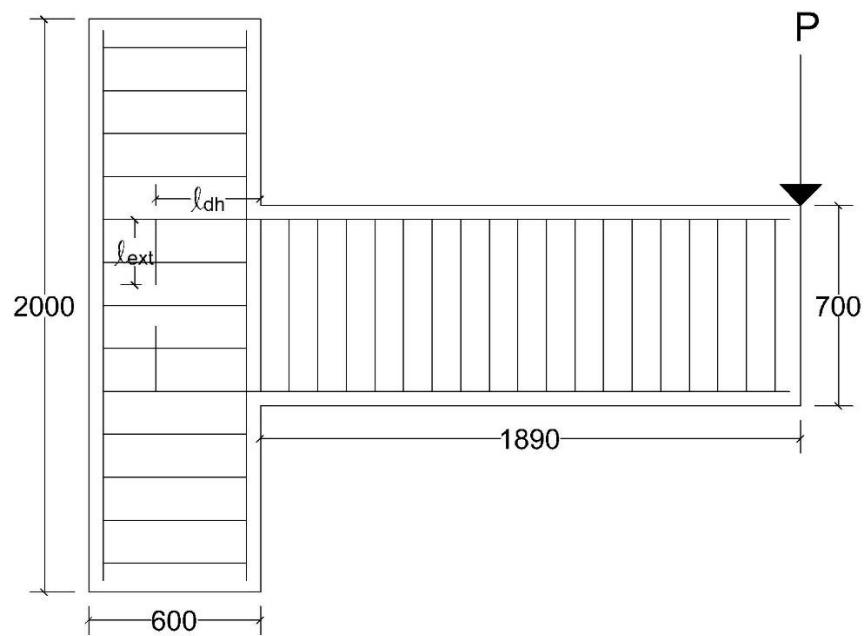
Dari persamaan tersebut, didapatkan panjang penyaluran untuk angkur adalah sebesar 473,43 mm yang dibulatkan menjadi 474 mm. Penjelasan mengenai perhitungan panjang penyaluran terdapat pada Lampiran.

3.3.3. Pemodelan

Model struktur yang akan dianalisis adalah elemen balok-kolom yang dimodelkan secara 3D pada program *Abaqus CAE*. Penggambaran model secara keseluruhan dapat dilihat seperti pada Gambar 3.7. Potongan A merupakan potongan pada daerah tumpuan balok, sedangkan potongan B merupakan potongan pada daerah lapangan. Dalam model ini, angkur berperan seperti tulangan tumpuan balok sedangkan tulangan lapangan dimodelkan seperti tulangan ulir biasa. Maka dari itu, bagian yang akan dimodelkan hanyalah kolom dan balok dibagian tumpuan saja tanpa mempertimbangkan tulangan longitudinal di daerah lapangan untuk mempermudah pengamatan dari model yang akan dibuat. Model yang akan dibuat di dalam program *Abaqus* dapat dilihat pada Gambar 3.8.

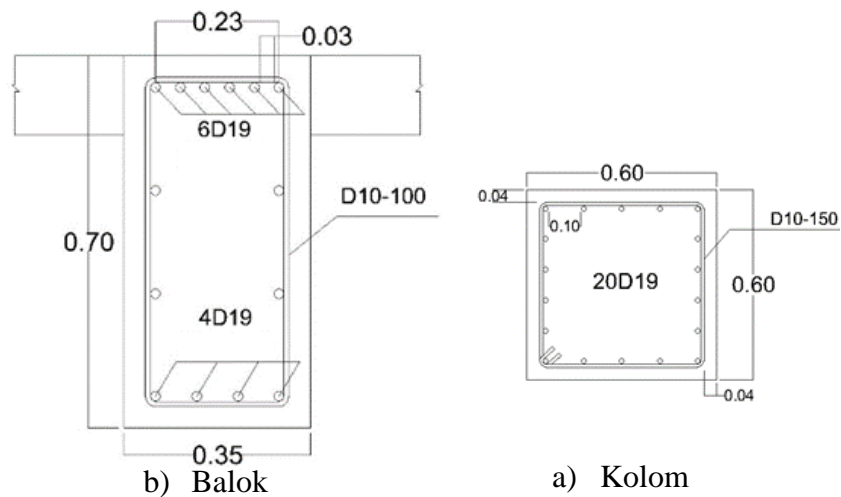


Gambar 3.7. Struktur balok, kolom, dan Angkur yang akan dimodelkan dengan *Abaqus CAE*.

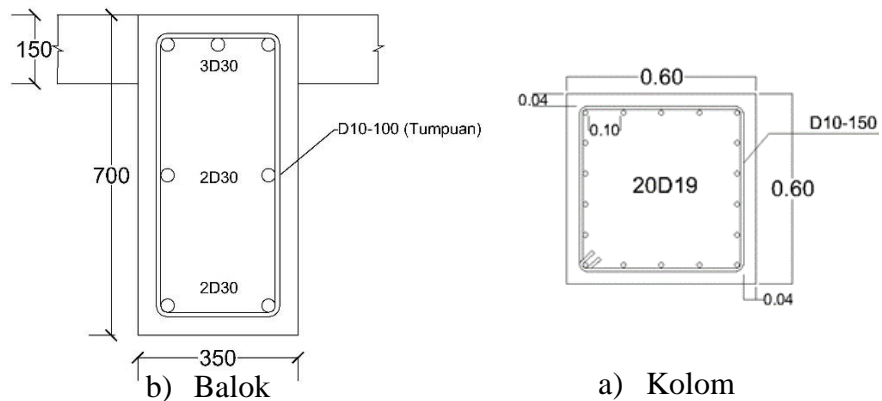


Gambar 3.8. Model pada program *abaqus*.

Informasi mengenai data struktur yang telah didapat baik dari data primer maupun sekunder akan dimasukkan ke dalam program *Abaqus* kemudian dianalisis secara numerik untuk menghasilkan *output* yang diinginkan. Pemodelan yang akan dibuat dibagi menjadi dua, yaitu model kolom balok apabila dicor secara monolit (struktur monolit) dan model kolom eksisting dan balok baru dengan sambungan ankur epoksi (*post installed anchor*). Model balok dan kolom untuk struktur monolit ditunjukkan pada Gambar 3.9 sedangkan model balok dan kolom untuk struktur sambungan dengan ankur ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.9. Model balok dan kolom untuk struktur monolit pada *abaqus*.



Gambar 3.10. Model balok dan kolom untuk struktur monolit pada *abaqus*.

Perbedaan model pada struktur monolit dengan struktur sambungan angkur terletak pada jumlah tulangan longitudinal yang digunakan pada struktur balok. Pada struktur monolit, jumlah tulangan disesuaikan dengan jumlah tulangan berdasarkan gambar kerja yang sudah ada, yaitu tulangan D19 sebanyak 6 buah. Pada struktur sambungan dengan angkur, jumlah dan diameter tulangan yang digunakan berbeda. Ukuran diameter yang dipilih mengacu pada katalog Hilti dengan mempertimbangkan spasi antar angkur yang digunakan, oleh karena itu dipilih diameter sebesar 30 mm. Jumlah angkur yang digunakan merupakan nilai pembagian antara luas total tulangan yang digunakan pada struktur monolit yaitu 6D19 dengan

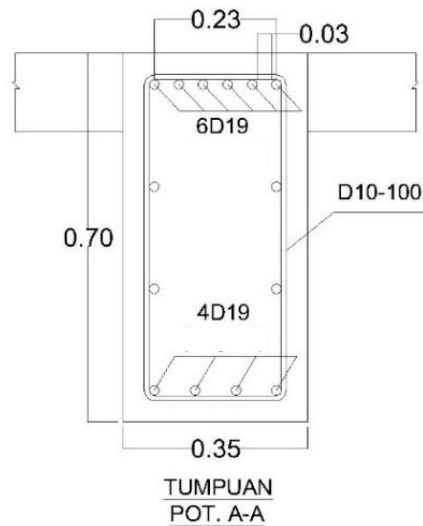
luas total sebesar 425,293 mm² dengan luas satu tulangan angkur berdiameter 30 mm yaitu sebesar 176,715 mm², maka dari pembagian tersebut didapatkan jumlah angkur yang digunakan sebesar 3 buah.

a. Model struktur monolit

1. *Part Module*

Pemodelan struktur secara geometri dilakukan pada bagian ini. Model, bentuk, dimensi, serta satuan yang *diinputkan* harus diperhatikan dengan baik karena hal ini akan berpengaruh pada tahapan simulasi yang akan dilakukan. Dimensi balok serta detail struktur dapat dilihat pada Gambar 3.11 di bawah. Pada bagian ini, akan tersedia *approximate size* yang digunakan untuk menentukan skala *sketcher* dengan dimensi model yang akan dibuat.

a) Balok

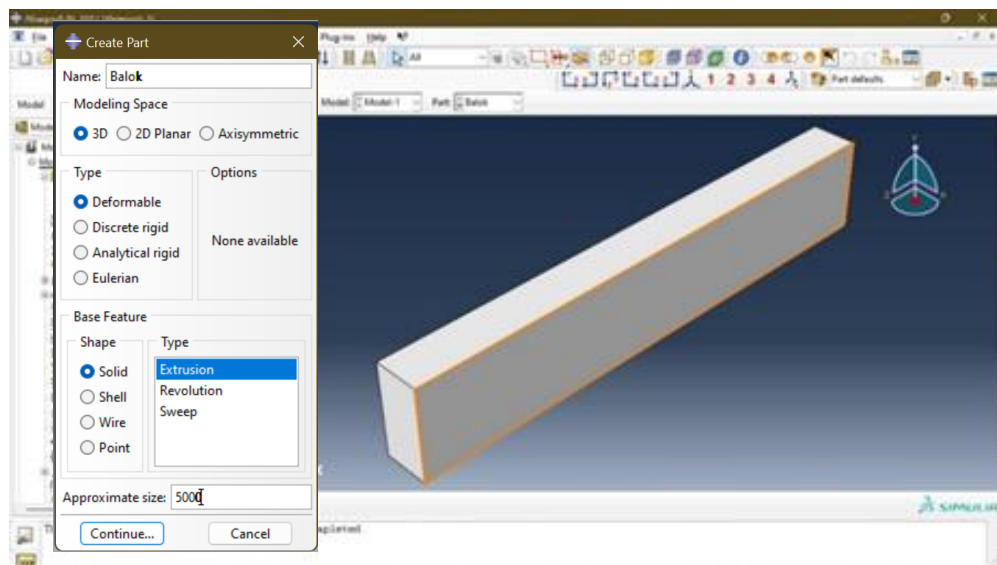


Gambar 3.11. Dimensi balok B1.

Tahapan pemodelan balok :

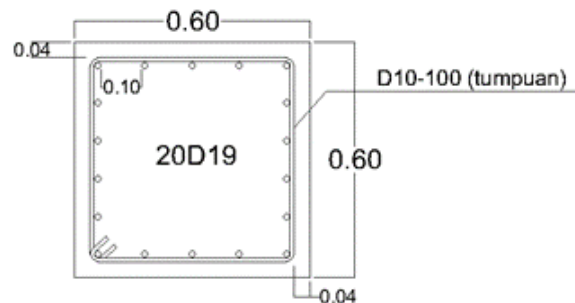
- Pada *toolbox* pilih *create part*, masukkan data-data seperti *name* : balok, *modelling space* : 3D, *type* : deformable, *shape* : solid – extrusion, dan nilai *approximate size*, klik *continue*.

- Pilih *create lines : rectangle (4 lines)*.
- Buatlah bentuk segi empat pada *sketcher*
- Klik *add dimension* pada *toolbar*, klik pada sisi yang akan dimasukkan dimensinya, kemudian ketikkan dimensi lebar = 350 dan tinggi 700, klik *done*.
- Pada *edit base extrusion*, masukkan *depth* sesuai panjang balok yang akan dianalisis.



Gambar 3.12. Memodelkan *part* balok .

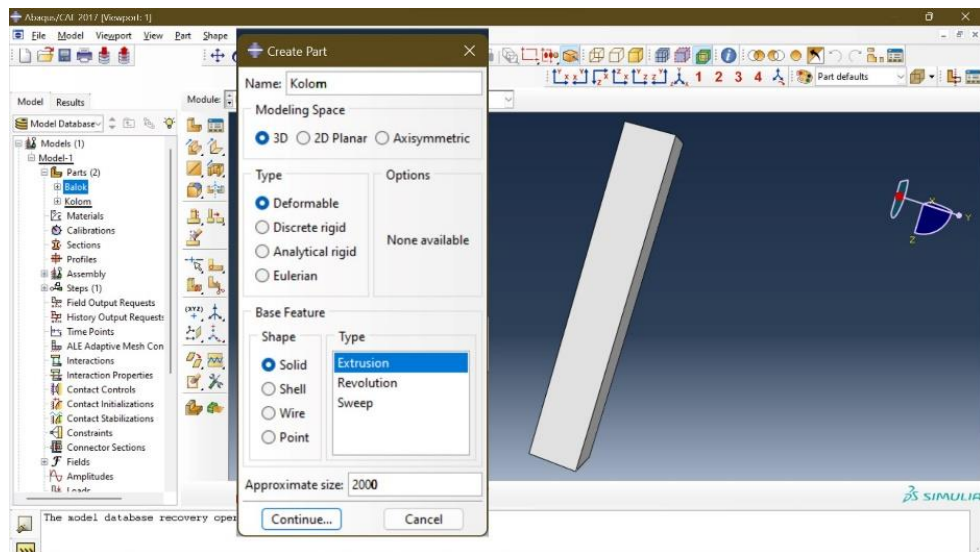
b) Kolom



Gambar 3.13. Dimensi kolom K3.

Tahapan pemodelan kolom :

- Pada *toolbox* pilih *create part*, masukkan data-data seperti *name* : kolom, *modelling space* : 3D, *type* : *deformable*, *shape* : *solid – extrusion*, dan nilai *approximate size*, klik *continue*.
- Pilih *create lines* : *rectangle (4 lines)*.
- Buatlah bentuk segi empat pada *sketcher*
- Klik *add dimension* pada *toolbar*, klik pada sisi yang akan dimasukkan dimensinya, kemudian ketikkan dimensi lebar = 600 dan tinggi = 600, klik *done*.
- Pada *edit base extrusion*, masukkan *depth* sesuai panjang kolom yang akan dianalisis.



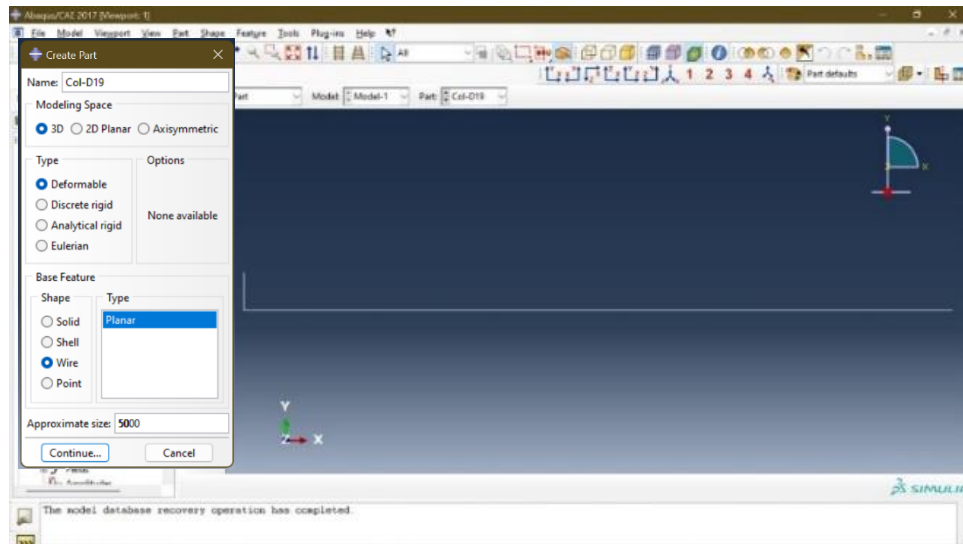
Gambar 3.14. Memodelkan *part* kolom.

c) Tulangan dan angkur

Untuk memodelkan tulangan, pemodelan untuk tulangan memanjang, sengkang, dan angkur ini dilakukan satu per satu sesuai dengan dimensi masing-masing elemen yang akan dimodelkan. Tahapan pemodelan tulangan :

- Pada *toolbox* pilih *create part*, masukkan data-data seperti *name*, *modelling space* : 3D, *type* : *deformable*, *shape* : *wire – planar*, dan nilai *approximate size*, klik *continue*.

- Pilih *create lines* : *connected*. Buatlah garis memanjang.
- Pilih *add dimension*, kemudian masukkan panjang tulangan yang akan dimodelkan yang merupakan penjumlahan dari panjang penyaluran dan panjang balok.

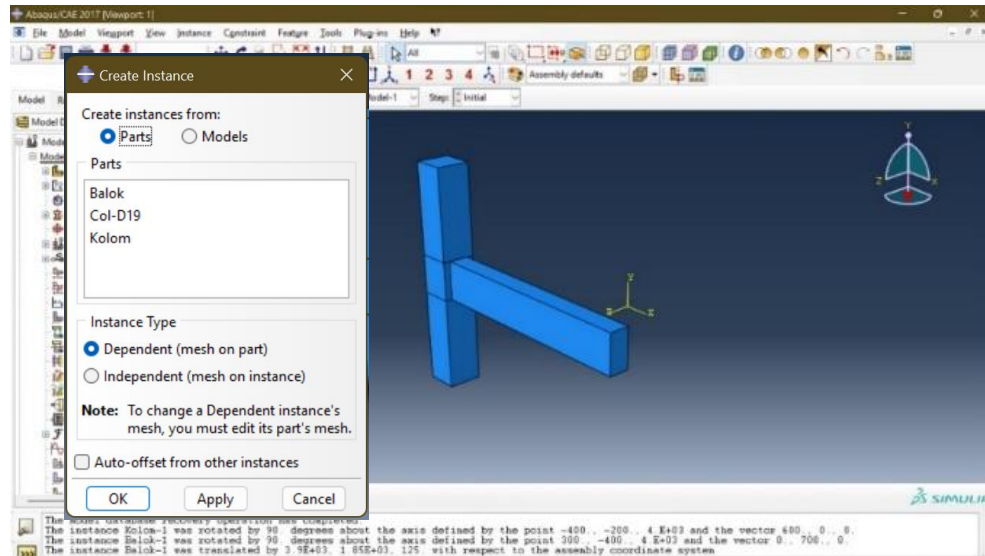


Gambar 3.15. Memodelkan part tulangan.

2. Assembly Module

Modul ini berfungsi untuk merakit bagian-bagian yang sebelumnya telah dimodelkan menjadi satu kesatuan. Tahapan penyatuan yang dilakukan adalah :

- Pilih *module* : *Assembly* pada *context bar*.
- Pilih *create instance* pada *toolbox*, kemudian pilih *parts* yang akan dimasukkan, klik OK.
- Jika terdapat *parts* yang perletakkannya kurang sesuai, pilih *rotate instance* pada *toolbox*, seleksi *parts* yang akan diputar, klik *done*, pilih 2 titik putar, masukkan nilai *angle of rotation* yang diinginkan.
- Pilih *translate instance*, seleksi *part* yang ingin disatukan, klik *done*, klik pada titik-titik yang akan disatukan, klik Ok.



Gambar 3.16. Penggabungan *part* kolom, balok, dan tulangan.

3. Property Module

Modul ini berfungsi untuk menginputkan material ke dalam model yang sudah dibuat. Hal-hal seperti mendefinisikan material, sifat-sifatnya, serta menempatkan material pada elemen-elemen yang telah dimodelkan dilakukan pada tahapan ini. Hal yang dilakukan adalah:

- Pada *module* : pilih *property*, pada *toolbox* pilih *create material*, masukkan data-data seperti nama material, lalu klik *general – density*, masukkan nilai massa jenis beton, kemudian klik *mechanical*, pilih *elasticity*, kemudian *elastic*. Isikan nilai *modulus young* dan *Poisson's ratio*. Data-data ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.
- Klik *mechanical*, pilih *plasticity*, kemudian pilih *concrete damage parameter*. Masukkan nilai-nilai parameter *plasticity* seperti tertera pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5. Nilai *compressive behaviour* dan *tension behaviour* didapatkan dari pengolahan data menggunakan persamaan 3.2 - 3.5.

Tabel 3.4. Parameter CDP Kuat Tekan Beton

Yield Sress (MPa)	Inelastic Strain (MPa)	Damage Parameter
24	0	0
25,668	0,000669	0
26,111	0,000741	0
26,594	0,000851	0
26,999	0,001104	0
26,952	0,001126	0,00178
26,773	0,001204	0,00839
26,467	0,001336	0,01972
26,034	0,001524	0,03577
25,499	0,001756	0,05559
25,015	0,001966	0,07353
24,530	0,002176	0,09147
24,046	0,002385	0,10941
23,562	0,002595	0,12734
23,077	0,002805	0,14528
22,950	0,00286	0,15000
20,401	0,003965	0,24441
17,852	0,005069	0,33881
15,303	0,006173	0,43322
12,754	0,007278	0,52763
10,205	0,008382	0,62203
7,656	0,009487	0,71644
5,107	0,010591	0,81085

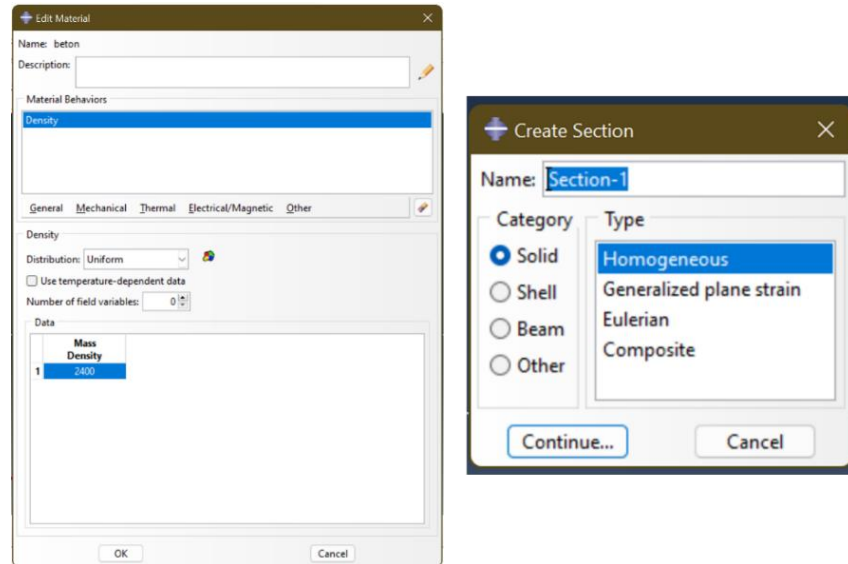
Tabel 3.5. Parameter CDP Kuat Tarik Beton

Yield Sress (MPa)	Displacement (mm)	Damage Parameter
3.2216	0	0
3.2004	0.2001	0.006589

Tabel 3.5. (lanjutan)

Yield Sress (MPa)	Displacement (mm)	Damage Parameter
3.1631	0.5551	0.01817
3.1169	1.0001	0.032497
2.6873	5.5001	0.165847
2.2838	10.5001	0.291109
1.6734	20.5001	0.480564
1.1165	35.5001	0.653426
0.7519	55.5001	0.766611
0.5712	75.5001	0.822698
0.4795	90.1401	0.851163
0.3969	105.2801	0.876816
0.3195	120.5501	0.900836
0.205	145.4951	0.936381
0.1465	160.1001	0.954518
0.0629	185.3201	0.980487
0.0231	200.3751	0.992824
0.0106	205.7751	0.996719
0	210.6301	1

- Pilih *create section* pada *toolbox*, masukkan nama *section*, *category* : *solid - homogeneous* (untuk balok dan baja) dan *beam – truss* (untuk tulangan dan angkur), klik *continue*.
- Pada material pilih material yang akan digunakan, klik ok.
- Pilih *assign section* pada *toolbox*, blok *part* yang dipilih, klik *done*.
- Pada bagian *section*, pilih *part* yang di blok, klik Ok.



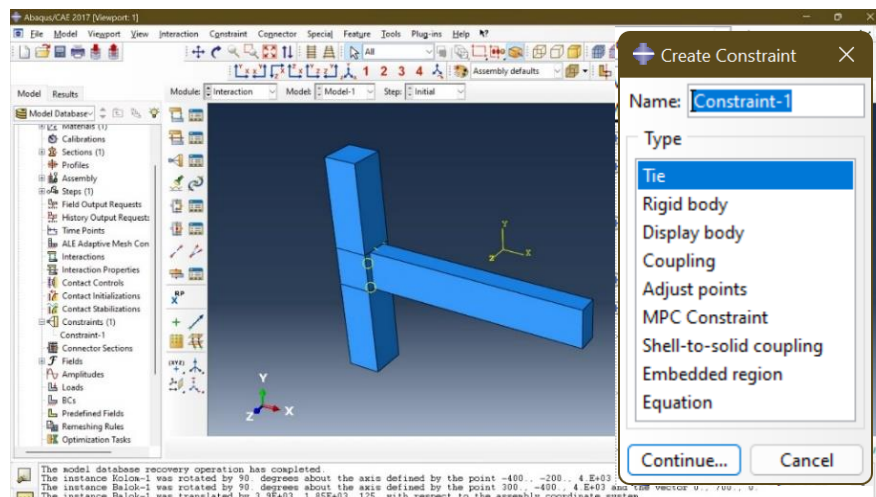
Gambar 3.17. Memasukkan data material yang digunakan.

4. Interaction Module

Tujuan dari *interaction* modul ini adalah untuk menentukan jenis interaksi yang terjadi antar bidang kontak pada model.

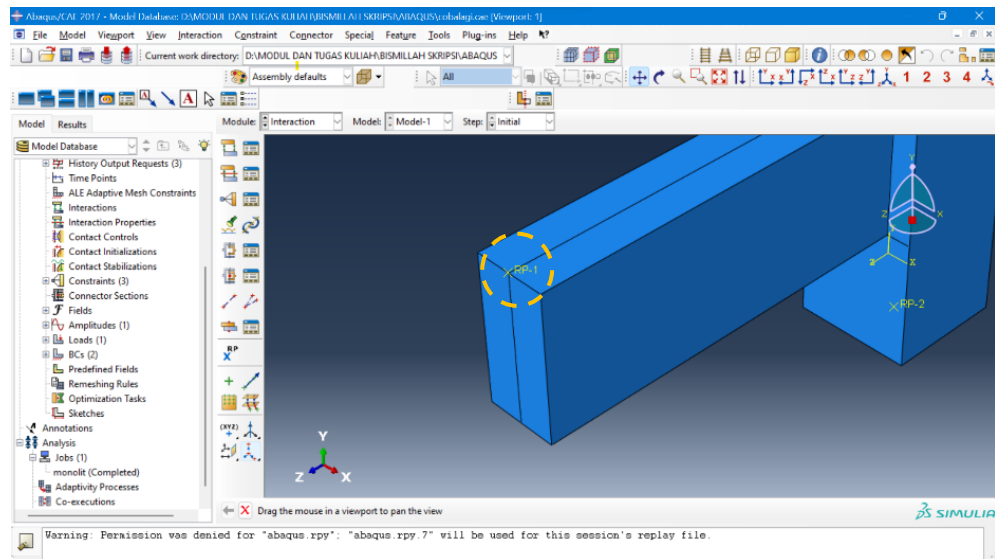
Tahapan pengerjaannya :

- Pilih *create constraint* pada *toolbox*, masukkan nama yang akan digunakan, pilih *type* : *embedded region* (untuk tulangan) dan *tie – surface* (pada sambungan balok kolom), seleksi elemen yang akan disatukan, klik *done*, klik Ok.



Gambar 3.18. Mendefinisikan interaksi antar elemen.

- Klik *reference point* (RP), kemudian klik pada bagian tengah atas balok, tempat beban akan diberikan. Klik *constraint*, pilih *coupling*. Klik pada tanda *reference point* pada balok, kemudian pilih sisi muka depan balok tempat bekerjanya beban.

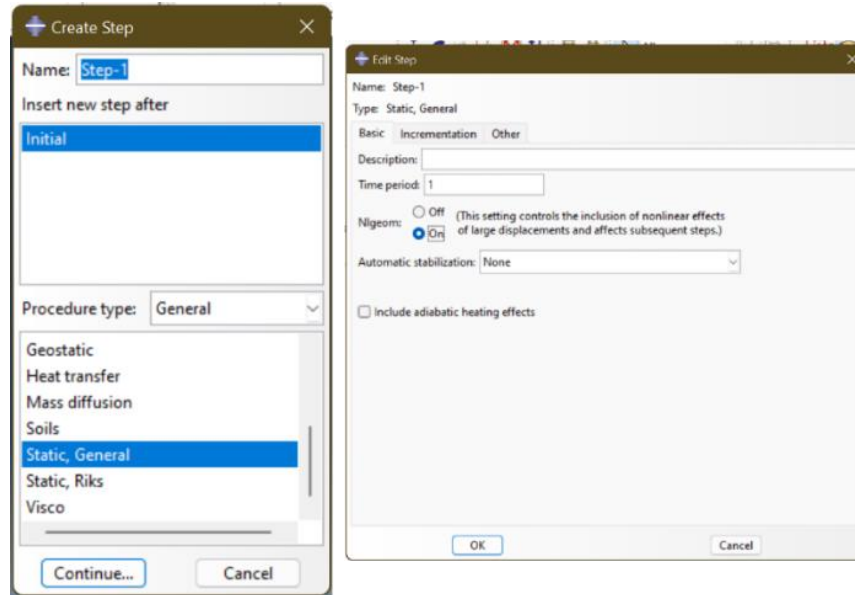


Gambar 3.19. Penempatan titik *reference point*.

5. Step Module

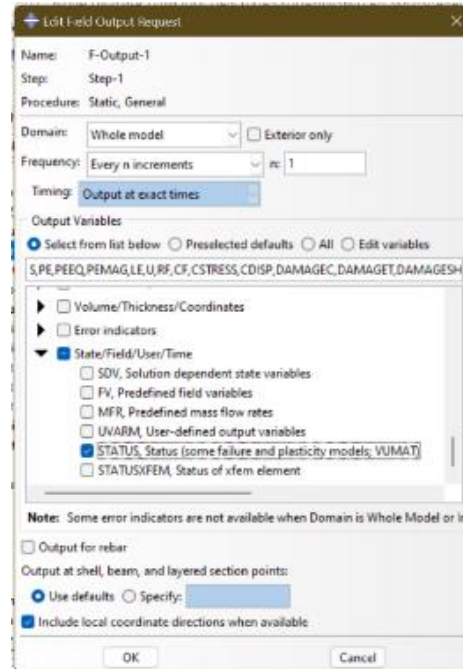
Step module bertujuan untuk menentukan hasil yang akan ditampilkan dari suatu pembebanan berdasarkan parameter-parameter yang ada. Tahapannya yaitu :

- Pilih *module* : *step* pada *context bar*, kemudian klik *create step*, pilih *static*, klik Ok.



Gambar 3.20. Mendefinisikan *step* pada pemodelan.

- Pada tab “*incrementation*”, masukkan nilai *maximum number of increment* sebesar 100.000, *increment size initial* = 0,01, *minimum* = 1E-015, *maximum* = 0,1.
- Pilih *field output manager*, klik *edit*, tambahkan *output variables* yang direncanakan, yaitu :
 - 1) *Stress*
 - 2) *Strain*, klik PEEQ (*equivalent plastic strain*)
 - 3) *Displacement*, klik U (*translation and rotation*)
 - 4) *State/field/user*, klik STATUS, klik OK

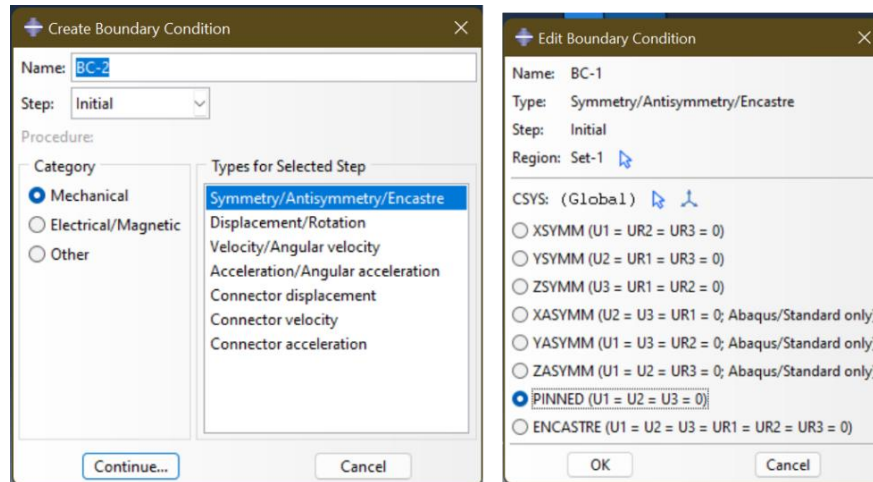


Gambar 3.21. Memilih solusi yang akan ditampilkan setelah proses *running*.

6. Load Module

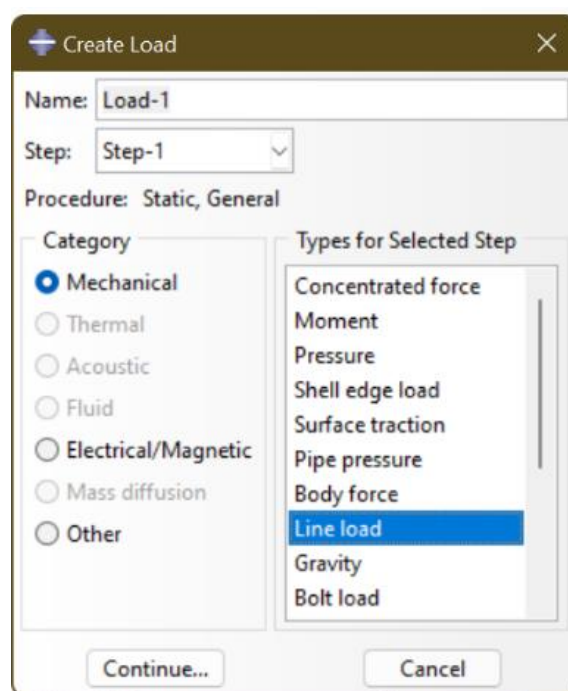
Load module berfungsi untuk memasukkan beban dan *boundary condition* berupa tumpuan pada model. Tumpuan yang direncanakan adalah tumpuan sendi pada ujung-ujung kolom dan jepit di ujung bebas balok. Tahapan yang dilakukan adalah :

- Pilih *module* : *load* pada *context bar*, kemudian pilih *create boundary condition*, *step* : *initial*, *category* : *mechanical*, *types for selected step* : *symmetry/antisymmetry/encastre*, klik *continue*, seleksi bagian-bagian yang ditentukan sebagai tumpuan. Klik *encastre* ($U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$) untuk jepit, klik OK.



Gambar 3.22. Mendefinisikan tumpuan pada model.

- Pilih *create load*, *step* : *step-1*, *category* : *mechanical*, *types for selected step* : *concentrated force*, klik *continue*, klik pada *reference point*, klik *done*, masukkan nilai beban yang digunakan, yaitu nilai lintang yang didapatkan pada ETABS, klik *Ok*.

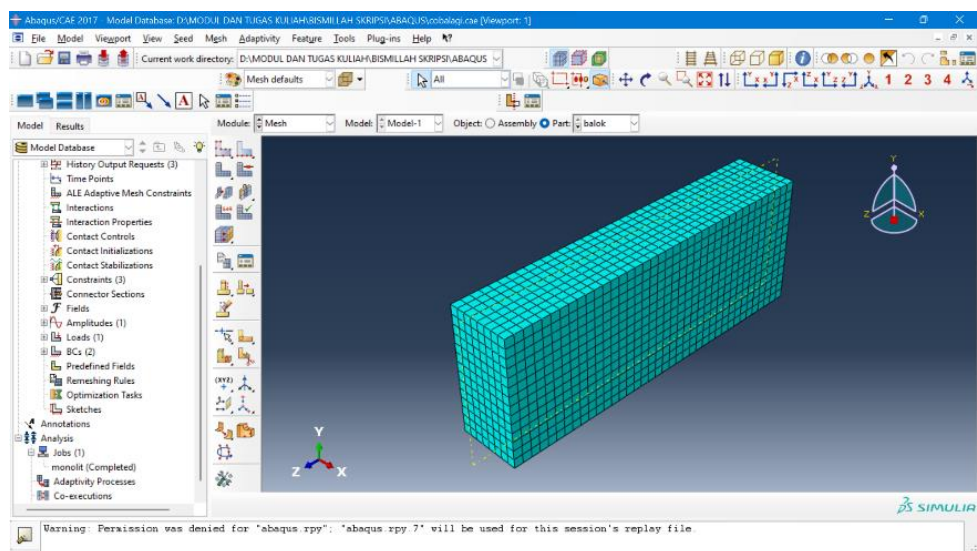


Gambar 3.23. Mendefinisikan pembebanan pada model.

7. Mesh module

Pada *module* ini, model akan dibagi menjadi bagian yang lebih kecil. Ukuran bagian atau elemen-elemen kecil ini dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Tahapan pada *module* ini antara lain:

- Pilih *part* yang akan diterapkan *mesh*. Klik *seed part*, masukkan nilai *approximate global size* sebesar 60. Semakin kecil nilai *approximate global size*, maka akan semakin detail analisis yang dilakukan dan semakin berat pula program akan bekerja.
- Klik *assigned mesh control*, pilih *hex*, kemudian klik *structured*.
- Klik *mesh part*, kemudian klik *yes*.



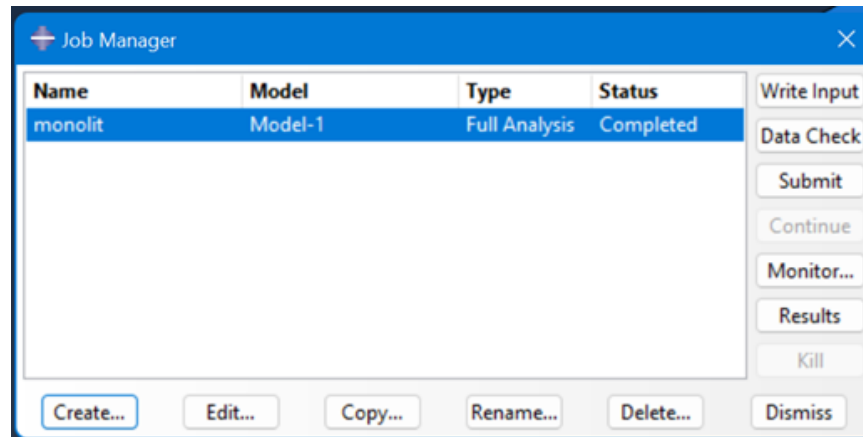
Gambar 3.24. Mesh module pada elemen.

8. Job module

Module ini mengatur hal-hal saat model akan di *running*. Tahapan pada *module* ini antara lain:

- Klik *job manager*, klik *create*. Berikan nama pada *job manager*, kemudian klik OK.
- Program akan mulai menganalisis hasil desain dengan material yang diberikan. Jika pada monitor tertulis *completed*,

maka program berhasil mengeluarkan *output* dari data dan desain yang dibuat. Hasil dari analisis dapat dilihat pada *module visualization*.

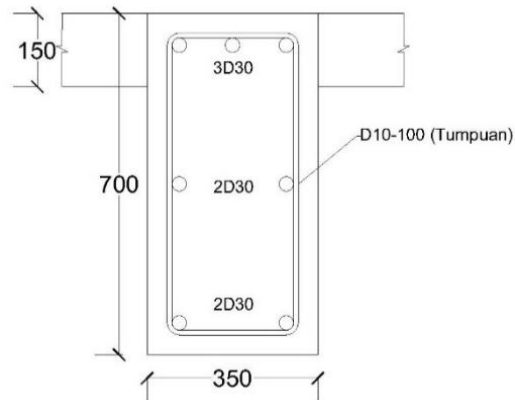


Gambar 3.25. Pengaturan *job module*.

b. Struktur sambungan menggunakan angkur *post installed*

Tahapan-tahapan pada model struktur ini dilakukan sama seperti tahapan-tahapan pada model struktur monolit. Namun, terdapat beberapa elemen dan data yang membedakan antara model struktur ini dengan model struktur monolit. Tahapan yang akan dijelaskan di bawah ini merupakan tahapan-tahapan yang memiliki perbedaan model elemen dan data, sedangkan tahapan lain yang tidak dijelaskan dilaksanakan sama seperti tahapan pada model struktur monolit. Tahapan-tahapan tersebut antara lain:

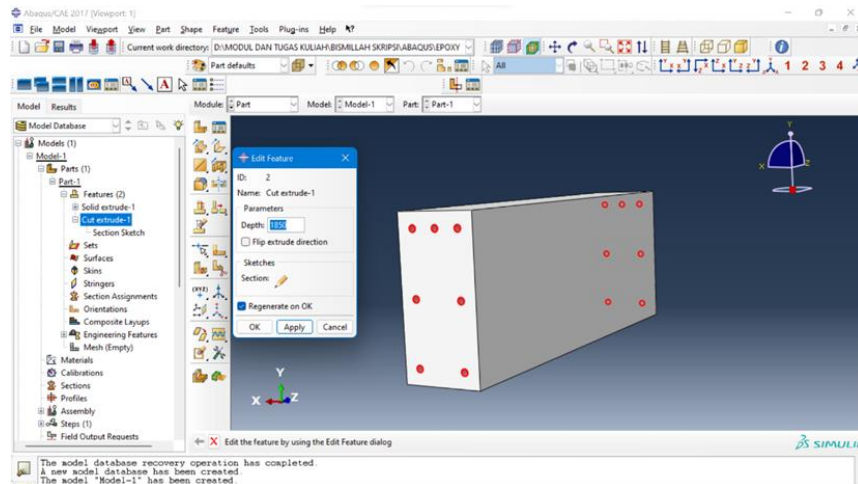
1. Part module



Gambar 3.26. Model balok dengan angkur.

Tahapan pemodelan balok sama dengan tahapan pada model sebelumnya, namun model balok yang sudah ada perlu diberikan lubang sebagai tempat pananaman angkur. Tahapan-tahapan tersebut antara lain:

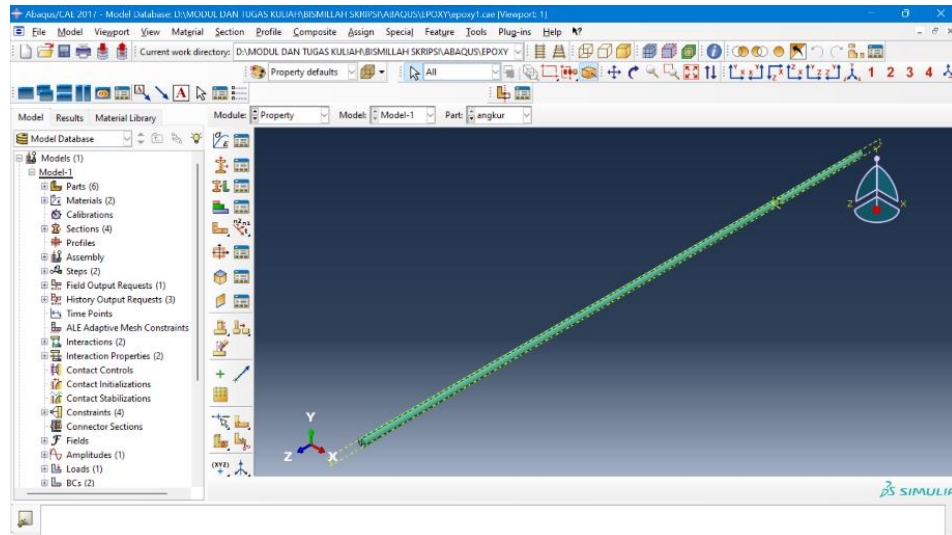
- Pilih *create cut extrude*, pilih sisi yang akan dilubangi. Pilih *icon* lingkaran, lalu buat lingkaran sesuai dimensi angkur.
- Pada kotak dialog *edit cut extrusion*, pilih *type* : *blind*, dengan *depth* sesuai dengan panjang angkur yang dibutuhkan. Klik OK.
- Tahapan-tahapan tersebut diterapkan pada elemen balok dan kolom.



Gambar 3.27. Tahapan melubangi elemen.

Pada model ini, tulangan longitudinal pada balok dihilangkan dan digantikan dengan angkur. Untuk memodelkan angkur, tahapan pemodelan antara lain:

- Pada *toolbox* pilih *create part*, masukkan data-data seperti *name* : angkur, *modelling space* : 3D, *type* : deformable, *shape* : solid – extrusion, dan nilai *approximate size*, klik *continue*.
- Pilih *create lines* : circle
- Buat bentuk lingkaran dengan diameter sebesar 30 mm
- Pada *edit base extrusion*, masukkan nilai *depth* sesuai panjang angkur yang akan dibutuhkan.



Gambar 3.28. Model *part* angkur.

2. *Property Module*

Pendefinisian material untuk angkur sama dengan material yang digunakan untuk tulangan baja. Hal-hal yang perlu dilakukan untuk mendefinisikan *property* model angkur adalah :

- Pada *module* : pilih *property*, pada *toolbox* pilih *create material*, masukkan data-data seperti nama material, lalu klik *general – density*, masukkan nilai massa jenis angkur, kemudian klik *mechanical*, pilih *elasticity*, kemudian *elastic*. Isikan nilai *modulus young* dan *Poisson's ratio*. Data-data ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

3. *Interaction module*

a) Hubungan kolom dengan balok

Pada model ini, balok dan kolom dianggap tidak dicor bersamaan, sehingga antara kolom dan kolom tidak akan melekat sempurna seperti pada model struktur monolit. Hubungan yang diterapkan yaitu dengan membuat suatu “*interaction*” antar beton dengan beton. Tahapan pembuatan *interaction* antara muka kolom dan muka balok adalah :

- Pada *toolbox*, pilih *create interaction property*, name : kolom-balok, type : *contact*, klik *mechanical* : *tangential behaviour*, *friction formulation* : *penalty*, kemudian masukkan nilai *friction coeff*. Nilai *friction coeff* = 0,8. Nilai ini diatur pada *PCI Design Handbook* (1999) Pasal 6.6.
- Klik *mechanical* : *normal behaviour*, *pressure - overclosure* : “*hard*” *contact*, klik pada kotak “*allow separation after contact*”. Kemudian klik OK.
- Pada *toolbox* klik *create interaction*, pilih *surface-to-surface contact*, klik *continue*. Pilih daerah *master surface* yaitu muka kolom dan *slave surface* adalah muka balok.
- Pada “*contact interaction property*”, pilih *interaction property* : kolom-balok, kemudian klik OK.

b) Hubungan angkur dengan balok

Angkur dengan balok dianggap dicor bersamaan, sehingga *type interaction* yang digunakan yaitu *interaction tie*. Tahapannya antara lain:

- Pada *toolbox*, klik *create constraint*, name : angkur-balok, type : *tie*, klik *continue*.
- Klik *master surface* yaitu bagian angkur di balok dan *slave surface* yaitu permukaan lubang di balok, kemudian klik OK.

c) Hubungan angkur dengan kolom

Angkur dengan kolom direkatan menggunakan perekat adhesi berupa epoksi. Pengaplikasian epoksi pada *Abaqus* dilakukan dengan cara membuat suatu *cohesive interaction* antara permukaan lubang kolom dengan angkur di daerah kolom. Tahapan-tahapan yang dilakukan antara lain:

- Pada *toolbox*, pilih *create interaction property*, name : angkur-kolom, type : *contact*, klik *mechanical* : *cohesive*

behaviour, traction-separation behaviour : *specify stiffness coefficients*, kemudian masukkan nilai *Knn*, *Kss*, dan *Ktt* sebesar

- Klik *mechanical : damage*, masukkan nilai normal dan shear yang merupakan nilai *bond stress ultimate*.
- Klik pada kotak “*specify damage evolution*”, masukkan nilai *total/plastic displacement = 3*.
- Klik pada kotak “*specify damage stabilization*” kemudian masukkan nilai *viscosity coefficient = 0,0001*. Klik OK.
- Pada *toolbox*, klik *create interaction*, pilih *surface-to-surface contact*, klik *continue*. Pilih daerah *master surface* yaitu muka angkur dan *slave surface* adalah bagian muka lubang angkur.
- Pada *sliding formulation*, klik *small sliding*.
- Pada “*contact interaction property*”, pilih *interaction property* : angkur-kolom, kemudian klik OK.

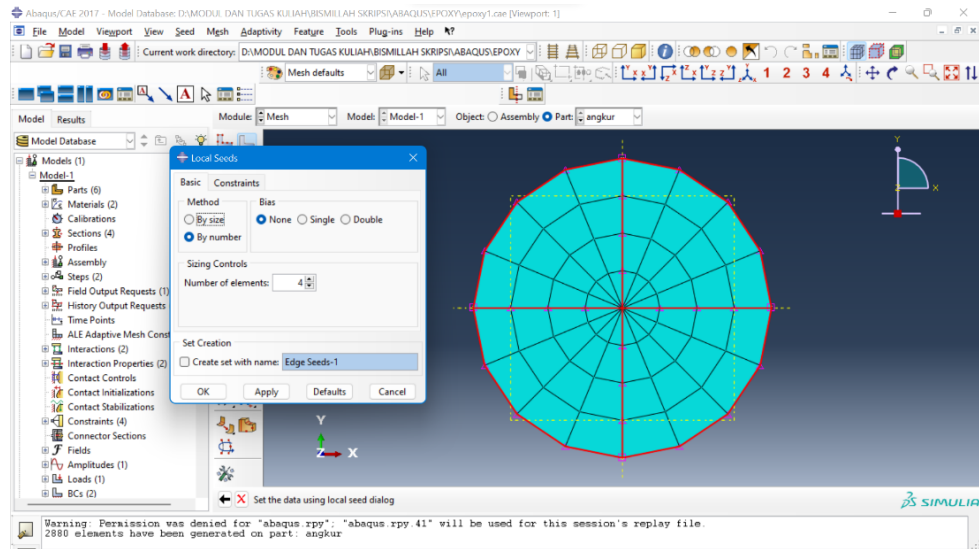
4. *Mesh module*

Pada *module* ini, model akan dibagi menjadi bagian yang lebih kecil. Ukuran bagian atau elemen-elemen kecil ini dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Tahapan pada *module* ini antara lain:

- Pilih *part* yang akan diterapkan *mesh*. Klik *seed part*, masukkan nilai *approximate global size* sebesar 60. Semakin kecil nilai *approximate global size*, maka akan semakin detail analisis yang dilakukan dan semakin berat pula program akan bekerja.
- Klik *assigned mesh control*, pilih *hex*, kemudian klik *structured*.
- Klik *mesh part*, kemudian klik *yes*.
- Untuk bagian yang berlubang dan memiliki penampang bulat seperti angkur, klik *seed edges*, pilih sisi-sisi yang akan

dibagi-bagi menjadi lebih kecil, klik *by number*, klik *number of elements = 4*, kemudian klik OK.

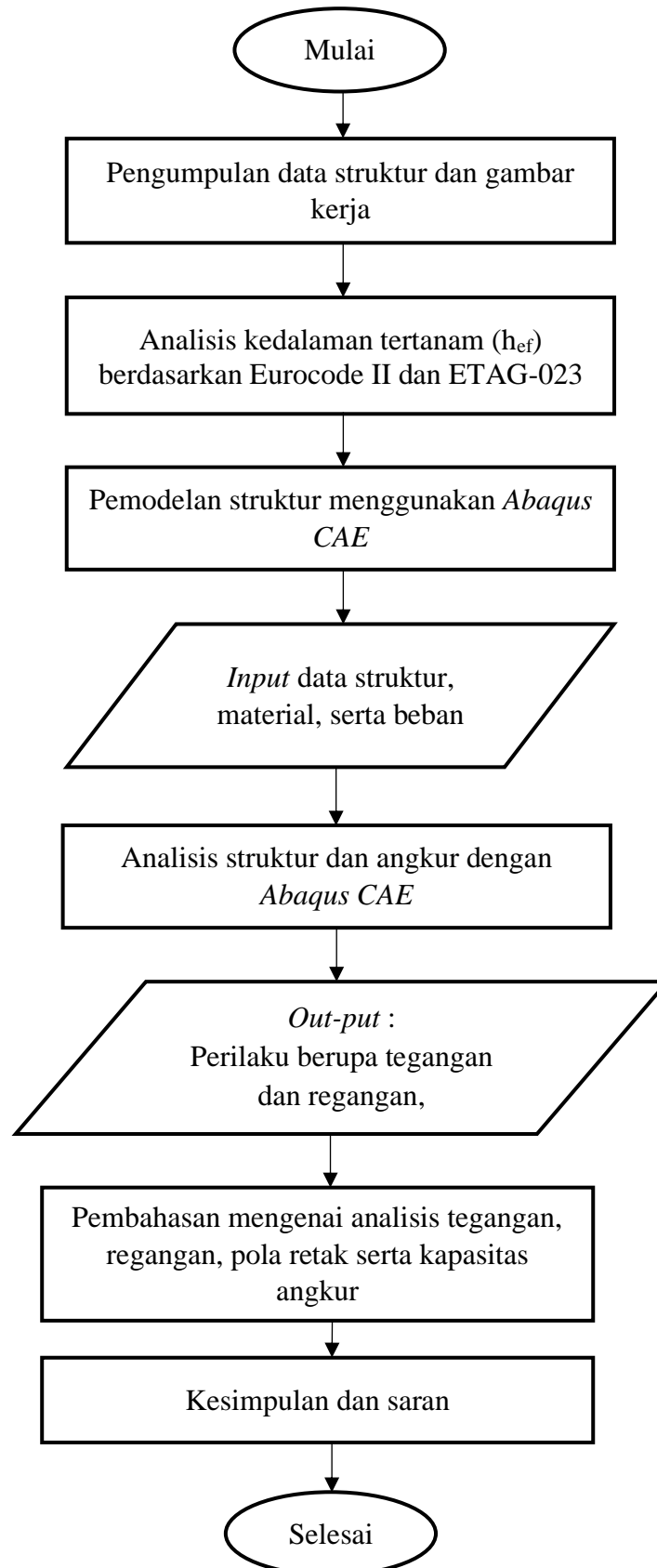
- Klik *assigned mesh control*, pilih *hex-dominated*, kemudian klik *sweep*, lalu *medial axis*, klik OK.



Gambar 3.29. Mesh pada angkur.

Untuk tahapan *module* lainnya yang tidak dijelaskan di atas, seperti *assembly module*, *step module*, dan *job module* dilakukan seperti tahapan yang dilakukan pada model struktur monolit.

3.4. Diagram Alir Penelitian



V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan, hasil analisa perilaku pada sambungan angkur yang dibandingkan dengan struktur apabila dicor secara monolit dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada struktur monolit, nilai *displacement* yang dihasilkan saat beban ultimit sebesar 222,252 kN diberikan adalah sebesar 4,263 mm. Sedangkan pada struktur yang dihubungkan dengan angkur, nilai *displacement* yang dihasilkan saat beban yang sama diberikan adalah sebesar 5,38 mm.
2. Selisih *displacement* antara kondisi struktur monolit dan struktur sambungan angkur adalah sebesar 1,117 mm dengan persentase sebesar 26,20% terhadap *displacement* monolit.
3. Pada struktur monolit, pada bagian atas balok di daerah sambungan, tegangan yang terjadi adalah berupa tegangan tarik, sedangkan pada bagian bawah balok di daerah sambungan terjadi tegangan tekan.
4. Perilaku *strain* atau tegangan pada struktur monolit terlihat saat beban sebesar 70,63 kN bekerja, nilai *strain* atau regangan yang dihasilkan adalah sebesar 0,00031 melebihi nilai kuat tarik beton sehingga mengakibatkan retakan pertama di daerah balok.
5. Pada struktur sambungan dengan angkur, nilai *stress* tarik berada pada daerah sekitar angkur baik di balok maupun kolom, sedangkan daerah

yang mengalami *stress* tekan terbesar berada pada daerah bagian bawah sambungan kolom dan balok.

6. Pada struktur sambungan dengan angkur, kerusakan terjadi saat nilai *stress* tekan yang dihasilkan mencapai 44,2 MPa.
7. Nilai *strain* yang mengakibatkan retakan pertama struktur sambungan angkur terjadi pada saat beban sebesar 31,53 kN.
8. Pola retak pada struktur monolit berada pada daerah sambungan struktur balok, sedangkan pada struktur sambungan dengan angkur terlihat jelas pada daerah di sekitar angkur.
9. Pola keretakan di sekitar angkur daerah kolom membentuk suatu kerucut sehingga jenis kegagalan yang terjadi berupa kegagalan kerucut beton. Kegagalan ini merupakan kegagalan paling umum terjadi dan merupakan tipe kegagalan yang diharapkan.
10. Kapasitas angkur dapat dikatakan aman untuk menerima beban sebesar 222,25 kN karena sudah memenuhi syarat dan nilai gaya tarik yang terjadi pada masing-masing angkur masih berada di bawah nilai *characteristic resistance* angkur dengan jenis angkur HILTI HIT-RE 500 V3.

5.2. Saran

Untuk mengembangkan penelitian di kemudian hari, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk melakukan penelitian selanjutnya dengan lebih baik, Adapun saran-saran tersebut antara lain:

1. Pengambilan data material seperti kuat tekan, kuat tarik, maupun *bond stress* sebaiknya diambil dari data yang didapatkan dari uji laboratorium agar hasil yang didapatkan semakin teliti.

2. Penelitian ini dapat dilakukan secara eksperimental dikemudian hari untuk bisa mendapatkan hasil yang lebih relevan sehingga dapat dibandingkan dengan penelitian ini.
3. Proses analisis dengan basis metode elemen hingga dapat menggunakan program lain selain *Abaqus CAE*, seperti program *Ansys* atau *Matlab*.

DAFTAR PUSTAKA

- Alhaidary, H dan Al-Tamimi, A. K. 2021. Importance Of Performance Certification for Post-Installed Anchors: An Experimental Assessment. *Structures* 29. 273–285.
- Amru, L. 2021. Analisis Kekuatan Bending Baja Karbon Rendah Dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Software Solidwork. Skripsi. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. SNI 2847:2019 *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD)*. Jakarta:Badan Standarisasi Nasional.
- Braimah, A., Guilbeault, R., dan Contestabile, E. 2004. High Strain Rate Behaviour of Chemically Bonded Steel Anchors. Canadian Explosives Research Laboratory (CERL). Report No. 20, Natural Resources Canada (Vol. 20).
- British Standards Institution. 2005. BS 4449:2005 Steel for The Reinforcement of Concrete – Weldable Reinforcing Steel – Bar, Coil and Decoiled Product – Specification. London:BSi.
- Claisse, P. A. 2016. Creep, shrinkage, and cracking of concrete. *Civil Engineering Materials*, 241–249.
- Dary, R.W., Barus, S., Tarigan J. 2014. Studi Numerik dan Kajian Eksperimental Perilaku Besi Beton Sebagai Angkur Penghubung Geser Akibat Geser Murni Pada Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Rekayasa Struktur & Infrastruktur*. 8(1). 70-82.
- European Committee for Standardization (CEN). 2004. *EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Belgium:CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). 2005. *EN 1993-1-3 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Belgium:CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). 2013. *EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 4: Design of Fastenings for Use in Concrete*. Belgium:CEN.

- European Organisation for Technical Approvals. 2010. ETAG 001 Edition 1997 : Guideline for European Technical Approval of Metal Anchor for Use in Concrete - Annex C : Design Methods for Anchorages. Belgium:EOTA.
- Gardner, L., et. al. 2019. Steel Design by Advanced Analysis: Material Modelling and Strain Limits. Engineering 5.
- Hilti Corporation. 2019. Hilti Anchor Fastening Technology Manual. Schaan:Hilti Corporation.
- Hilti Corporation. 2021. Hilti Anchor Fastening Technology Manual. Schaan:Hilti Corporation.
- Hognestad, E. 1951. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members. University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin Series No.399.
- Huda, A. Eksperimen Tarik Angkur Tipe Ekspansi Secara *Cast In Place* dan *Post Installed* dengan Kegagalan Breakout Beton. Skripsi. Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Mathern A, Yang J. A Practical Finite Element Modeling Strategy to Capture Cracking and Crushing Behavior of Reinforced Concrete Structures. *Materials*. 2021; 14(3):506.
- Misnaniati, dkk. 2017. Ketersediaan Fasilitas dan Tenaga Kesehatan Dalam Mendukung Cakupan Semesta Jaminan Kesehatan Nasional. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pelayanan Kesehatan*. 1(1). 6-16.
- Mubarok, H. 2019. Finite Element Analysis Perilaku Beton Bertulang dan Beton Prategang Menggunakan Software Abaqus 6.14. Skripsi. Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- Fédération internationale du béton (fib). 2010. *Model Code 2010 : First Complete Draft Volume 1*. DCC Document Competence Center Siegmund Kästl e.K, Germany.
- Pranata, Y.A. 2019. Metode Elemen Hingga. Universitas Kristen Maranatha. Bandung.
- Ridwan, I dan Saftarina F. 2015. Pelayanan Fasilitas Kesehatan : Faktor Kepuasan dan Loyalitas Pasien. *Majority*. 4(9). 20-26.
- Saeb, L. 2019. Finite Element Modelling of Anchorage to Concrete Systems at Different Strain Rates. Carleton University, Ottawa.

- Sajedi, S dan Huang, Q. 2017. Load-Deflection Behavior Prediction of Intact and Corroded RC Bridge Beams with or without Lap Splices Considering Bond Stress-Slip Effect. *Journal of Bridge Engineering*. Volume 22 Issue 1. January 2017. American Society of Civil Engineers.
- Setiawan, A. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. Jakarta:Erlangga.
- Sudarsana, I., Susila, I. Anggraini, L. 2019. Kinerja Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Perkuatan Pelat Baja dan Profil Siku Pada Kolom Dari Gedung Perkantoran 5 Tingkat. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, A Scientific Journal Of Civil Engineering*, Vol. 23 No. 1. Januari 2019.
- Tang, Chao-Wei, dan Chiu-Kuei Cheng. 2020. Modeling Local Bond Stress-Slip Relationships of Reinforcing Bars Embedded in Concrete with Different Strengths. *Materials* vol. 13,17 3701.
- Wiguntoro dan Apriyatno, H. 2020. Studi Eksperimental Perilaku *Pull-Out* Pada Angkur Mekanis dengan Perbandingan Kekuatan Metode Pemasangan *Cast-In-Place* dan *Post-Installed*. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020 Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*. ISSN: 2459-9727. 45-50.
- Wilden, H. 2010. *PCI Design Handbook: Precast And Prestressed Concrete*. Chicago:Precast/Prestressed Concrete Institute.