

SKRIPSI
**PREDIKSI PERILAKU NONLINIER HUBUNGAN TEGANGAN
REGANGAN PADA KOLOM PERSEGI DENGAN VARIASI RASIO
TULANGAN MEMANJANG MENGGUNAKAN ABAQUS**

OLEH
YURNY MAHU
07231911103



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KHAIRUN
2024

SKRIPSI

PREDIKSI PERILAKU NONLINIER HUBUNGAN TEGANGAN REGANGAN PADA KOLOM PERSEGI DENGAN VARIASI RASIO TULANGAN MEMANJANG MENGGUNAKAN ABAQUS

OLEH

Nama	: YURNY MAHU
NPM	: 07231911103
Program Studi	: Teknik Sipil
Pembimbing I	: Dr. Ir Arbain Tata, ST., MT., IPM
Pembimbing II	: Muhammad Taufiq Y.S., ST., MT

Diajukan Guna Melengkapi Syarat

Dalam Mencapai Gelar Sarjana Strata Satu (S-1)



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KHAIRUN
2024**

SKRIPSI

Prediksi Perilaku Nonlinier Hubungan Tegangan Regangan Pada Kolom Persegi Dengan Variasi Rasio Tulangan Memanjang Menggunakan *Abaqus*

OLEH:

YURNY MAHU

NPM: 0723 1911 103

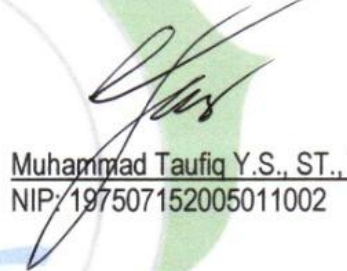
Telah Dipertahankan Didepan Dewan Penguji
Pada Tanggal 31 Juli 2024

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Arbain Tata, ST., MT., IPM
NIP: 197712092003121002

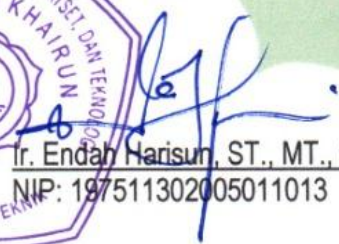
Pembimbing Pendamping



Muhammad Taufiq Y.S., ST., MT.
NIP: 197507152005011002

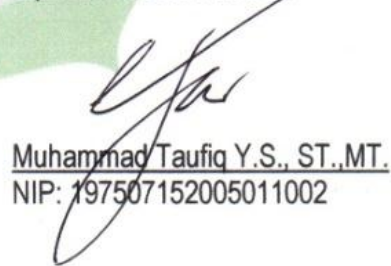
Mengetahui

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Khairun



Ir. Endah Harisun, ST., MT., CRP
NIP: 197511302005011013

Koordinator Program Studi Teknik
Sipil Universitas Khairun



Muhammad Taufiq Y.S., ST., MT.
NIP: 197507152005011002



SKRIPSI

Prediksi Perilaku Nonlinier Hubungan Tegangan Regangan Pada Kolom Persegi Dengan Variasi Rasio Tulangan Memanjang Menggunakan *Abaqus*

OLEH:

YURNY MAHU

NPM: 0723 1911 103

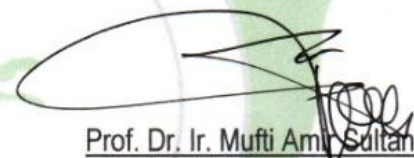
Telah Dipertahankan Didepan Dewan Penguji
Pada Tanggal 31 Juli 2024

Susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama

Ketua Penguji


Dr. Ir. Arbain Tata, ST., MT., IPM
NIP: 197712092003121002


Prof. Dr. Ir. Mufti Amir Sultan, ST., MT., IPM
NIP: 197202272003121001

Pembimbing Pendamping

Anggota Penguji


Muhammad Taufiq Y.S., ST., MT.
NIP: 197507152005011002


Ir. Imran, ST., M.Eng
NIP: 197904012005011003

Anggota Penguji


Sary Shandy, ST.MT
NIP: 1987092720201220013

Koordinator
Program Studi Teknik Sipil


Muhammad Taufiq Y.S., ST., MT.
NIP: 197507152005011002

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : YURNY MAHU

NIM : 0723 1911 103

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Skripsi : PREDIKSI PERILAKU NONLINIER HUBUNGAN TEGANGAN REGANGAN
PADA KOLOM PERSEGI DENGAN VARIASI RASIO TULANGAN
MEMANJANG MENGGUNAKAN ABAQUS

Dengan ini menyatakan bahwa hasil penulisan yang telah penulis buat ini merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apa bila dikemudian hari penulisan tugas akhir ini merupakan hasil plagiat atau penjiplakan terhadap karya orang lain, maka penulis bersedia mempertanggung jawabkan sekaligus bersedia menerima sanksi berdasarkan aturan tata tertib di Universitas Khairun.

Demikian Pernyataan ini penulis buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan

Penulis,



YURNY MAHU

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan syukur alhamdulillah kepada Allah Subhanallahu Wa Ta'ala kupersembahkan skripsi ini untuk orang-orang yang kusayangi.

1. Teruntuk ayah dan ibunda tercinta yang senantiasa mengasihi dan mendoakan dengan segala ketulusan juga pengorbanan hingga selalu berhasil menambah rasa kasih dan sayang ini terhadap kalian, sebab itu selalu ingin menjadi alasan kebahagiaan kalian yang berhak mendapatkannya adalah harapan besarku.
2. Teruntuk kakak dan adik tersayang yang selalu menjadi kilau dalam hariku dengan segala cerita indah yang tertulis selalu di hati.
3. Teruntuk teman-teman yang selalu menemani dan memberikan semangat kepadaku.

Moto

“ Dan Dia mendapatimu sebagai orang yang bingung, lalu Dia membarikan petunjuk”

(Q.S Ad-Duha :7)

“Bermimpilah setinggi langit lalu kembali sujud serendah tanah sebab KITA pasti masuk di dalamnya”

(Yurny Mahu)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, sebagaimana Ia telah memberikan nikmat kesehatan, kesempatan serta atas segala limpahan Rahmat dan Hidayah-Nya serta Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Skripsi dengan judul “PREDIKSI PERILAKU HUBUNGAN TEGANGAN REGANGAN DENGAN VARIASI RASIO TULANGAN MEMANJANG PADA KOLOM PERSEGI DENGAN MENGGUNAKAN ABAQUS”. Pada penulisan skripsi ini penulis harapkan mampu memberikan tambahan pengetahuan tentang efek dari variasi rasio tulangan memanjang pada kolom persegi menggunakan Finit Element method (FEM). terselesaikan penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dorongan dari berbagai pihak, sehingga penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada semua yang terlibat dalam penulisan ini.

1. Bapak Dr. Ridha Ajam, ST., MT. Selaku Rektor Universitas Khairun Ternate.
2. Bapak Ir. Endah Harisun, ST., MT., CRP Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Khairun Ternate.
3. Bapak Muhammad Taufiq Yuda Saputra, ST., MT. Selaku Koordinator Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Khairun Ternate.
4. Bapak Dr. Arbain Tata, ST., MT., IPM selaku dosen pembimbing utama dan sebagai penggagas dari pada munculnya judul yang kemudian penulis kembangkan menjadi sebuah skripsi, serta kepada Taufiq Yuda Saputra, ST., MT sebagai pembimbing pendamping atas petunjuk, arahan, serta bimbingannya dalam penulisan skripsi ini.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Mufti Amir Sultan, ST., MT., IPM selaku ketua Penguj, Ir. Imran ST., M.Eng selaku anggota penguji I dan Sary Shandy, ST., MT selaku anggota

penguji II. Atas saran yang telah diberikan sehingga penulis dapat mengembangkan penulisan skripsi ini.

6. Bapak Dr. Ir. Abdul gaus, ST., MT., IPM selaku penasehat akademik yang telah memberikan arahan, nasehat serta bimbingan selama perkuliahan,
7. Seluruh dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Khairun yang telah memberikan banyak ilmu selama perkuliahan.
8. Terimakasih yang setulus-tulusnya kepada kedua orangtua penulis Ayahanda Abdullah Mahu dan Ibunda Miti Lumbessy sebagai sumber kehidupan penulis yang telah mencurahkan segenap cinta dan kasih sayang dalam mendidik penulis, dan dengan penuh kesabaran dan kerelaan untuk tetap memberikan kepercayaan kepada penulis dalam usaha menggapai cita-cita. Adik saya M Sardi Mahu dan Kakak sarni mahu Amd, Kep, serta suaminya Humaidi A Yamani yang tiada henti-hentinya terus memberikan semangat dan dukungan kepada penulis. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan Rahmat, Kesehatan, Keberkahan kepada kalian.
9. Terimakasih kepada seluruh keluarga penulis yang telah membantu penulis dalam menempuh pendidikan tinggi di Universitas Khairun Ternate.
10. Terimakasih kepada teman-teman terbaik Riwanda i. Husen, ST, Safirah Afriati A.M, Diansari Safitri L, yang selalu memberikan dukungan dan semangat untuk penulis.
11. Terima kasih kepada M Abdul Walid R. Thaib yang selalu memberikan semangat dan dukungan kepada penulis.
12. Saudara-saudara seperjuangan penulis, dan teman-teman angkatan 2019 terimakasih atas bantuan dan dukungan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

Di dalam penulisan Skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan yang belum dapat penulis selesaikan. Olehnya sangat diharapkan saran dan kritikan dari pembaca sebagai masukan yang sangat ternilai harganya. Sehingga penulis dapat menyempurnakan penulisan Skripsi ini.

Wassalamu'alakum Warahmatullahi Wabarrakathu

Ternate, 31 Juli 2024

Yurny Mahu

ABSTRAK

Yurny Mahu

PREDIKSI PERILAKU NONLINIER HUBUNGAN TEGANGAN REGANGAN PADA KOLOM PERSEGI DENGAN VARIASI RASIO TULANGAN MEMANJANG MENGGUNAKAN ABAQUS.

Kata Kunci : Struktur, Balok, Variasi Rasio Tulangan, Finit Element Analysis

Karakteristik atau perilaku beton pada umumnya diperoleh dengan pengujian eksperimental di laboratorium. Pengujian ini akan memberikan gambaran mengenai respon struktur berdasarkan keadaan nyata. Namun pada dasarnya, untuk bisa mendapatkan data yang valid, simulasi tersebut perlu diuji dengan percobaan dan biaya yang besar, tenaga yang tidak sedikit, waktu yang lama, serta pelaksanaan yang cukup sulit. Maka dibutuhkan pendekatan yang tidak memerlukan biaya terlalu besar dan waktu yang lama. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan yaitu dengan metode elemen hingga (finite element method).

Pemodelan Finite Element Method ini menggunakan program komputer Abaqus 6.14 data material yang digunakan berdasarkan karakteristik material yang diketahui dalam penelitian terdahulu. Dalam penelitian ini kolom yang dimodelkan memiliki tinggi 800 mm dan lebar 225 mm serta panjang 225 mm. Kolom yang dimodelkan memiliki 4 variasi kolom. Kolom A merupakan kolom polos. Kolom B menggunakan 4 $\varnothing$ 10 tulangan memanjang. Kolom C menggunakan 8 $\varnothing$ 10 tulangan memanjang. Kolom D menggunakan 12 $\varnothing$ 10 tulangan memanjang. Data yang diamati adalah beban maksimum, pola retak, tegangan dan regangan.

Dari hasil simulasi menggunakan program Abaqus 6.14 kolom B,C,D menunjukkan pengaruh jumlah tulangan memanjang jika semakin banyak tulangan memanjang pada kolom maka semakin tinggi nilai tegangan regangan yang didapat. Dari hasil penelitian software yang didapat dengan membandingkan hasil pada experimental maka diperoleh perilaku tegangan dan regangan Kolom A (Kolom Polos) didapatkan kuat tekan ultimate beton sebesar 21,87 Mpa dan regangan ultimate 0,0032 mm. berdasarkan hasil dari experimental, tegangan puncak adalah 22,24 Mpa dan regangan 0,0020. Perilaku material yang digunakan pada FEM menggunakan pendekatan teoritis sehingga menyebabkan sedikit perbedaan dengan hasil experimental, namun diakhir pembebanan nilai yang dikeluarkan mendekati dengan hasil experimental. Kemudian Tegangan regangan yang terjadi saat beban puncak pada Kolom C (8 tulangan memanjang) didapatkan kuat tekan ultimate beton 30,51 Mpa dan regangan ultimate 0,0055 dan hasil dari experimental, tegangan puncak adalah 29,64 Mpa dan regangan 0,00532. Sementara Pola retak pada kolom A bisa dikatakan serupa dengan adanya retak garis dan untuk Kolom C retak pada permukaan sisi kolom dan bagian dalamnya hanya mengalami sedikit kerusakan ini mewakili kerusakan yang terjadi pada hasil uji experimental.

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	v
KATA PENGANTAR.....	viii
ABSTRAK	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penulisan.....	4
1.4 Manfaat Penulisan	4
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Pengertian dan Prinsip Dasar Kolom	7
2.2 Tipe Kolom	8
2.3 Beton Bertulang	8

2.4 Baja Tulangan.....	9
2.5 Metode Elemen Hingga.....	9
2.5.1 Kelebihan dan Kekurangan Metode Elemen Hingga	10
2.5.2 Program FEA (Finite Element Analysis)	11
2.6 Nonlinier	11
2.7 Program Abaqus.....	14
2.7.1 Pemodelan Elemen Hingga pada Abaqus.....	15
2.7.2 Preprocessing.....	18
2.7.3 Simulasi.....	20
2.7.4 Postprocessing	20
2.7.5 Satuan Unit Abaqus	21
2.8 Model Konstitutif Beton.....	21
2.8.1 Prinsip Kegagalan Beton	21
2.8.2 Parameter Concrete Damage Plasticity.....	22
2.8.3 Tegangan Regangan Desak Beton	23
2.8.4 Parameter Kerusakan.....	25
2.9 Penelitian terdahulu	27
BAB III METODOLI PENELITIAN.....	29
3.1 Jenis Penelitian	29

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	29
3.2.1 Waktu Penelitian.....	29
3.2.2 Lokasi Penelitian	30
3.3 Data Material	30
3.3.1 Hasil Pendekatan Konstitutif Material Beton	30
3.3.2 Tegangan Regangan Tekan Beton	30
3.3.3 Tegangan Regangan Tarik Beton.....	32
3.4 Peralatan Penelitian	36
3.5 Objek Penelitian	36
3.6 Pemodelan Program Abaqus.....	37
3.7 Diagram Alir Penelitian	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Hasil Analisis Elemen Hingga ABAQUS 6.14.....	40
4.1.1 Kolom Polos	40
4.1.2 Kolom 8 Tulangan Utama	41
4.2 Perilaku Nonlinier.....	42
4.2.1 Perbandingan Experimental & FEM (kolom Polos).....	43
4.2.2 Perbandingan Experimental & FEM (kolom 8 Tulangan Utama).....	45
4.2.3 Hasil Kolom FEM	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53

5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 unit yang digunakan Ketika Menginput Data.....	21
Tabel 2.2 Parameter Concrete Damage Plasticity	23
Tabel 3.1 Rencana Waktu Penelitian.....	29
Tabel 3.2 Parameter Konstitutif Tekan Beton	30
Tabel 3.3 Parameter Konstitutif Tarik Beton.....	32
Tabel 3.4 Parameter Konstitutif Material Baja.....	33
Tabel 3.5 Parameter Density dan Material Elastis.....	34
Tabel 3.6 Parameter Plasticity.....	35
Tabel 3.7 Parameter Density dan Elastis Baja	35
Tabel 3.8 Sifat Mekanis Baja	35
Tabel 3.9 Model Benda Uji Penelitian	37
Tabel 4.1 Tegangan Regangan Kolom Polos.....	40
Tabel 4.2 Tegangan Regangan Kolom 8 Tulangan Utama	41
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Software & Experimental RCP.....	44
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Software & Experimental RCH T8.....	45
Tabel 4.5 Tegangan Regangan Kolom 4 Tulangan Memanjang	48
Tabel 4.6 Tegangan Regangan Kolom 12 Tulangan Memanjang	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Program Komputer yang berbasis FEA	11
Gambar 2.2 Halaman Tampilan Program ABAQUS	14
Gambar 2.3 Jenis – Jenis Model Elemen	16
Gambar 2.4 Elemen Tipe C3D8R dan C3D4	16
Gambar 2.5 Truss Element	17
Gambar 2.6 Kerangka Dalam Menjalankan Program ABAQUS.....	18
Gambar 2.7 Perilaku Beton Terhadap Beban	25
Gambar 3.1 Tegangan Regangan Tekan Beton	31
Gambar 3.2 Tegangan Regangan Tarik Beton	33
Gambar 3.3 Model Kolom Persegi yang dianalisis	36
Gambar 3.4 Membuka Abaqus / CAE v.614	37
Gambar 3.5 Tampilan Awal Abaqus / CAE v.614	38
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian.....	39
Gambar 4.1 Hubungan Tegangan dan Regangan Kolom Polos.....	40
Gambar 4.2 Hubungan Tegangan dan Regangan Kolom 8 Tulangan Utama	41
Gambar 4.3 Perbandingan Kolom Polos FEM dan Experimental.....	44
Gambar 4.4 Perbandingan Pola Retak Experimental & FEM (BN)	45
Gambar 4.5 Perbandingan RCH T 8 FEM dan Experimental	46
Gambar 4.6 Perbandingan Pola Retak Experimental & FEM (RCH T8)	47

Gambar 4.7 Kolom 4 Tulangan Memanjang.....	47
Gambar 4.8 Tegangan Regangan Kolom 4 Tulangan Memanjang.....	48
Gambar 4.9 Kolom 12 Tulangan Memanjang.....	49
Gambar 4.10 Tegangan Regangan Kolom 12 Tulangan Memanjang.....	50
Gambar 4.11 Grafik Gabungan Tegangan Regangan Kolom	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material yang tahan terhadap gaya tekan namun lemah terhadap gaya tarik. Maka dari itu material beton dalam sistem struktur sering dikombinasikan dengan material yang kuat dalam menahan tarikan, seperti material baja tulangan sebagai upaya meningkatkan material beton dalam menahan gaya tarik, kombinasi tersebut biasa disebut dengan beton bertulang.

Komponen-komponen struktur gedung kebanyakan terbuat dari beton bertulang misalnya pondasi, kolom, sloof, plat lantai dan kolom. Setiap komponen struktur menahan beban rencana yang diberikan. Suatu struktur bangunan tentunya di rencanakan sedemikian rupa agar terpenuhi kriteria-kriteria yang diinginkan. Diantara salah satu dasar dari perencanaan konstruksi adalah menentukan jenis dari struktur yang akan dibuat, dapat berupa struktur beton, struktur baja ataupun struktur komposit yaitu gabungan antara struktur beton dan baja. setiap material struktur baik itu baja ataupun beton memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

Kolom sebagai penerus beban seluruh bangunan ke pondasi. Beban sebuah bangunan yang dimulai dari atap akan diterima oleh kolom. Seluruh beban yang diterima oleh kolom kemudian didistribusikan ke permukaan tanah bawahnya. Dengan begitu, kolom pada sebuah bangunan memiliki fungsi yang sangat vital. Jika melihat penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa kolom merupakan termasuk struktur utama bangunan untuk meneruskan berat bangunan dan beban lain seperti beban hidup (manusia dan barang-barang. Maupun beban hembusan angin. Keruntuhan dan

kegagalan struktur pada kolom menjadi titik kritis yang dapat menyebabkan runtuhnya bangunan. Namun yang perlu diingat juga selain harus melalui proses perhitungan yang tepat, kondisi tanah pun harus benar-benar mampu menerima beban dari atas pondasi.

Komponen struktur yang langsung menerima gaya lateral akibat gempa adalah kolom sehingga desain dan pendetailan tulangan kolom memerlukan penanganan yang khusus. Seperti jarak dan jumlah tulangan utama, diketahui juga bahwa kemampuan suatu struktur pada saat menerima beban gempa tergantung pada seberapa besar pemancaran energi potensial dan pembentukan sendi plastis pada kolom, sehingga struktur tidak runtuh secara mendadak akibat gempa yang kuat dan dapat memastikan stabilitas struktur untuk memelihara kapasitasnya terhadap beban aksial selama terjadi gempa.

Selama masa layannya kolom beton bertulang dapat mengalami penurunan kekuatan, hal ini bisa disebabkan oleh cuaca, korosi pada tulangan baja, beban yang berlebih, kebakaran atau gempa bumi. Pada saat dimana beban ditingkatkan pada kolom tersebut, sehingga mengakibatkan retak-retak pada bagian kolom. Penambahan tingkat beban secara terus menerus mengakibatkan kegagalan element struktur saat beban eksternal mencapai kapasitas element tersebut. Untuk itu agar kolom tetap dapat menahan beban yang diterimanya perlu dilakukan perkuatan pada struktur tersebut.

Salah satu dari metode perkuatan struktur yang di pakai yaitu *fine mesh* yang dilakukan pengujian secara eksperimental di laboratorium. Pengujian ini memberikan gambaran mengenai respon struktur berdasarkan keadaan nyata seperti yang di lakukan Domingus Bakarbessy (2008) dalam penelitiannya “ Efektifitas pengekan *fine mesh* pada kolom persegi beton bertulang “, menunjukkan tegangan puncak beton terkekang

mencapai 1,73% - 7,49%. kolom yang pakai tulangan sengkang *Fine Mesh* + sengkang biasa mempunyai daktilitas yang hampir sama dengan kolom yang pakai sengkang biasa saja. Terdapat kemiripan bentuk kurva tegangan-regangan pada hasil eksperimental kolom RCFMH dan RCH. Namun pada dasarnya, untuk bisa mendapatkan data yang valid, simulasi tersebut perlu diuji dengan percobaan dan biaya yang besar, tenaga yang tidak sedikit, waktu yang lama, serta pelaksanaan yang terbilang sulit. Oleh karena itu dengan kemajuan teknologi saat ini, studi experimental tersebut dapat dilakukan tanpa adanya pengujian dilaboratorium. Melainkan specimen dari experimental tersebut dimodelkan menggunakan *software* komputer. Hal ini tentunya dinilai positif karena dapat meminimalisir waktu, tenaga dan biaya pengujian yang dilakukan secara experimental. Oleh sebab itu, penulis berencana melakukan penelitian mengenai efek variasi rasio tulangan memanjang pada kolom beton persegi dari hasil penelitian experimental dengan menggunakan data kolom RCP dan RCH pada penelitian tersebut. dengan menggunakan analisis hasil dari *software* pemodelan yang berbasis metode element hingga yaitu *Software ABAQUS CAE 6.14*

Abagus adalah program simulasi rekayasa didasarkan pada *Finite Element* pada titik yang ditinjau. *Finite Element Analysis* dibangun sebagai metode numerik untuk analisa tegangan dan regangan dalam kolom.

Dipilihnya *software ABAQUS* didasari dengan kelebihanannya dalam memasukan data hasil eksperimen kedalam tabel *properties* material sebagai input data dari material beton dengan lebih akurat. Hasil yang didapatkan dengan *software ABAQUS 6.14* ini akan divalidasikan dengan hasil pengujian secara experimental.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka tugas akhir ini akan diberi judul “PREDIKSI PERILAKU NONLINIER HUBUNGAN TEGANGAN REGANGAN PADA KOLOM PERSEGI DENGAN VARIASI RASIO TULANGAN MEMANJANG MENGGUNAKAN ABAQUS”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun pembahasan yang dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana tingkat validasi dari hasil software berupa tegangan regangan dengan hasil experimental terhadap kolom.
2. Bagaimana kesamaan pola retak model kolom dari hasil software dengan hasil secara experimental.

1.3 Tujuan Penulisan

1. Untuk mengetahui tingkat akurasi simullasi software berbasis element hingga terhadap kolom berdasarkan keadaan nyata.
2. Untuk mengetahui pola keretakan kolom dari hasil software dengan hasil experimental.

1.4 Manfaat Penulisan

1. Untuk dapat memberikan pemahaman perilaku tegangan-regangan kolom beton bertulang dengan menggunakan program *ABAQUS*, dan menjadi sarana baru dalam penelitian serupa.
2. Untuk dapat divalidasi dengan hasil penelitian secara experimental dengan bantuan *software* sehingga penelitian tersebut lebih akurat.

3. Untuk dapat menjadi suatu dasar pertimbangan dalam menggunakan *software* pada struktur sehingga dapat meningkatkan efisiensi perkiraan dari segi waktu, biaya, dan tenaga.
4. Memberikan tambahan informasi pada penelitian selanjutnya dibidang pemodelan.

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah diatas, penulis memberikan batasan masalah agar pembahasan sesuai dengan judul penelitian, yaitu sebagai berikut :

1. Data analisis menggunakan data sekunder dari penelitian yang di lakukan oleh Dominggus Bakarbessy (2008) dalam thesisnya yang berjudul “Efektifitas Pengekangan Fine Mesh Pada Kolom Persegi Beton Bertulang”.
2. Pemodelan dilakukan menggunakan program komputer berbasis *Finnite Element* yaitu *ABAQUS* versi 6.14.
3. Kolom yang ditinjau dalam keadaan elastis.
4. Kolom yang dimodelkan yaitu kolom persegi dan merupakan kolom pendek.
5. Analisis yang ditinjau / divalidasikan berupa :
 - a) Model kolom polos (RCP) dan kolom dengan 8 tulangan utama. (RCH).
 - b) Pola retak kolom.
6. Material beton yang dipakai spesifikasi $f_c = 22,2$ mpa

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini ditujukan untuk memberikan gambaran secara garis besar isi dari setiap bab yang akan dibahas pada tugas akhir ini. Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, manfaat penulisan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian tentang dasar-dasar teori yang digunakan dalam penelitian perilaku tegangan regangan kolom beton bertulang dengan menggunakan *ABAQUS*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi pembahasan tentang gambaran umum, metode yang digunakan dan penjelasan mengenai langkah-langkah yang akan dilakukan dalam menganalisa perilaku kolom beton bertulang dengan menggunakan *ABAQUS*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran-saran mengenai tindakan yang perlu ditempuh agar hasil yang diperoleh berikutnya lebih maksimal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian dan Prinsip Dasar Kolom

Dalam setiap struktur bangunan diperlukan adanya kolom, elemen tersebut diperlukan untuk meneruskan beban-beban yang terjadi pada struktur bangunan ke pondasi. Beban yang terjadi dapat berupa beban mati, hidup, angin, dan gempa, beban dipikul oleh balok tetapi untuk menyalurkannya yang diterima balok diperlukan kolom untuk menyalurkan beban-beban ke pondasi, sehingga kolom menerima beban aksial yang lebih besar dari pada balok.

Prinsip-prinsip tegangan dan regangan kolom tidak jauh berbeda dengan balok, tetapi perlu ditekankan bahwa pada kolom terdapat penambahan faktor tekan tidak hanya momen lentur. Maka perlu dilakukan penyesuaian persamaan balok untuk kolom yang mengalami kombinasi beban aksial yang lentur.

Perencanaan kolom yang detail diperlukan adanya tulangan. Tulangan pada kolom yang mendominasi adalah tulangan tekan karena perilaku kegagalan tekan dalam kasus-kasus dengan rasio antara beban aksial dengan momen lentur yang besar tidak dapat dihindari.

Prinsip-prinsip yang mendasari perhitungan kekuatan kolom adalah sebagai berikut :

- 1) Distribusi regangan linier terjadi terjadi sepanjang ketebalan kolom.
- 2) Tidak ada gelincir antara beton dan baja (yaitu, regangan dalam baja dan beton yang berhubungan adalah sama).

- 3) Regangan beton diperbolehkan maksimum pada saat kegagalan untuk tujuan perhitungan-perhitungan kekuatan.
- 4) Tahanan tarik beton dapat diabaikan dan tidak diperhitungkan didalam perhitungan.

2.2 Tipe Kolom

Tipe kolom berdasarkan bentuk dan susunan tulangan dapat di klasifikasi menjadi 3 tipe kolom sebagai berikut :

- 1) Kolom persegi atau bujur sangkar dengan tulangan longitudinal dan tulangan lateral.
- 2) Kolom bulat dengan tulangan longitudinal dan tulangan lateral berupa sengkang atau spiral.
- 3) Kolom komposit dimana profil baja diselimuti oleh beton. Bentuk struktur tersebut dapat ditempatkan di dalam rangka tulangan

Kolom beton bertulang akan meningkatkan kekuatannya apabila dilakukan pengekangan. Pada umumnya pengekangan dilakukan menggunakan sengkang baik itu berbentuk segi empat atau berbentuk spiral.

2.3 Beton Bertulang

beton bertulang adalah material komposit dimana tulangan baja disusun ke dalam beton sedemikian rupa. Berfungsi menahan gaya tarik dari struktur. Kedua material tersebut bekerja sama untuk menahan gaya-gaya yang bekerja pada elemen tersebut.

Beton bertulang mempunyai sifat yaitu kuat terhadap tekan tapi lemah terhadap tarik. Beban tarik pada beton bertulang di tahan baja tulangan, sedangkan beban tekan cukup di tahan oleh beton.

Dibalik kelebihan yang dimiliki beton bertulang jika dibandingkan dengan bahan material lain, beton bertulang memiliki masalah yang dapat mengurangi keunggulannya, diantara masalah yang sering dijumpai adalah masalah keretakan yang terjadi pada bahan tersebut, keretakan pada beton bertulang dapat timbul pada saat pra konstruksi dan pasca konstruksi.

2.4 Baja Tulangan

Penempatan baja tulangan dalam suatu penampang beton adalah untuk menahan gaya tarik yang bekerja pada penampang beton adalah untuk menahan gaya tarik yang bekerja pada penampang tersebut, ada juga jenis baja tulangan, pertama tulangan polos (*plain bar*) dan tulangan ulir (*deformed bar*) serta SNI menggunakan simbol BJTP (baja tulangan polos) dan BJYD (baja tulangan ulir).

Modulus elastisitas baja tulangan di tentukan berdasarkan tegangan regangan dimana antar mutu baja yang satu dengan yang lain tidak banyak bervariasi. Ketentuan SK SNI T-15-1991-03 menetapkan bahwa modulus elastisitas baja adalah 200000 Mpa, sedangkan modulus elastisitas untuk beton prategang harus dibuktikan dan ditentukan melalui pengujian oleh pabrik.

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk mendapatkan solusi dari persamaan differensial, baik berupa (*Ordinary Differential Equation*) ataupun (*partial Differential Equation*) karena persamaan *differensial* seringkali dipakai sebagai model dalam permasalahan *engineering* maka penting untuk memahami dan menerapkan metode elemen hingga (MEH).

Pada awalnya metode elemen hingga (MEH) dikembangkan untuk memecahkan masalah dibidang mekanika benda padat (Solid Mechanic), akan tetapi kini MEH sudah mengalami perkembangan kehampir semua permasalahan engineering seperti mekanika fluida (*Fluid Mechanich*), perpindahan panas (*Heat Transfer*), elektromagnetik (*Electro Magnetism*), getaran (*vibration*), analisis model (*Model Analysis*), dan banyak lagi problem engineering lainnya.

Proses inti dari metode element hingga (*MEH*) adalah dengan membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau element-element yang mana solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Dari solusi yang ada pada setiap element jika digabungkan akan menjadi solusi *problem* secara keseluruhan.

2.5.1 Kelebihan dan Kekurangan Metode Elemen Hingga

Menurut yerri susatio, diantara kelebihan dalam menggunakan metode element hingga adalah sebagai berikut :

1. Dapat dengan mudah dianalisa benda dengan bentuk yang tidak teratur.
2. Tidak terdapat kesulitan dalam menganalisa suatu benda pada struktur.
3. Pemodelan dari suatu benda yang memiliki komposisi dari material yang berlainan dapat dilakukan dengan meninjau yang dilakukan secara individu untuk setiap element.
4. Dapat menangani berbagai macam syarat batas dengan jumlah tak terbatas.
5. Variasi dalam ukuran element memungkinkan untuk dapat memperoleh detail analisa yang diinginkan.
6. Dapat memecahkan masalah-masalah dinamik.

Adapun untuk kekurangan dalam metode ini adalah diperlukannya komputer sebagai sarana untuk menghitung dengan cepat dan akurat.

2.5.2 Program FEA (*Finite Element Analysis*)

Finite element (FE) merupakan salah satu dari metode numerikal yang paling sering digunakan dalam menyelesaikan suatu permasalahan analisis struktur. dikarenakan begitu kompleksnya dalam menganalisa suatu permasalahan struktur, sehingga dibutuhkan waktu yang lebih lama dalam menyelesaikannya. untuk mempermudah dan mempersingkat waktu dalam menyelesaikan suatu permasalahan struktur, maka dibuatlah program komputer yang berbasis *FEA (Finite Element Analysis)*. Saat ini sudah banyak program-program berbasis *FEA* yang tersedia dan siap digunakan diantaranya adalah : *ANSYS, NASTRAN, HYPERMESH, ATENA, LSDYNA, ABAQUS* dan lain-lain.



Gambar 2.1 Program komputer yang berbasis FEA (*Finite Element Analysis*)

(Sumber : Yogi, 2015)

2.6 Nonlinier

Nonlinier adalah suatu sistem yang menggambarkan hubungan antara variabel tidak mengikuti atau mematuhi pola linier atau garis lurus. Perilaku nonlinier merujuk pada situasi dimana hubungan antara variabel tidak dapat dijelaskan atau diprediksi

secara langsung sebagai suatu garis lurus. Sistem nonlinier cenderung memiliki respons yang kompleks dan tidak proporsional terhadap perubahan inputnya. Nonlinier seringkali muncul ketika ada interaksi yang kompleks antara variabel. Hubungan linier menghasilkan garis lurus jika diplot pada grafik. Hubungan nonlinier tidak menghasilkan garis lurus melainkan lengkungan berbentuk kurva.

➤ Analisis Nonlinier

Non-linearitas material

Ketika material bergerak ke zona melebihi kekuatan luluhnya, maka material tersebut tidak lagi berperilaku linier. Ada banyak hal yang akan terjadi jika material masuk kedalam zona ini:

- **Deformasi Permanen:** artinya ketika material dibongkar maka material tersebut tidak akan kembali ke bentuk atau posisi semula. Misalnya, jika Anda mengambil kantong plastik dan meregangkannya, setelah titik tertentu meskipun Anda melepaskan kantongnya, Anda akan melihat stretch mark permanen. Hal ini disebut deformasi permanen.
- **Retak:** umumnya retak juga terjadi pada desain linier, namun retak pada linier namun retak pada beton kita abaikan, meskipun tetap mempertimbangkan berkurangnya kekakuan komponen struktur pada saat melakukan desain seismik, namun tetap merupakan nilai kekakuan perkiraan. Sedangkan dalam analisis nonlinier kita memantau keretakan sehingga beton akan retak dan komponen akan kehilangan kekakuannya.
- **Rotasi balok:** ketika balok dikenai momen yang lebih besar dari kapasitasnya, balok tidak lagi menahan momen, melainkan berputar dan

membentuk engsel plastis dan mulai menghamburkan energi. Ini merupakan bagian dari non-linieritas material material tetapi untuk kurva balok tetapi untuk balok disebut kurva tulang punggung (hubungan FD).

- **Disipasi energi:** inilah yang terjadi dalam analisis nonlinier apabila suatu komponen struktur melebihi kapasitasnya (batas elastis), maka komponen tersebut akan mengalami pengerasan regangan atau retak dan akan mulai kehilangan kekakuannya yang juga berarti bahwa kekakuan total struktur atau bangunan juga ikut berubah. Jika kehilangan kekakuan cukup signifikan dan hasil atau keseimbangan energi tidak menyatu, proses yang sama akan diulangi lagi dan melakukan analisis lagi. Siklus ini akan berlanjut hingga akurasi yang diinginkan tercapai, tetapi dengan menggunakan modifikasi kekakuan struktur yang direvisi karena retak atau material mejadi plastis. Dengan demikian, analisi nonlinier membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan analisis linier karena hilangnya kekakuan dan sifat iteratifnya. analisis linier tidak dapat memberikan gambaran lengkap tentang apa yang bisa terjadi pada struktur bila terjadi gempa.

Secara umum, analisis nonlinier memiliki empat teknik dasar :

1. Model kolom balok nonlinier serbaguna
2. Model kolom balok engsel plastik
3. Model fenomenologis
4. Model elemen hingga shell

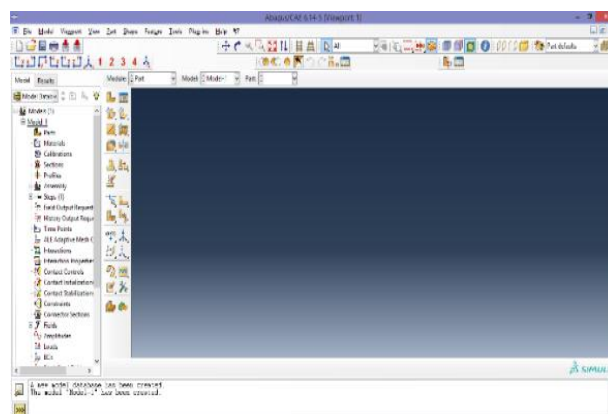
➤ Model kolom balok nonlinier

Elemen balok umumnya tidak menggabungkan nonlinier geometris pada tingkat elemen dan beberapa elemen balok disepanjang komponen struktur diperlukan untuk memodelkan respons tekuk secara akurat.

Persamaan kesetimbangan biasanya dievaluasi dalam kondisi terdeformasi, yaitu perpindahan terbesar. Kekakuan diintegrasikan secara numerik dari distribusi tegangan pada titik-titik diseluruh penampang akibat aksi gabungan gaya aksial dan momen.

2.7 Program Abaqus

Abaqus merupakan *software* dengan berbagai macam program yang dapat melakukan simulasi dan rekayasa yang didasari oleh metode elemen hingga, yang mampu memecahkan suatu masalah struktur dari mulai analisa linier sederhana sampai dengan simulasi non linier yang kompleks. Program ini dapat memodelkan semua geometri, dan juga mempunyai daftar luas dari model material yang mampu mensimulasikan perilaku bahan material, termasuk karet, logam, polimer, beton, dan bahan geoteknik seperti batuan dan tanah.



Gambar 2.2 Halaman tampilan program abaqus

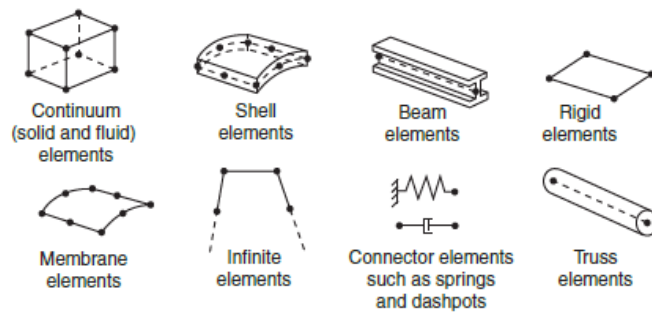
(Sumber : Program *Abaqus* versi 6.14)

Abaqus dapat memberikan berbagai kemudahan untuk simulasi aplikasi linier dan nonlinier. *Abaqus* dapat memodelkan beberapa bagian elemen dengan berbagai geometri bagian elemen dengan material model yang sesuai dan dapat menetapkan interaksi setiap elemen. Dalam analisis yang non linier, *abaqus* dapat memilih nilai penjumlahan beban yang akurat dan toleransi konvergensi dan terus menyesuaikan pada saat proses analisis untuk membuktikan bahwa didapatkan solusi yang akurat dan efisien pada saat analisis.

Kelebihan lain yang dimiliki *abaqus* adalah hasil dari analisisnya bisa langsung dapat dilihat bersamaan dengan jalannya simulasi. Sementara pada metode analitik yang merupakan suatu formulasi dari angka-angka, yang mana dibutuhkan pemahaman konsep-konsep dasar dan penguasaan rumus dalam menganalisis sebuah kasus, hasil plot tidak dapat langsung dilihat sebagaimana hasil dari analisis pada *abaqus*.

2.7.1 Pemodelan Elemen Hingga Pada *Abaqus*

Beberapa parameter awal diantaranya sifat material, geometri dan pemilihan solusi untuk memecahkan masalah menjadi suatu bagian yang penting. Konsistensi *Abaqus* dalam mengembangkan *software* memberikan kemajuan dalam ketepatan permodelan material, geometrik dan model pembebanan sehingga dapat memperoleh hasil yang eksak dan mendekati kondisi nyata. *Abaqus* memberikan banyak pilihan pemodelan yang dapat digunakan. pengguna dapat memilih model yang sesuai dengan geometrik, material maupun perilaku benda uji yang nantinya akan dimodelkan. Gambar 2.3 menunjukkan beberapa jenis model yang dapat dipilih secara langsung pada program *Abaqus*.

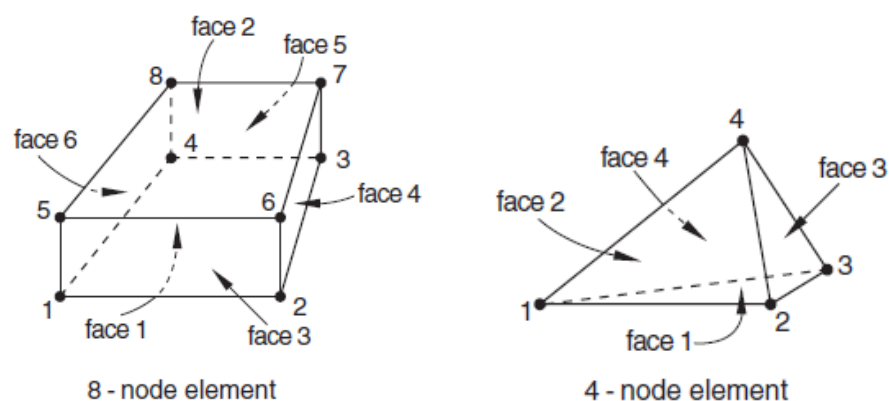


Gambar 2. 3 Jenis -Jenis Model Elemen

(Sumber : *Abaqus manual*)

1. Tipe *Solid Element 3D*

Tipe element dalam pemodelan element hingga diharuskan sesuai dengan kondisi geometrik dan idealisasi dari struktur untuk mendapatkan *output* yang ingin dicapai. Model elemen hingga dari beton dimodelkan 3D dengan menggunakan element *solid 3D* yang berupa element C3D8R (*Continuum 3D, 8-node linier brick, reduced integration*) dan element C3D4 (*Continuum 3D, 4-node linier tetrahedron*) yang terlihat pada gambar 2.4 berikut ini.

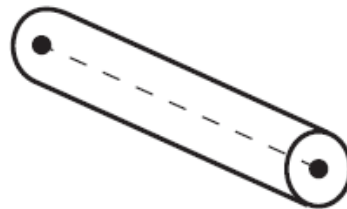


Gambar 2.4 Element Tipe C3D8R dan C3D4

(Sumber : *Abaqus manual*)

2. Model Tulangan Baja

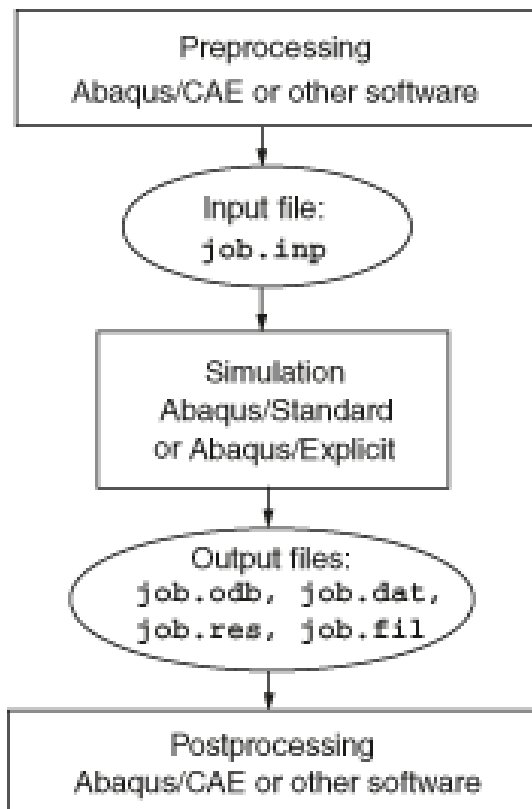
Didalam *abaqus* tersedia model *truss* yang dapat memodelkan baja tulangan. Pemodelan element ini diperlukan minimal dua titik untuk dimodelkan sebagai *truss*. Dari tiap titiknya memiliki tiga derajat kebebasan dan dapat bertranslasi pada tiga arah sumbu x, y dan z. element ini juga memiliki kemampuan untuk dapat mengalami deformasi plastis. Bentuk geometrik dan penempatan titik dapat dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2. 5 *Truss* Element
(Sumber : *Abaqus* manual)

3. *Embedded Interaction*

Interaksi element pada tulangan baja dengan material beton dimodelkan sebagai *embedded* dengan menggunakan element *truss*. Konsep interaksi pada element didefinisikan sebagai *embedded* dimana interaksi yang terjadi akan sama antara element *embedded* dengan *host* elementnya. Sementara translasi derajat kebebasan dari titik *embedded* terkait dengan hasil interpolasi yang berdasarkan derajat kebebasan dari *host* elementnya. Jadi *host* element didefinisikan sebagai *constrain* pada *embedded* element, sehingga translasi yang terjadi pada titik *embedded* akan identik atau sama dengan *host* elementnya.



Gambar 2.6 Kerangka Dalam Menjalankan Program *Abaqus*

(Sumber : *abaqus-docs.mit.edu*)

2.7.2 Preprocessing

Proses pemodelan pada *software ABAQUS* terbagi dalam beberapa modul, yang dari setiap modul tersebut memiliki fungsi yang spesifik dalam mendefinisikan suatu model dan dari setiap modul hanya memiliki *tools* yang relevan dengan fungsi spesifik tersebut.

Modul-modul yang terdapat pada program *abaqus* diantaranya adalah :

- Modul *Part*

Modul *part* adalah modul yang akan digunakan untuk menggambar atau mensketsa geometrik yang akan disimulasikan pada program *ABAQUS*. Modul *part*

menyediakan menu *tool bar* yang berfungsi untuk melakukan modifikasi geometrik sesuai dengan model yang diinginkan.

- Modul *Property*

Modul *property* berfungsi untuk menginput sifat mekanis bahan, jenis material, kekuatan bahan, dan spesifikasi teknis pada suatu *part* atau pada suatu bagian dari *part* yang nantinya akan dianalisis. Modul *property* merupakan bagian yang sangat penting sebelum kita masuk ke langkah selanjutnya, karena *property* dari material harus diberikan sebelum kita melakukan proses *assembly*.

- Modul *Assembly*

Modul *assembly* adalah modul yang berfungsi sebagai penyusun dari bagian-bagian komponen yang kita buat menjadi satu kesatuan model sehingga memungkinkan untuk dilakukannya analisis numerik. *Part* yang telah dimaskan kedalam modul *assembly* disebut *part instance*.

- Modul *Step*

Modul *step* difungsikan untuk mengurutkan langkah-langkah mana yang akan didefinisikan sebagai letak pemberian beban atau kecepatan. Pada modul *step* disediakan juga menu *set* dan *surface* untuk meletakkan beban yang nantinya akan dikerjakan pada suatu komponen struktur.

- Modul *Interaction*

Modul *interaction* dipakai untuk menentukan suatu bagian material yang akan mengalami kontak. *Interaction* juga berfungsi untuk memberikan *constrain* pada suatu benda yang akan dianalisis dalam upaya mencegahnya bergeser atau berpindah dari posisinya.

- Modul *Load*

Modul *load* digunakan untuk memberikan beban, kecepatan, *boundary* pada suatu komponen struktur. Modul *load* juga difungsikan sebagai sarana untuk memasukkan kondisi batas (*boundary condition*).

- Modul *Mesh*

Modul *mesh* berfungsi untuk membagi suatu geometrik dari satu *element* menjadi beberapa *element*. Kita juga bisa menentukan jenis *mesh* yang akan digunakan. Semakin banyak *mesh* yang dibuat akan memberikan hasil yang lebih sempurna.

- Modul *Job*

Modul *job* difungsikan untuk melakukan proses *running* terhadap model dari geometrik yang kita buat. Setelah data yang dimasukan selesai maka selanjutnya kita serahkan pada modul *job* untuk melakukan proses secara numerik. Selama dalam proses numerik kita dapat memonitor di dalam *software* dari *message area* yang berada di bawah *view port* apakah *submit job* berhasil ataukah tidak, jika terjadi *error message* kita kembali pada modul untuk melakukan modifikasi terhadap bagian-bagian yang masih terdapat kesalahan.

2.7.3 Simulasi

Abaqus standar dan *explicit* digunakan untuk melakukan simulasi dari hasil *processing* yang dibuat di dalam *software Abaqus*. Pada tingkatan ini *Abaqus* akan memecahkan permasalahan yang diberikan ke dalam program dengan melakukan penyelesaian secara numerik.

2.7.4 Postprocessing

Hasil dari simulasi yang telah lengkap (*completed*) dapat kita evaluasi seperti, regangan, tegangan, *displacement*, energi atau variabel fundamental lain yang telah selesai dilakukan proses perhitungan. Biasanya evaluasi dilakukan secara interaktif

dengan menggunakan visualisasi modul dari *Abaqus* atau *post processor* yang lain. Modul visualisasi membaca *binary file output data base*, dan mempunyai bermacam-macam pilihan untuk ditampilkan yang meliputi plot kontur warna, animasi, plot perubahan bentuk, dan plot grafik X-Y.

2.7.5 Satuan Unit *Abaqus*

Pada *software* *abaqus* tidak terdapat pilihan satuan unit didalamnya, kita yang harus menentukan sendiri satuan yang akan kita gunakan. Akan tetapi dalam penggunaannya diharuskan konsisten. Konsistensi satuan dapat dilihat pada tabel 2.1

<i>Quantitiy</i>	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit
<i>Length</i>	M	Mm	Ft	In
<i>Force</i>	N	N	Lbf	Lbf
<i>Mass</i>	Kg	tonne (10 ³ kg)	Slug	lbf s ² /in
<i>Time</i>	S	S	S	S
<i>Stress</i>	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
<i>Energy</i>	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
<i>Density</i>	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Tabel 2. 1. Unit yang digunakan ketika menginput data

2.8 Model Konstitutif Beton

Abaqus menyediakan dua jenis model untuk mensimulasikan perilaku beton non linear diantaranya yaitu, *smearred cracking* dan *concreted*

amage plasticity. Pada penelitian ini akan digunakan perilaku material dari model *concrete damage plasticity*, yang merupakan parameter tegangan regangan untuk menggambarkan perilaku beton, yang biasanya diperoleh dengan menerapkan beban tekan aksial pada benda uji beton yang berbentuk silinder dengan ukuran standar.

2.8.1 Prinsip Kegagalan Beton

Perilaku mekanik beton disimulasikan menggunakan model *concrete damage plasticity* dimana parameter tersebut adalah perkiraan dari tegangan *uniaksial*, prinsip dari *concrete damage plasticity*. Pemulihan kekuatan memainkan peran penting dalam respons mekanis beton dibawah pembebanan dinamis. Pengamatan eksperimental disebagian besar bahan beton menunjukan bahwa kekakuan tekan diperoleh kembali pada penutupan retakan setelah diberi beban tarik karena beban berubah dari tarik ke tekan. Di sisi lain, kekakuan tarik tidak pulih karena beban berubah dari kompresi ke tegangan setelah retak mikro yang hancur telah berkembang.

Pada *abaqus* terdapat beberapa parameter yang menentukan agar model dapat bersifat *concrete damage plasticity* diantaranya yaitu : *Plasticity, Compressive Behavior, Tensile behavior, Concrete Compressive Damage, Concrete Tension Damage*.

2.8.2 Parameter Concrete Damage Plasticity

Ada lima parameter yang perlu untuk didefinisikan dalam memecahkan fungsi dari aliran *plastis drucker-prager* dan fungsi leleh. Untuk mendapatkan hasil yang eksak dengan parameter-parameter ini, beberapa percobaan ada baiknya perlu dilakukan. Karena kurangnya informasi mengenai parameter ini maka akan digunakannya parameter standar yang telah disediakan *abaqus* atau yang diusulkan pada jurnal terkait. Parameter yang perlu dideskripsikan pada sifat plastis beton adalah :

1. Sudut Dilatasi ψ

Sudut dilatasi merupakan rasio dari volume perubahan geser-tarik. Pada formulasi *Drucker-Prager*, dimana nilai sudut dilatasi ditunjukkan pada *element* yang mengalami tekan biaksial dengan kekangan yang tinggi.

2. Eksentrisitas

Parameter ini adalah tingkat dimana fungsi dari *Drucker-Prager* mendekati

asimtot. Dengan eksentrisitas yang cenderung nol maka aliran plastis cenderung pada garis lurus.

3. σ_{co}/σ_{bo}

Parameter ini diperlukan dalam menyelesaikan fungsi leleh dan merepresentasikan rasio dari kekuatan tekan kesetimbangan biaksial awal terhadap kekuatan tekan uniaksial.

4. Parameter Viskositas

Mengenai aturan viskositas dapat digunakan ketika permasalahan mengalami konvergensi yang disebabkan karena perilaku pelemahan dan penurunan kekuatan elastis. Parameter ini bisa diasumsikan dengan nilai sama dengan nol.

5. K_c Parameter

Nilai untuk parameter K_c ditentukan dalam mempertimbangkan leleh dari permukaan *deviatoric plane*. Parameter K_c adalah rasio dari tegangan invariant kedua pada garis tarik menuju ke tegangan invariant ke dua menuju ke garis tekan.

Menurut Al-Osta dkk (2017) nilai dari parameter dapat didekati dengan nilai sesuai pada tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Parameter Concrete Damage Plasticity

$\Psi (^{\circ})$	C	σ_{co}/σ_{bo}	K_c	Viscosity Parameter
36	0.1	1.16	0.667	0

2.8.3 Tegangan Regangan Desak Beton

Hasil dari pengujian kuat tekan di laboratorium dapat memberikan informasi hasil mengenai material yang lebih akurat. Namun apabila tidak adanya data dari laboratorium yang dapat digunakan sebagai acuan, maka solusi dari hal tersebut digunakannya formulasi untuk menggambarkan grafik hubungan tegangan dan regangan dengan menggunakan data yang tersedia berupa kuat tekan rata-rata dan modulus elastisitas. Dalam menghitung tegangan regangan desak beton menggunakan persamaan yang diusulkan Lee dan Fenves (1998) dengan menggunakan beberapa parameter yang tercantum pada persamaan 2.1 sebagai berikut :

$$\sigma_c = \frac{E_0 \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{E_0 \varepsilon_{cu}}{\sigma_{cu}} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \right)^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan : σ_c = tegangan tekan beton,

ε_c = regangan tekan beton,

σ_{cu} = tegangan tekan *ultimate* beton,

ε_{cu} = regangan tekan *ultimate* beton,

E_0 = modulus elastisitas beton

Selain itu untuk menghitung tegangan regangan desak tarik beton pada saat kondisi elastisnya untuk dapat mengetahui perilaku tarik beton dari tegangan *ultimate* tarik beton dapat menggunakan persamaan 2.2 yang di adopsi dari Belarbi dan Hsu (1994) ke dalam penelitian sebagai berikut :

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \left(\frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan : σ_t = tegangan tarik beton,

σ_{t0} = tegangan *ultimate* tarik beton,

ε_{t0} = regangan tarik awal beton,

ε_t = regangan tarik beton,

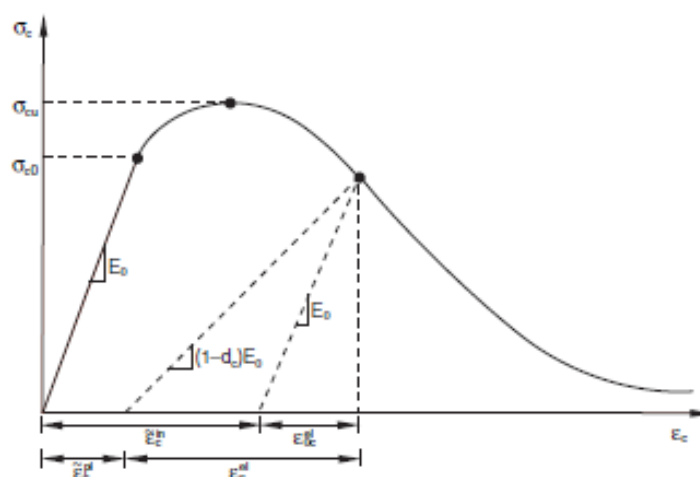
Nilai elastisitas beton dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

2.8.4 Parameter Kerusakan

Concrete damage plasticity merupakan suatu model yang disediakan *Abaqus* membutuhkan beberapa parameter fungsi material yang menunjukkan evolusi kerusakan atau pembentukan kerusakan yang berupa kerusakan saat mengalami gaya aksial tekan (dc) dan gaya tarik (dt).

Definisi tegangan tekan dan tarik pada beton dengan metode *concrete damage plasticity* diperhitungkan setelah mengalami kondisi elastis beton. Data ini dinyatakan ke dalam bentuk tabel dari fungsi regangan *inelastic* (gambar 2.7)



Gambar 2.7 Perilaku Beton Terhadap Beban

(Sumber : *Abaqus manual*)

Tegangan-regangan tekan *inelastis* :

$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_{0c}^{el} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana,

$$\tilde{\varepsilon}_{0c}^{el} = \sigma_c / E_0 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Tegangan-regangan tarik retak :

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_{0t}^{el} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana,

$$\tilde{\varepsilon}_{0t}^{el} = \sigma_t / E_0 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan : $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ = tegangan regangan tekan *inelastis* beton,

$\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ = tegangan regangan tarik retak beton,

$\tilde{\varepsilon}_{0c}^{el}$ = tegangan regangan tekan *elastis* beton,

$\tilde{\varepsilon}_{0t}^{el}$ = tegangan regangan tarik *elastis* beton,

ε_c = regangan tekan beton (mm)

ε_t = regangan tarik beton (mm)

σ_c = tegangan tekan beton (MPa)

σ_t = tegangan tarik beton (MPa)

E_0 = modulus elastisitas beton (MPa)

Abaqus secara otomatis mengubah nilai regangan *inelastis* menjadi nilai regangan *plastis*. hubungan dari regangan retak dan regangan *inelastis* dengan regangan *plastis* ($\tilde{\varepsilon}^{pl}$) dapat dilihat pada persamaan 2.8 – 2.9.

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan : $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ = tegangan regangan tekan *plastis* beton,
 $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ = tegangan regangan tekan *inelastis* beton,
 $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ = tegangan regangan tarik *plastis* beton,

$\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ = tegangan regangan tarik retak beton,

d_c = *compressive damage parameter*

d_t = *tension damage parameter*

σ_c = tegangan tekan beton (MPa)

σ_t = tegangan tarik beton (MPa)

E_0 = modulus elastisitas beton (MPa)

Kerusakan (*damage*) pada *concrete damage plasticity* pada tarik dan tekan dapat didefinisikan sebagai perbandingan kondisi beton terhadap *undamaged* dan *damage*, sehingga definisi dari keruntuhan beton (d_c atau d_t) pada persamaan dan dapat dihitung dengan formulasi persamaan 2.10- 2.11

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan : d_c = parameter kerusakan tekan beton,

d_t = parameter kerusakan tarik beton,

σ_{cu} = tegangan tekan ultimit beton (MPa)

σ_{t0} = tegangan tarik ultimit beton (MPa)

σ_c = tegangan tekan beton (MPa)

σ_t = tegangan tarik beton (MPa)

2.9 Penelitian Terdahulu

Simulasi Analisis element Hingga kolom beton bertulang dengan perlakuan GFRP ataupun tanpa perkuatan GFRP telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya yang mungkin adanya keterkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, sehingga dapat menjadi bahan acuan atau pertimbangan yang dapat menjadi referensi dalam menulis maupun mengkaji penelitian ini. Berikut adalah rangkuman beberapa penelitian yang menjadi acuan dalam referensi antara lain sebagai berikut :

- 1) Arya Putra Limoto, (2022). Meneliti tentang “Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang Perkuatan GFRP Dengan Menggunakan *Finnite Element Method (FEM)*” untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perkuatan GFRP balok beton bertulang maka dilakukan pengujian karakteristik atau perilaku beton bertulang secara eksperimental di laboratorium.
- 2) Irmawati Gailea, (2023), meneliti tentang “Model Analisis Variasi Rasio Tulangan Memanjang Pada Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan *Finnite Element Method (FEM)*” karakteristik atau perilaku beton pada umumnya diperoleh dengan pengujian eksperimental di laboratorium. Pengujian ini akan memberikan gambaran mengenai respon struktur berdasarkan keadaan nyata.

Aryanti Musa, (2023), meneliti tentang “Model Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Penampang Dengan Menggunakan *Finnite Element Method (FEM)*” untuk mengetahui tegangan dan regangan beton pada umumnya diperoleh dengan pengujian eksperimental di laboratorium. Namun pada dasarnya, untuk bisa mendapatkan data

yang valid, simulasi tersebut perlu diuji dengan percobaan dan biaya yang besar, tenaga yang tidak sedikit, waktu yang lama, serta pelaksanaan yang terbilang sulit. Untuk itu dibutuhkan pendekatan yang tidak memakan biaya yang besar dan waktu yang lama.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Metode yang digunakan dalam penyusunan dan penulisan tugas akhir ini adalah berupa studi literatur. Dengan cara mengumpulkan berbagai macam teori-teori dan pembahasan melalui buku-buku, dan peraturan-peraturan yang digunakan sebagai acuan seperti Standar Nasional Indonesia (SNI) serta jurnal-jurnal yang berkaitan dengan permasalahan yang akan dibahas. Referensi yang di dapat diantaranya berupa prosedur mengenai penggunaan program komputer *FEA* (*Finnite Element Analysis*) terutama program Abaqus/CAE versi 6.14.

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

3.2.1 Waktu Penelitian

Waktu penelitian “Prediksi Perilaku Nonlinier Hubungan Tegangan Regangan Pada Kolom Persegi Dengan Variasi Rasio Tulangan Memanjang Menggunakan Abaqus” ini direncanakan setelah seminar proposal dilaksanakan atau sebagaimana dijelaskan pada tabel 3.1 :

Tabel 3.1 Rencana Waktu Penelitian

No.	Uraian	Bulan									
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
1	Penyusunan proposal dan proses bimbingan										
2	Pengimputan data										
3	Analisis dan pengolahan data										
4	Penyusunan skripsi										
5	Seminar hasil										
6	Perbaikan										
7	Ujian tutup										

3.2.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini tepatnya berada laboratorium *Computer Aided Engineering (cae)* Universitas Khairun Ternate.

3.3 Data Material

3.3.1 Hasil Pendekatan Analisis Konstitutif Material Beton

Analisis konstitutif material beton tersebut untuk mendapatkan perilaku material beton dalam bentuk tegangan regangan tekan dan tegangan regangan tarik, yang nantinya dipakai untuk mencari nilai *inelastic strai*, *cracking strain* dan parameter kerusakan beton.

3.3.2 Tegangan Regangan Tekan Beton

Tegangan ultimet tekan beton adalah : $\sigma_{cu} = 22,2419$ MPa.

Modulus elastisitas beton adalah :

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{22,2419} = 22165,82 \text{ MPa}$$

Menghitung tegangan tekan beton.

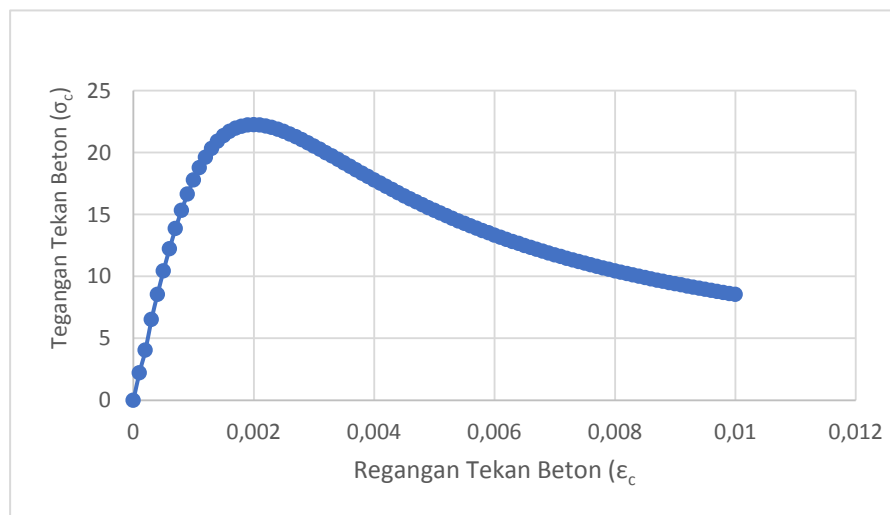
$$\sigma_c = \frac{22165,82 \times 0,0001}{1 + \left(\frac{22165,82 \times 0,002}{22,2419} - 2 \right) \cdot \left(\frac{0,0001}{0,002} \right) + \left(\frac{0,0001}{0,002} \right)^2} = 2,211809 \text{ MPa}$$

Hasil dari perhitungan selanjutnya di sajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut

Tabel 3.2 Parameter Konstitutif Tekan Beton

	ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c
1	0.0001	2.2117	26	0.0026	21.4935	51	0.0051	15.1019	76	0.0076	10.9285
2	0.0002	4.0325	27	0.0027	21.2716	52	0.0052	14.8866	77	0.0077	10.8045
3	0.0003	6.5097	28	0.0028	21.0340	53	0.0053	14.676	78	0.0078	10.6829
4	0.0004	8.5356	29	0.0029	20.7838	54	0.0054	14.4699	79	0.0079	10.5639
5	0.0005	10.4473	30	0.003	20.5239	55	0.0055	14.2684	80	0.008	10.4473
6	0.0006	12.2238	31	0.0031	20.2567	56	0.0056	14.0714	81	0.0081	10.3331

	ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c
7	0.0007	13.8515	32	0.0032	19.9842	57	0.0057	13.8787	82	0.0082	10.2211
8	0.0008	15.3220	33	0.0033	19.7082	58	0.0058	13.6903	83	0.0083	10.1114
9	0.0009	16.6313	34	0.0034	19.4303	59	0.0059	13.5062	84	0.0084	10.0039
10	0.001	17.7800	35	0.0035	19.1517	60	0.006	13.3261	85	0.0085	9.8984
11	0.0011	18.7725	36	0.0036	18.8734	61	0.0061	13.1501	86	0.0086	9.7951
12	0.0012	19.6158	37	0.0037	18.5956	62	0.0062	12.9779	87	0.0087	9.6937
13	0.0013	20.3189	38	0.0038	18.3215	63	0.0063	12.8096	88	0.0088	9.5943
14	0.0014	20.8924	39	0.0039	18.0492	64	0.0064	12.6451	89	0.0089	9.4968
15	0.0015	21.3475	40	0.004	17.7800	65	0.0065	12.4841	90	0.009	9.4011
16	0.0016	21.6957	41	0.0041	17.5145	66	0.0066	12.3268	91	0.0091	9.3072
17	0.0017	21.9485	42	0.0042	17.2528	67	0.0067	12.1728	92	0.0092	9.2151
18	0.0018	22.1167	43	0.0043	16.9954	68	0.0068	12.0223	93	0.0093	9.1247
19	0.0019	22.2106	44	0.0044	16.7423	69	0.0069	11.8750	94	0.0094	9.0360
20	0.002	22.2400	45	0.0045	16.4938	70	0.007	11.7309	95	0.0095	8.9489
21	0.0021	22.2134	46	0.0046	16.2499	71	0.0071	11.5899	96	0.0096	8.8633
22	0.0022	22.1390	47	0.0047	16.0107	72	0.0072	11.4519	97	0.0097	8.7793
23	0.0023	22.0238	48	0.0048	15.7764	73	0.0073	11.3168	98	0.0098	8.6968
24	0.0024	21.8742	49	0.0049	15.5468	74	0.0074	11.1846	99	0.0099	8.6158
25	0.0025	21.6957	50	0.005	15.3220	75	0.0075	11.0552	100	0.01	8.5362



Gambar 3.1 Tegangan regangan tekan beton

Dari gambar 3.1 Menjelaskan bagaimana perilaku beton saat diberi beban, dimana saat beban bekerja sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan tekan beton masih dalam kondisi linier namun setelah tercapainya beban ultimate tegangan regangan tekan beton bersifat nonlinier dimana beban perlahan menurun sementara regangan terus bertambah dan membentuk pola melengkung.

3.3.3 Tegangan Regangan Tarik Beton

Tegangan Ultimate Tarik beton adalah : $\sigma_{t0} = 2,224 \text{ MPa}$

Modulus Elastisitas beton adalah :

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{22,2419} = 22165,82 \text{ Mpa}$$

Menghitung Tegangan Tarik Beton :

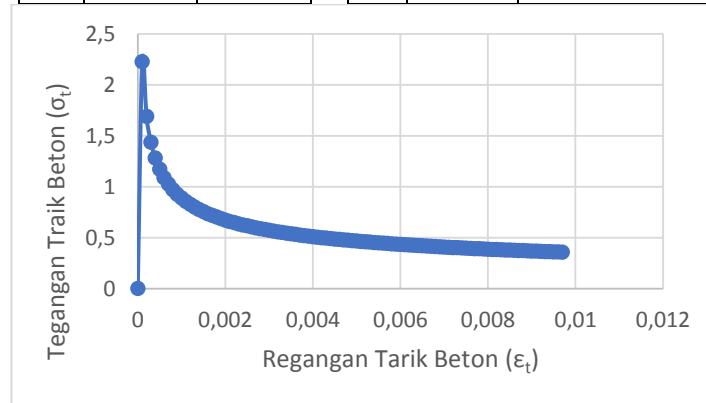
$$\sigma_t = 2,224 \cdot \left(\frac{0,0001}{0,0005} \right)^{0,4} = 1,1698 \text{ MPa}$$

Hasil dari perhitungan analisis selanjutnya di sajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut :

Tabel 3.3 Parameter Konstitutif Tarik Beton

	ϵ_t	σ_t		ϵ_t	σ_t		ϵ_t	σ_t		ϵ_t	σ_t
1	0.0005	1.1698	25	0.0029	0.5791	49	0.0053	0.4549	73	0.0077	0.3918
2	0.0006	1.0875	26	0.003	0.5713	50	0.0054	0.4516	74	0.0078	0.3898
3	0.0007	1.0225	27	0.0031	0.5638	51	0.0055	0.4483	75	0.0079	0.3878
4	0.0008	0.9693	28	0.0032	0.5567	52	0.0056	0.4450	76	0.008	0.3859
5	0.0009	0.9247	29	0.0033	0.5499	53	0.0057	0.4419	77	0.0081	0.3839
6	0.001	0.8865	30	0.0034	0.5434	54	0.0058	0.4388	78	0.0082	0.3821
7	0.0011	0.85341	31	0.0035	0.5371	55	0.0059	0.4358	79	0.0083	0.3802
8	0.0012	0.8242	32	0.0036	0.5311	56	0.006	0.4329	80	0.0084	0.3784
9	0.0013	0.7982	33	0.0037	0.5253	57	0.0061	0.4301	81	0.0085	0.3766
10	0.0014	0.7749	34	0.0038	0.5197	58	0.0062	0.4273	82	0.0086	0.3749
11	0.0015	0.7538	35	0.0039	0.5143	59	0.0063	0.4245	83	0.0087	0.3731
12	0.0016	0.7346	36	0.004	0.5092	60	0.0064	0.4219	84	0.0088	0.3714
13	0.0017	0.7170	37	0.0041	0.5041	61	0.0065	0.4193	85	0.0089	0.3697
14	0.0018	0.7008	38	0.0042	0.4993	62	0.0066	0.4167	86	0.009	0.3681
15	0.0019	0.6858	39	0.0043	0.4946	63	0.0067	0.4142	87	0.0091	0.3665
16	0.002	0.6718	40	0.0044	0.4901	64	0.0068	0.4118	88	0.0092	0.3649
17	0.0021	0.6589	41	0.0045	0.4857	65	0.0069	0.4094	89	0.0093	0.3633
18	0.0022	0.6467	42	0.0046	0.4815	66	0.007	0.4070	90	0.0094	0.3617
19	0.0023	0.6353	43	0.0047	0.4773	67	0.0071	0.4047	91	0.0095	0.3602
20	0.0024	0.6246	44	0.0048	0.4733	68	0.0072	0.4025	92	0.0096	0.3587
21	0.0025	0.6145	45	0.0049	0.4695	69	0.0073	0.4003	93	0.0097	0.3572

22	0.0026	0.6049	46	0.005	0.4657	70	0.0074	0.3981
23	0.0027	0.5958	47	0.0051	0.4620	71	0.0075	0.3959
24	0.0028	0.5872	48	0.0052	0.4584	72	0.0076	0.3939



Gambar 3.2 Tegangan regangan tarik beton

Pada gambar 3.2 Menjelaskan perilaku beton ketika diberi beban tarik, beban tarik jauh lebih kecil dari beban tekan. Dan memiliki perilaku yang berbeda dengan beban tekan dimana saat beban bekerja sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan tarik beton dalam kondisi yang linier sempurna kemudian setelah tercapainya beban ultimate tegangan regangan tarik beton bersifat nonlinier dimana beban dimana beban menurun drastis sementara regangan terus bertambah dan membentuk pola melengkung.

Tabel 3.4 Parameter Konstitutif Material Baja

	ϵ_s	f_s		ϵ_s	f_s		ϵ_s	f_s
1	0	245.5	32	0.049	328.5432	63	0.08	350.802
2	0.01964	245.5	33	0.05	329.8102	64	0.081	351.1261
3	0.02	247.5333	34	0.051	331.0242	65	0.082	351.4342
4	0.021	252.9424	35	0.052	332.1875	66	0.083	351.7266
5	0.022	258.0233	36	0.053	333.3026	67	0.084	352.0039
6	0.023	262.8029	37	0.054	334.3715	68	0.085	352.2665
7	0.024	267.3051	38	0.055	335.3963	69	0.086	352.5148
8	0.025	271.5515	39	0.056	336.3788	70	0.087	352.7493
9	0.026	275.5614	40	0.057	337.3209	71	0.088	352.9704
10	0.027	279.3522	41	0.058	338.2242	72	0.089	353.1785
11	0.028	282.9398	42	0.059	339.0903	73	0.09	353.374

	ϵ_s	f_s		ϵ_s	f_s		ϵ_s	f_s
12	0.029	286.3383	43	0.06	339.9208	74	0.091	353.5571
13	0.03	289.5607	44	0.061	340.7171	75	0.092	353.7284
14	0.031	292.619	45	0.062	341.4805	76	0.093	353.888
15	0.032	295.5237	46	0.063	342.2123	77	0.094	354.0364
16	0.033	298.2849	47	0.064	342.9138	78	0.095	354.1738
17	0.034	300.9116	48	0.065	343.5861	79	0.096	354.3005
18	0.035	303.412	49	0.066	344.2302	80	0.097	354.4169
19	0.036	305.7937	50	0.067	344.8474	81	0.098	354.5231
20	0.037	308.0639	51	0.068	345.4384	82	0.099	354.6196
21	0.038	310.2288	52	0.069	346.0043	83	0.1	354.7064
22	0.039	312.2947	53	0.07	346.5461	84	0.101	354.784
23	0.04	314.2669	54	0.071	347.0644	85	0.102	354.8525
24	0.041	316.1506	55	0.072	347.5602	86	0.103	354.9121
25	0.042	317.9506	56	0.073	348.0343	87	0.104	354.9631
26	0.043	319.6714	57	0.074	348.4874	88	0.105	355.0058
27	0.044	321.3169	58	0.075	348.9201	89	0.106	355.0402
28	0.045	322.9812	59	0.076	349.3332	90	0.107	355.0666
29	0.046	324.3977	60	0.077	349.7273	91	0.108	355.0853
30	0.047	325.8398	61	0.078	350.1031	92	0.109	355.0964
31	0.048	327.2207	62	0.079	350.4611	93	0.11	355.1

a) Beton

Data material beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Concrete Damage Plasticity*. Selain itu data lain yang digunakan adalah *density*, material elastis, konstitutif material beton dalam kondisi tekan dan tarik, dan parameter *plasticity*. Parameter *density*, material elastis dan *plasticity* yang akan dimasukkan dalam penelitian ini tertera pada tabel 3.5 dan 3.6.

Tabel 3.5 Parameter *density* dan material *elastis*

<i>Density</i>	Modulus Elastisitas	<i>Poison Ratio</i>
2400 kg/cm ²	$4700 \sqrt{f'_c}$ MPa	0.2

Tabel 3.6 Parameter *Plasticity*

$\psi (^{\circ})$	36
C	0.1
σ_{co}/σ_{bo}	1.16
K_c	0.667
<i>Viscosity Parameter</i>	0

b) Tulangan Baja

Data tulangan baja yang dimasukkan dalam penelitian ini berupa *density*, dan material elastis baja seperti yang ditunjukkan dalam tabel 3.7.

Tabel 3.7 Parameter *Density* dan *Elastis* Baja

<i>Density</i>	<i>Modulus Elastisitas</i>	<i>Poisson Ratio</i>
7800 kg/cm ²	200000 Mpa	0.3

Untuk parameter lain seperti *konstitutif* material baja yang berupa tegangan dan regangan *plasticity* dilakukan perhitungan menggunakan persamaan yang di usulkan oleh Park dan Paulay, untuk data sifat mekanis menggunakan SNI 2052:2017 berikut.

Tabel 3.8 Sifat Mekanis Baja (Sumber : SNI 2052:2017)

Kelas Baja Tulangan	Kuat Luluh/Leleh (YS)	Kuat Tarik (TS)	Regangan dalam 200 mm, Min.
	MPa	MPa	%
BJTP 280 (Tul. Geser)	Min. 280	Min. 350	11
BJTS 420B (Tul. Long)	Min. 420	Min. 525	14

Modulus Elastisitas Baja = 200000 Mpa

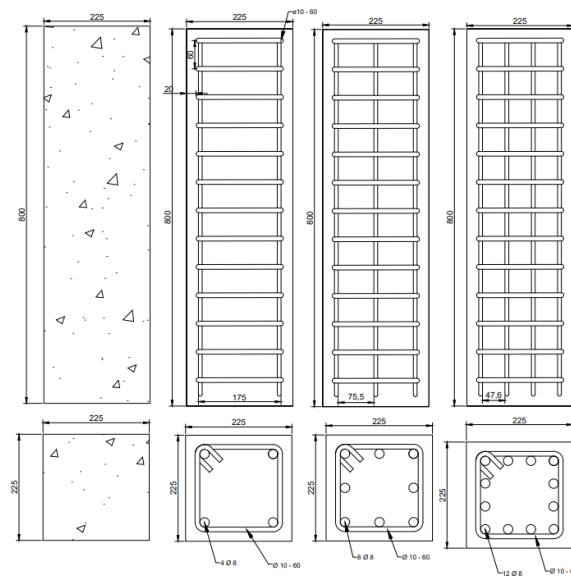
3.4 Peralatan Penelitian

Analisis numerik yang akan dilakukan dalam penelitian ini menggunakan *software Abaqus CAE 6.14*.

3.5 Objek Penelitian

Objek yang ditinjau pada penelitian ini lebih difokuskan pada penggunaan program komputer *FEA (Finite Element Analysis)* yang nantinya dipakai dalam mensimulasikan perilaku lentur balok beton bertulang, dan kemudian dari hasil analisis tersebut dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan secara eksperimental kemudian dituangkan dalam bentuk grafik. Perbandingan yang dilakukan dari penelitian ini, adalah berupa data-data beban dan lendutan dari hasil penelitian tersebut.

Dalam penyajian bahasan mengenai perilaku lentur balok beton bertulang dengan perkuatan *GFRP* menggunakan *FEM (Finite Element Analysis)* pada tugas akhir ini, menggunakan suatu model beton bertulang dengan struktur perletakan sederhana dan beban terpusat, seperti yang terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Model Kolom Persegi yang dianalisis

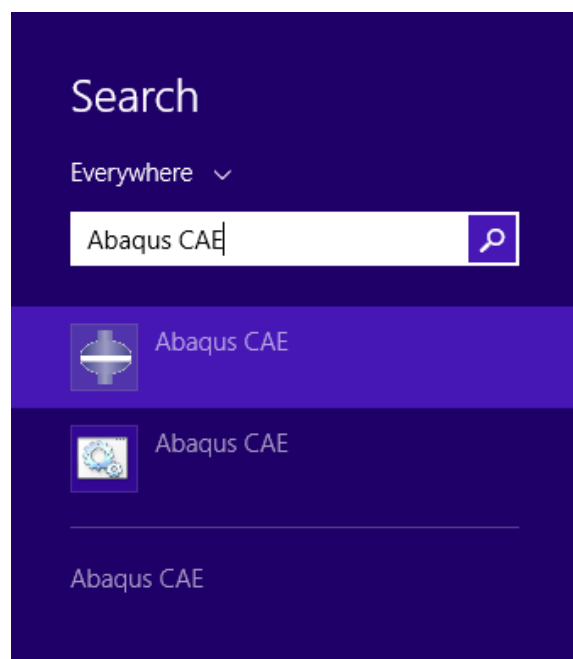
Penelitian ini dilakukan menggunakan 4 jenis model kolom persegi dengan panjang kolom 800 mm.

Tabel 3.9 Model Benda Uji Penelitian (Sumber : ABAQUS manual)

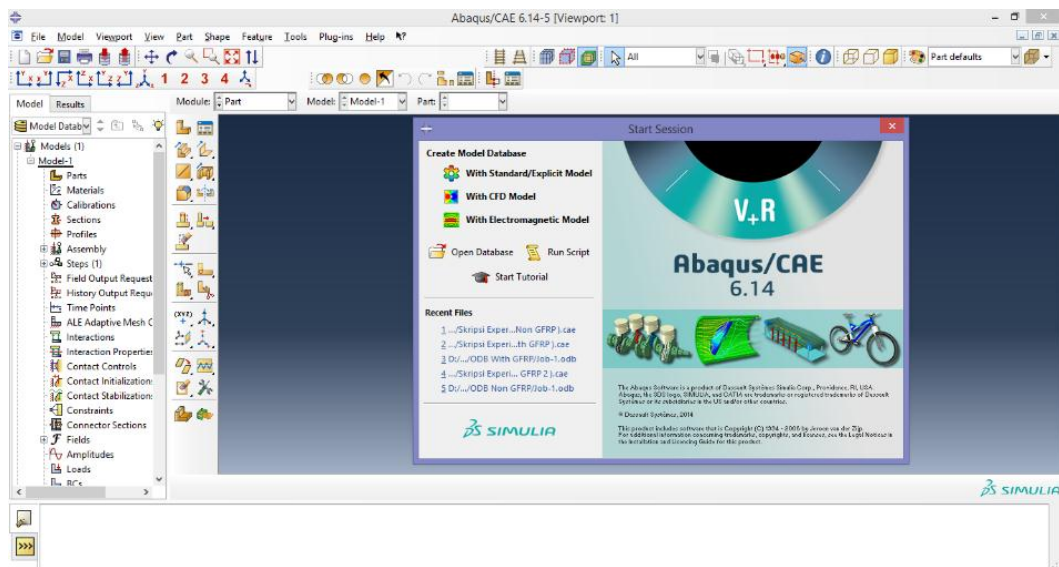
Model Kolom	Tulangan Memanjang	Tulangan Senggang
A	-	-
B	4 Ø10	Ø10-60
C	8 Ø10	Ø10-60
D	12 Ø10	Ø10-60

3.6 Pemodelan Program Abaqus

Untuk mengoperasikan program Abaqus, dapat dibuka langsung pada icon melalui desktop atau panel *start* seperti yang disajikan pada gambar 3.4 setelah itu klik icon Abaqus/CAE maka akan muncul tampilan seperti yang terdapat pada gambar 3.5 kemudian klik *create model database with standard/explicit model*.



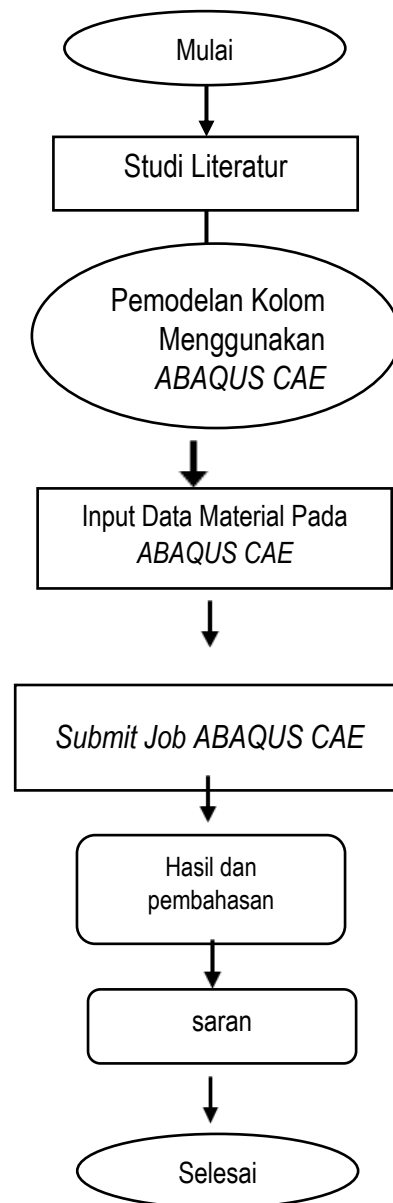
Gambar 3.4 Membuka *Abaqus/CAE* v.614



Gambar 3.5 Tampilan Awal Abaqus/CAE v.614

(Sumber :Abaqus/CAE v.614)

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

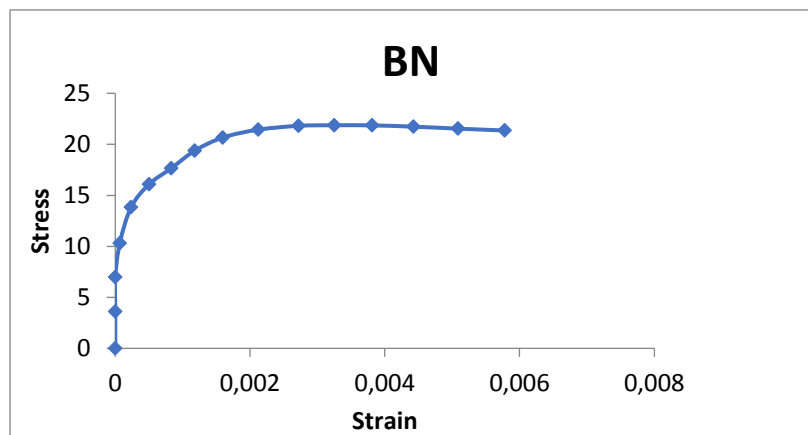
4.1 Hasil Analisa Elemen Hingga *ABAQUS* 6.14

Hasil dari simulasi dan analisis dengan menggunakan *software abaqus* 6.14 yang di tinjau pada kolom 1 (kolom polos) dan 3 (kolom dengan jumlah 8 tulangan utama) divalidasi dengan hasil experimental dari Domingus Bakarbesy (2008). Menilai kesamaan pola retak yang terjadi, serta tegangan dan regangan yang terjadi pada specimen kolom.

4.1.1 kolom polos

Tabel 4.1 Tegangan Regangan Kolom Polos

Kolom Polos	
E_c	σ_c
0	0
0	3.61501
0	6.9781
0.0000674	10.3207
0.000235	13.8356
0.000503	16.0976
0.00083	17.6524
0.001182	19.3846
0.001595	20.668
0.002122	21.4367
0.002721	21.8152
0.00325	21.8708
0.003812	21.8589
0.004425	21.7342
0.005088	21.5392
0.005781	21.3569



Gambar 4.1 Hubungan Tegangan Regangan

Kolom Polos

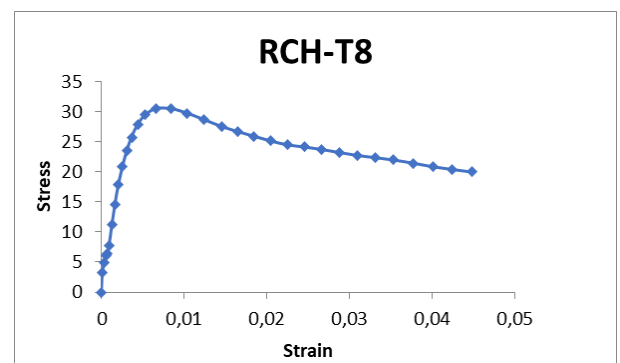
Pada gambar 4.1 dapat dilihat tegangan regangan tekan kolom polos yang terjadi pada saat menerima beban, dari gambar terlihat kuat tekan ultimate beton 21,87 Mpa sementara regangan ultimate beton 0,00325 mm dari grafik

tersebut terlihat perilaku beton diawal pembebanan tegangannya meningkat derastis sampai akhirnya mengalami mengalami keruntuhan akibat tegangan yang semakin meningkat, sebelum mencapai beban ultame tegangan regangan tekan beton dalam kondisi yang linier kemudian setelah tercapainya beban ultimate tegangan regangan tekan beton bersifat nonlinier dimana beban menurun sementara regangan terus bertambah.

4.1.2 kolom 8 tulangan utama

Tabel 4.2 Tegangan Regangan Kolom 8 Tulangan Utama

FEM					
	ϵ_c	σ_c			
1	0	0	25	0.026659	23.7309
2	0.00012	3.22002	26	0.028761	23.2303
3	0.000348	4.87725	27	0.030934	22.7444
4	0.00057	6.10577	28	0.033107	22.377
5	0.000732	6.46079	29	0.035362	21.9811
6	0.000926	7.75361	30	0.037742	21.448
7	0.001268	11.1782	31	0.040136	20.8604
8	0.001636	14.6114	32	0.042489	20.4012
9	0.002068	17.9405	33	0.044836	19.986
10	0.002546	20.8402			
11	0.003062	23.4744			
12	0.003642	25.7796			
13	0.004375	27.8422			
14	0.00533	29.5292			
15	0.005441	30.4996			
16	0.005595	30.5137			
17	0.010381	29.759			
18	0.012443	28.6655			
19	0.014506	27.5641			
20	0.01648	26.7007			
21	0.018453	25.9206			
22	0.020474	25.1435			
23	0.022565	24.4855			
24	0.024588	24.141			



Gambar 4.2 Hubungan
Tegangan Regangan Kolom 8
Tulangan Utama

Pada gambar 4.2 Dapat diketahui diagram tegangan regangan tekton beton kolom dengan jumlah 8 tulangan utama yang terjadi pada saat menerima beban, dari gambar terlihat kuat tekan ultimate beton 30,51 Mpa sementara regangan ultimate beton 0,005595 mm. Dari grafik tersebut terlihat perilaku beton diawal pembebanan tegangannya meningkat yang diakibatkan menerima beban terlebih dahulu sampai akhirnya mengalami keruntuhan akibat tegangan yang semakin meningkat, sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan kuat tekan beton dalam kondisi yang linier setelah tercapainya beban ultimate bersifat nonlinier dimana beban menurun drastis sementara regangan terus bertambah.

4.2 Perilaku Nonlinier

➤ Analisis nonlinier secara material dan geometris

Analisis nonlinier suatu struktur merupakan langkah analisis nonlinier umum.

Analisis ini juga dapat disebut *analisis beban - perpindahan material nonlinier*.

Semua informasi yang diperlukan mengenai perilaku kolom diperkirakan dari analisis material nonlinier. Informasi tersebut terdiri dari beban ultimit, mode kegagalan, dan tegangan regangan. Komponen kolom mempunyai kurva tegangan regangan nonlinier atau kurva tegangan regangan linier-nonlinier.

Analisis nonlinier secara material (dengan atau tanpa pertimbangan non-linier geometrik) struktur kolom dilakukan agar dapat mengetahui respon keseluruhan komponen kolom. Dari sudut pandang numerik, penerapan kurva tegangan regangan nonlinier pada material baja dan beton konstruksi melibatkan integrasi keadaan material pada titik integrasi seiring dengan peningkatan waktu selama analisis material nonlinier.

Penerapan kurva tegangan regangan nonlinier harus memberikan matriks kekakuan material yang akurat untuk digunakan dalam membentuk persamaan kesetimbangan nonlinier dari formulasi elemen hingga. Model konstitutif yang terkait dengan komponen kolom mempertimbangkan respon elastis dan inelastis material.

Dalam model respons inelastis yang disediakan di *ABAQUS* (pada bagian inelastis). Pemisahan ini didasarkan pada asumsi bahwa terdapat hubungan aditif antara laju regangan bagian elastis dan inelastis. Model material konstitutif yang digunakan sebagian besar program komputer elemen hingga tujuan umum yang tersedia biasanya diakses oleh elemen padat atau struktural manapun.

Respons elastis dan inelastis dibedakan dengan memisahkan deformasi menjadi bagian yang dapat dipulihkan (elastis) dan yang tidak dapat dipulihkan. Akses ini dilakukan secara mandiri pada setiap titik perhitungan konstitutif. Titik-titik ini merupakan titik integrasi numerik dalam unsur-unsur. Model konstitutif memperoleh keadaan pada titik yang dipertimbangkan pada awal kenaikan dari database material yang ditentukan dalam langkah tersebut. Model konstitutif memperbaharui keadaan respon material hingga akhir pertambahan.

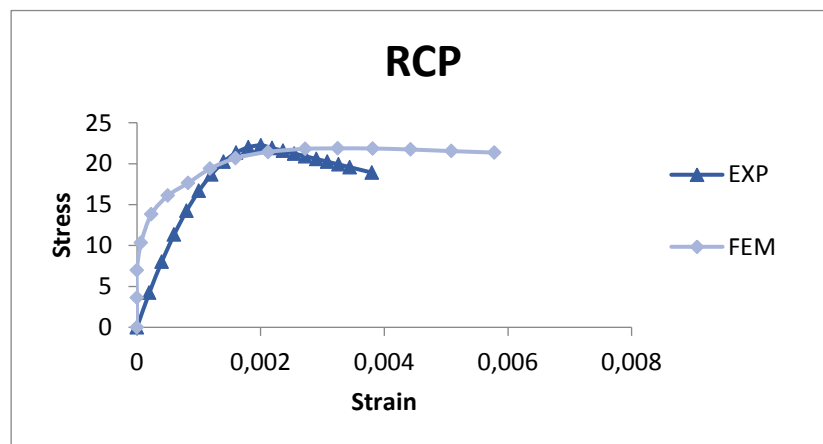
Analisis Nonlinier secara geometri merupakan langkah analisis nonlinier yang bersifat umum. Analisisnya biasa juga disebut **ANALISIS GABUNGAN NONLINIER SECARA MATERIAL DAN GEOMETRIK**.

Perilaku nonlinier pada kolom struktur terjadi ketika deformasi kolom tidak lagi proporsional dengan gaya yang diterapkannya. Hal ini bisa terjadi karena berbagai faktor seperti penambahan beban, efek geser, atau ketidaksempurnaan geometriks. Dalam kasus ini, analisis nonlinier diperlukan untuk memprediksi perilaku kolom dengan akurat. Metode yang umum digunakan untuk memprediksi perilaku nonlinier kolom termasuk analisis elemen hingga nonlinier atau pendekatan analitis yang rumit.

4.2.1 perbandingan Experimental & FEM (kolom polos)

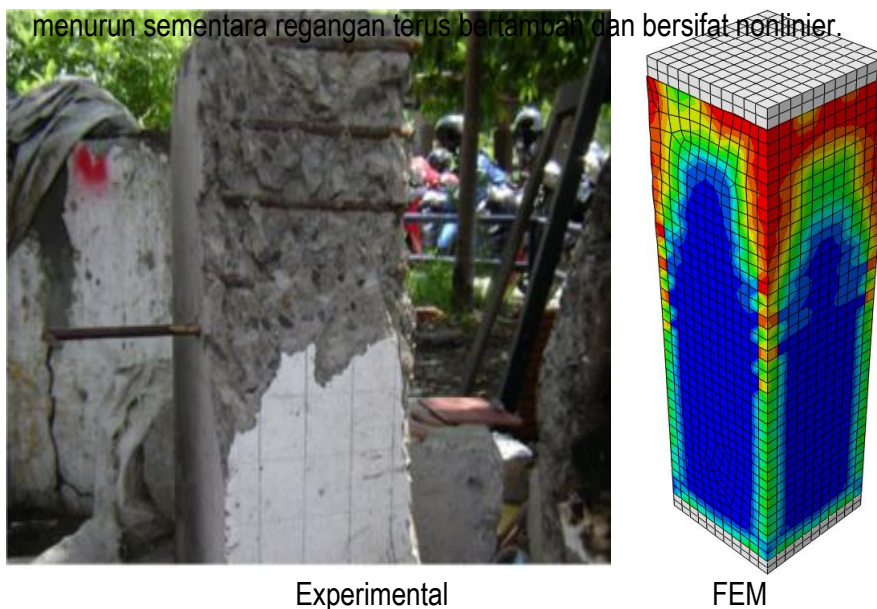
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Software

Experimental				FEM			
ϵc	Σc			Ec	Σc		
0	0	0.0021862	21.90804	0	0	0.002122	21.4367
0.0002007	4.225912	0.0023655	21.57443	0	3.61501	0.002721	21.8152
0.0004014	8.00699	0.0025448	21.24083	0	6.9781	0.00325	21.8708
0.0006021	11.34324	0.0027241	20.90723	0.0000674	10.3207	0.003812	21.8589
0.0008027	14.23465	0.0029034	20.57363	0.000235	13.8356	0.004425	21.7342
0.0010034	16.68123	0.0030827	20.24002	0.000503	16.0976	0.005088	21.5392
0.0012041	18.68298	0.0032621	19.90642	0.00083	17.6524	0.005781	21.3569
0.0014041	20.23989	0.0034414	19.57282	0.001182	19.3846	dan Experimental RCP	
0.0016055	21.35197	0.0038	18.90562	0.001595	20.668		
0.0018055	22.01922						
0.0020069	22.24164						



Gambar4.3 perbandingan kolom polos FEM dan Experimental

Dari grafik tersebut memperlihatkan perilaku kolom polos ketika diberi beban, berdasarkan hasil experimental saat beban bekerja pada kolom beban perlahan-lahan meningkat sampai pada tegangan puncak 22,24 Mpa dan regangan 0,0020 mm yang merupakan titik keruntuhan. Sementara pada hasil pemodelan tegangan puncak berada pada 21,87 Mpa dan regangan 0,0032 mm. Hasil pada experimental dan pemodelan mengalami sedikit perbedaan namun diakhir pembebanan nilai yang dikeluarkan mendekati dengan hasil experimental. Setelah mencapai keruntuhannya beban perlahan menurun sementara regangan terus bertambah dan bersifat nonlinier.



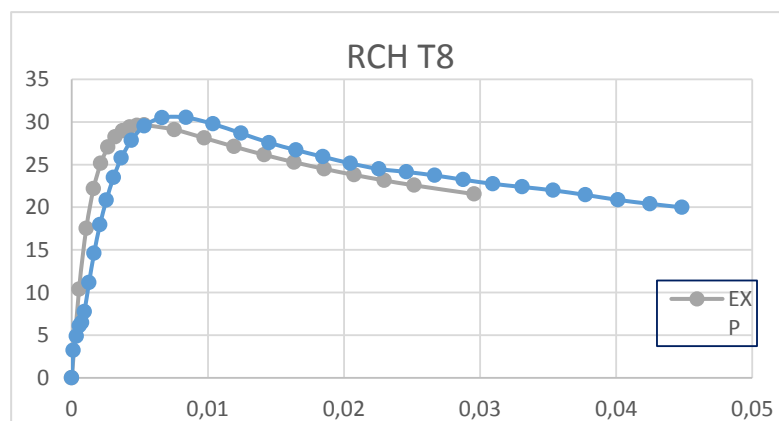
Gambar 4.4 Perbandingan pola retak Exprimental dan FEM (BN)

Untuk perbandingan pola keretakan yang terjadi pada hasil experimental dan *Finnite Element Method* dari setiap speciment kolom polos yang di uji pada penelitian experimental. Pola keretakan kolom polos pada simulasi dan experimental hampir sama dengan adanya garis retak.

4.2.2 Perbandingan Experimental & FEM (Kolom 8 Tulangan Utama)

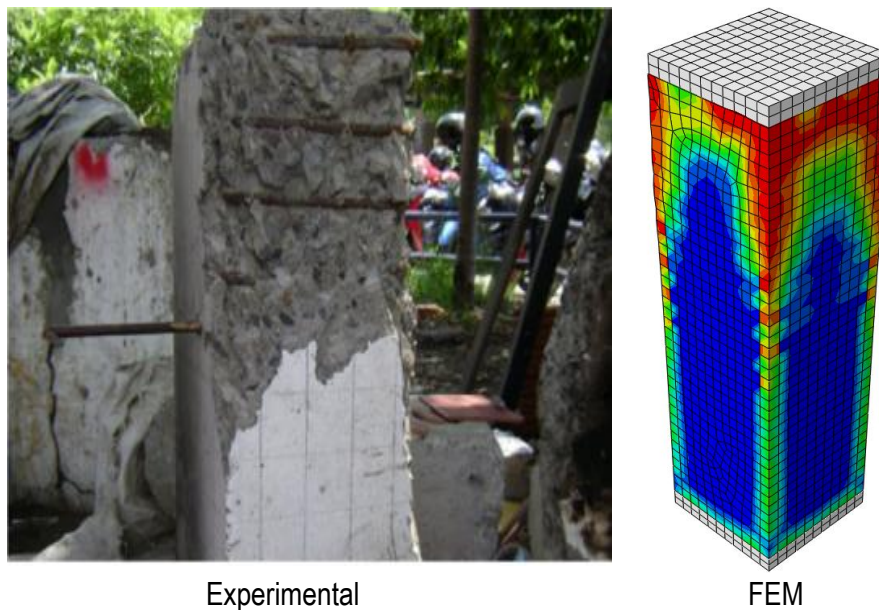
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Software dan Experimental RCH T 8

FEM			Experimental		
	ϵ_c	σ_c		ϵ_c	σ_c
1	0	0	1	0	0
2	0.00012	3.22002	2	0.00053	10.3755
3	0.000348	4.87725	3	0.001065	17.5182
4	0.00057	6.10577	4	0.001598	22.1675
5	0.000732	6.46079	5	0.00213	25.1502
6	0.000926	7.75361	6	0.002663	27.0493
7	0.001268	11.1782	7	0.003196	28.2419
8	0.001636	14.6114	8	0.003728	28.9680
9	0.002068	17.9405	9	0.004261	29.3818
10	0.002546	20.8402	10	0.004794	29.5836
11	0.003062	23.4744	11	0.005326	29.6400
12	0.003642	25.7796	12	0.00753	20.0959
13	0.004375	27.8422	13	0.009732	28.1192
14	0.00533	29.5292	14	0.011938	27.1023
15	0.005441	30.4996	15	0.014142	26.1428
16	0.005595	30.5137	16	0.016364	25.2798
17	0.010381	29.759	17	0.018549	24.4960
18	0.012443	28.6655	18	0.020753	23.7885
19	0.014506	27.5641	19	0.022957	23.1481
20	0.01648	26.7007	20	0.025161	22.5659
21	0.018453	25.9206	21	0.029569	21.5427
22	0.020474	25.1435			
23	0.022565	24.4855			
24	0.024588	24.141			
25	0.026659	23.7309			
26	0.028761	23.2303			
27	0.030934	22.7444			
28	0.033107	22.377			
29	0.035362	21.9811			
30	0.037742	21.448			
31	0.040136	20.8604			
32	0.042489	20.4012			
33	0.044836	19.986			



Gambar 4.5 Perbandingan RCH T 8 FEM dan Experimental

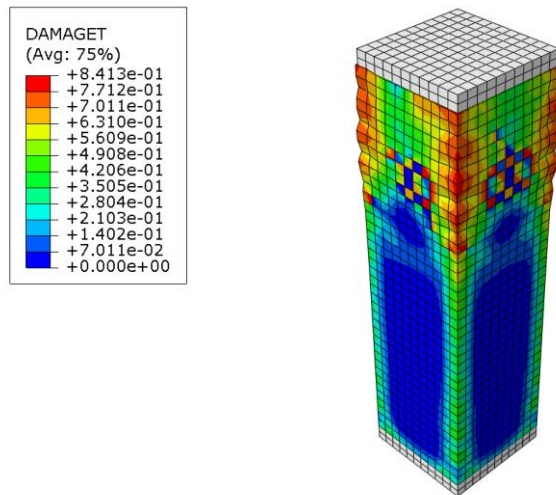
Pada gambar 4.5 terlihat grafik tegangan regangan dari dari model kolom dengan jumlah tulangan utama 8 hasil dari experimental dan hasil dari *Finnite Element Analisis*. berdasarkan dari hasil experimental, tegangan puncak sebesar 29,64 Mpa dan regangannya 0,00532 mm sementara hasil simulasi tegangan puncak 30,51 Mpa dan regangan 0,005595 mm. Sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan kuat beton dalam kondisi yang linier adalah tercapainya beban ultimate bersifat nonlinier dimana beban beban menurun dan beban terus bertambah, diakhir pembebanan nilai yang dikeluarkan mendekati dengan hasil experimental.



Gambar 4.6 Perbandingan pola retak Exprimental dan FEM (RCHT8)

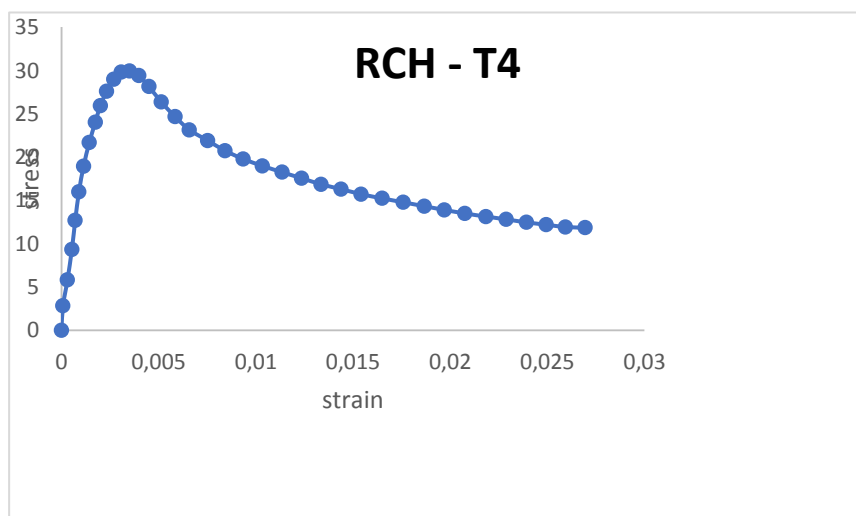
Untuk perbandingan pola retak yang terjadi pada kolom persegi dengan jumlah 8 tulangan utama terjadi keretakan pada permukaan kolom. Sedangkan bagian dalamnya hanya mengalami sedikit keretakan, hal ini juga didapati kemiripan dengan hasil yang diperoleh dari *Finnite Element Methode*.

4.2.3 Hasil Kolom FEM



A. Kolom Dengan 4 Tulangan Memanjang

Gambar 4.7 Kolom 4 Tulangan Memanjang



Tabel 4.5 Tegangan Regangan Kolom 4 Tulangan Memanjang

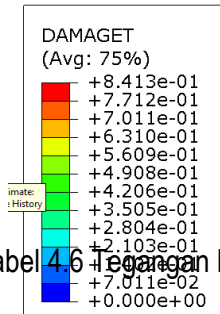
RCH – T4								
1	0	0	22	0.009348	19.7771	43	0.03093	11.64986
2	0.0000803	2.829921	23	0.010341	18.98003	44	0.031908	11.56515
3	0.000309	5.803667	24	0.011353	18.24589	45	0.032895	11.51506
4	0.000538	9.339306	25	0.012364	17.54791	46	0.033904	11.47074

5	0.00071	12.69474	26	0.013363	16.85014	47	0.034877	11.35684
6	0.0009	15.97221	27	0.014386	16.29724	48	0.035851	11.28591
7	0.00114	18.93622	28	0.015423	15.70956	49	0.036801	11.22508
8	0.001435	21.68025	29	0.016509	15.22487	50	0.037745	11.19415
9	0.001744	24.02338	30	0.017585	14.77433	51	0.038695	11.15928
10	0.002003	25.92853	31	0.018666	14.32603			
11	0.002321	27.57589	32	0.019701	13.89235			
12	0.002691	28.98289	33	0.020752	13.49159			
13	0.003076	29.80425	34	0.021838	13.12673			
14	0.003509	29.94333	35	0.022879	12.80638			
15	0.003982	29.40187	36	0.023922	12.45615			
16	0.0045	28.13395	37	0.024945	12.18735			
17	0.005132	26.36384	38	0.025935	11.9201			
18	0.005846	24.6513	39	0.026947	11.84793			
19	0.006582	23.13946	40	0.027958	11.76021			
20	0.007519	21.90709	40	0.028945	11.74282			
21	0.008418	20.73175	42	0.029935	11.73663			

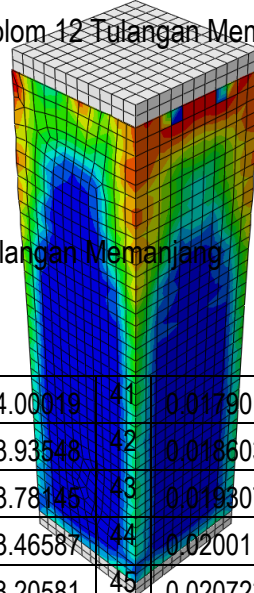
Gambar 4.8 Tegangan Regangan Kolom 4 Tulangan Memanjang

Pada gambar 4.8 dapat kita ketahui diagram tegangan regangan tekan beton kolom dengan 4 tulangan memanjang yang terjadi pada saat menerima beban, dari gambar terlihat kuat tekan ultimate beton 29,94 Mpa sementara regangan ultimate beton 0,0035 mm. Dari grafik tersebut terlihat perilaku beton diawal pembebanan tegangannya meningkat dan diakibatkan menerima beban terlebih dahulu sampai akhirnya mengalami keruntuhan akibat tegangan yang semakin meningkat, sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan kuat tekan beton dalam kondisi yang linier setelah tercapainya beban ultimate bersifat nonlinier dimana beban menurun sementara regangan terus bertambah.

B. Kolom Dengan 12 Tulangan Utama



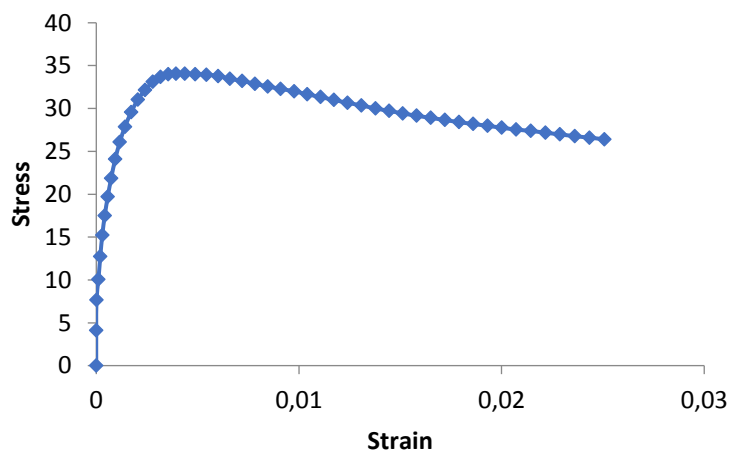
Gambar 4.9 Kolom 12 Tulangan Memanjang



Tabel 4.6 Regangan Regangan Kolom 12 Tulangan Memanjang

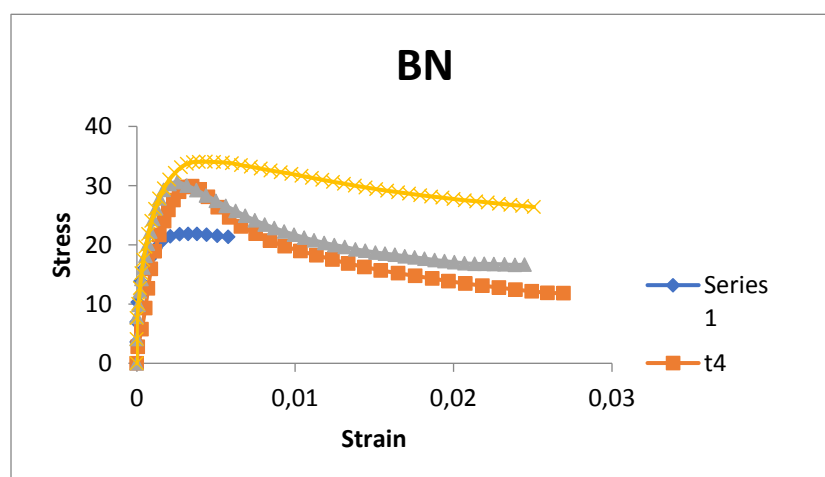
RCH – T12				
1	0	0	21	0.004888
2	0	4.129398	22	0.005441
3	1.27E-05	7.663339	23	0.00602
4	0.000109	10.05492	24	0.006596
5	0.000201	12.73738	25	0.007208
6	0.0003	15.23022	26	0.007831
7	0.000419	17.48968	27	0.00846
8	0.000569	19.69619	28	0.009104
9	0.000737	21.85724	29	0.009765
10	0.000937	24.0795	30	0.010411
11	0.001165	26.09006	31	0.011069
12	0.00142	27.86655	32	0.011732
13	0.001725	29.56577	33	0.012405
14	0.002052	31.02976	34	0.013086
15	0.002417	32.15786	35	0.013779
16	0.002797	33.11705	36	0.01445
17	0.003179	33.68542	37	0.015127
18	0.003562	33.98155	38	0.015813
19	0.003937	34.03562	39	0.016506
20	0.004373	34.0566	40	0.017201

RCH-T12



Gambar 4.10 Tegangan Regangan Kolom 12 Tulangan Memanjang

Pada gambar 4.10 dapat kita ketahui diagram tegangan regangan tekan beton kolom dengan 12 tulangan memanjang yang terjadi pada saat menerima beban, dari gambar terlihat kuat tekan ultimate beton 34,05 Mpa sementara regangan ultimate beton 0,0043 mm. Dari grafik tersebut terlihat perilaku beton beton diawal pembebanan tegangannya meningkat dan diakibatkan menerima beban terlebih dahulu sampai akhirnya mengalami keruntuhan akibat tegangan yang semakin meningkat, sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan kuat tekan beton dalam kondisi yang linier setelah tercapainya beban ultimate bersifat nonlinier dimana beban menurun sementara regangan terus bertambah.



Gambar 4.11 Grafik Gabungan Tegangan Regangan Kolom.

Pada gambar 4.11 dilihat grafik tegangan regangan dari gabungan 4 model kolom yang disimulasikan, dari grafik tersebut dapat dilihat perbedaan puncak tegangan regangan yang terjadi pada kolom, sebelum tercapainya beban ultimate tegangan regangan kuat tekan beton dalam kondisi linier, setelah tercapainya beban tekan ultimate bersifat nonlinier dimana beban menurun dan regangan terus bertambah, diakhir pembebanan nilai yang dikeluarkan mendekati dengan hasil experimental. Grafik yang didapatkan dari hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah tulangan utama maka semakin tinggi nilai tegangan regangan yang didapatkan.

Dari hasil pemodelan yang didapat, perilaku linier menunjukkan bahwa hubungan antara beban dan respons struktural seperti tegangan, regangan adalah proporsional secara langsung. Kolom yang dimodelkan dalam kondisi linier mengikuti hukum Hooke, dimana respons struktural terhadap beban berperilaku linier dan elastis, tanpa mempertimbangkan plastis atau deformasi yang signifikan. Sedangkan pada nonlinier memperhitungkan perubahan sifat material yang tidak linier seperti perubahan kekakuan, plastis yang signifikan ketika kolom memasuki zona plastis, hubungan antara beban dan respons strukturalnya menjadi nonlinier. Sebagai contoh dalam konteks material, perilaku plastis sebuah material adalah contoh nonlinier dimana hubungan antara tegangan dan regangan tidak lagi bersifat linier setelah melewati batas elastis.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Dari hasil simulasi menggunakan program Abaqus 6.14 kolom B,C,D menunjukkan pengaruh jumlah tulangan memanjang jika semakin banyak tulangan memanjang pada kolom maka semakin tinggi nilai tegangan regangan yang didapat. Dari hasil penelitian software yang didapat dengan membandingkan hasil pada experimental maka diperoleh perilaku tegangan dan regangan Kolom A (Kolom Polos) didapatkan kuat tekan ultimate beton sebesar 21,87 Mpa dan regangan ultimate 0,0032 mm. berdasarkan hasil dari experimental, tegangan puncak adalah 22,24 Mpa dan regangan 0,0020. Perilaku material yang digunakan pada FEM menggunakan pendekatan teoritis sehingga menyebabkan sedikit perbedaan dengan hasil experimental, namun diakhir pembebanan nilai yang dikeluarkan mendekati dengan hasil experimental. Kemudian Tegangan regangan yang terjadi saat beban puncak pada Kolom C (8 tulangan memanjang) didapatkan kuat tekan ultimate beton 30,51 Mpa dan regangan ultimate 0,0055 dan hasil dari experimental, tegangan puncak adalah 29,64 Mpa dan regangan 0,00532.
- b. Pola retak pada kolom A bisa dikatakan serupa dengan adanya retak garis dan untuk Kolom C retak pada permukaan sisi kolom dan bagian dalamnya hanya mengalami sedikit kerusakan ini mewakili kerusakan yang terjadi pada hasil uji experimental.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pemodelan variasi rasio tulangan memanang pada kolom persegi ada beberapa saran yang dapat diberikan antara lain adalah

1. Dalam pemodelan, sebaiknya menggunakan ukuran mesh yang lebih halus sehingga dapat memberikan hasil dan visual yang lebih baik.
2. Dalam memodelkan kolom persegi sebaiknya menggunakan perangkat komputer yang memadai sehingga proses simulasi jauh lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Yoyong. "Diagram interaksi perancangan kolom dengan tulangan pada empat sisi berdasarkan SNI 2847: 2013 dan ACI 318M-11." *Jurnal Teknik Sipil* 13.4 (2016): 268-290.
- Asroni, A., 2010. Kolom Fondasi dan Balok T Beton Bertulang, Graha Ilmu,
- Dominggus, Bakarbessy., 2008. *Efektifitas Pengekangan Fine Mash Pada Kolom Persegi Beton Bertulang*
- Fakultas Teknik Universitas Khairun, 2008, *Panduan Skripsi Dan Kerja Praktek Fakultas Teknik*, Penerbit Universitas Khairun. Ternate.
- Kurniawan, Aan. (2018). *Analisis Perilaku Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Lembaran Gfrp Menggunakan Software Abaqus 6.14*. Semarang : Universitas Negeri Semarang.
- Lee, J., & Fenves, G.L. (1998). *Plastic-Damage Model For Cyclic Loading of Concrete Structures*. J. Eng. Mech., 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892), 892-900.
- Logan, D. L., Logan, D. L., Veitch, E., Carson, C., Burrell, K. R., Gould, V., & Wagner, E. (n.d.). *A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition*
- Metwally, I. M., & Metwally, I. M. (2019). *Three-dimensional nonlinear finite element analysis of concrete deep beam reinforced with GFRP bars Three-dimensional nonlinear finite element analysis of concrete deep beam reinforced with GFRP bars. HBRC Journal*, 13(1), 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.02.006>
- Mubarok, Husni. (2019). *Finite Element Analysis Perilaku Beton Bertulang Dan Beton Prategang Menggunakan Software Abaqus 6.14*. Semarang : Universitas Negeri Semarang.
- Nasution, Amrun, and Mukhlis Islam. "Analisis Kolom Beton Bertulang Pada Penampang Persegi Berlubang." *Inersia: Jurnal Teknik Sipil* 11.1 (2019): 19-26.
- Nawy, Edward G., (2003), "Reinforced Concreted A Fundamental Approach" (Fifth Edition), Prentice-Hall International, New Jersey.
- Nawy, G, Edward., 1990,"Reinforced Concrete A Fundamental Approach", United States of America.
- Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2020). *The effect of the ratio of Λ-shaped shear connectors on the flexural behavior of a reinforced concrete frame*. *Advances in Structural Engineering*, 23(12), 2724-2740.

November « 2011 « *Material Teknik*. (n.d.). Retrieved February 11, 2022, from <http://blog.ub.ac.id/andi/2011/11/>

November « 2011 « *Material Teknik*. (n.d.). Retrieved February 11, 2022, from <http://blog.ub.ac.id/andi/2011/11/>

Park, R. & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley and Sons, Inc, Canada.

PBI. (1971). *Peraturan Beton Bertulang Indonesia*. Bandung : Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik.

Preprocessing, simulation, and postprocessing. (n.d.). Retrieved February 27, 2022, from <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEFSARefMap/simagsa-c-abspresimulationpost.htm>

sni 03-2847 tahun 2002 - Penelusuran Google. (n.d.). Retrieved February 4, 2022, from <https://www.google.com/search?q=sni+03-2847+tahun+2002&oq=SNI+03&aqs=chrome.8.69i57j0i512l9.13394j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

SNI 2052. (2017). *Baja Tulangan Beton*. Jakarta : Standar Nasional Indonesia.

SNI 2847. (2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta : Standar Nasional Indonesia.

Surahman, Ridho. (2020). *Analisis Elemen Hingga Pada Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Gfrp (Glass Fiber Reinforced Polymer) Menggunakan Software*. Lampung : Universitas Lampung.

Tavio, T. & Tata, A. (2009). *Predicting Nonlinear Behavior and Stress-Strain Relationship of Rectangular Confined Reinforced Concrete Columns with ANSYS*. Civil Engineering Dimension.

Wang & Salmon. (1993). *Desain Beton Bertulang* (p. 502).

Zangeneh Kamali, A. (2012). Shear strength of reinforced concrete beams subjected to blast loading: Non-linear dynamic analysis.