FINITE ELEMENT ANALYSIS PERILAKU BETON BERTULANG DAN BETON PRATEGANG MENGGUNAKAN *SOFTWARE ABAQUS 6.14*

Skripsi

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil

Oleh

HUSNI MUBAROK

NIM.5113414022

TEKNIK SIPIL

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

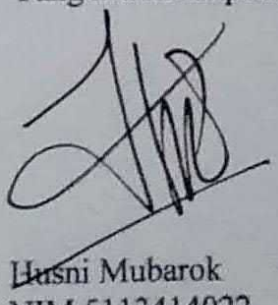
2019

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. 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.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak benaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 28 November 2019
Yang membuat pernyataan



Husni Mubarok
NIM.5113414022

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama	: Husni Mubarok
NIM	: 5113414022
Program Studi	: Teknik Sipil, S1
Judul Skripsi	: *Finite Element Analysis* Perilaku Beton Bertulang dan Beton Prategang menggunakan *Software Abaqus 6.14*

Skripsi tersebut telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi Program Studi S-1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 28 November 2019
Pembimbing

Dr. Mahmud Kori Effendi S.T., M.T.
NIP.198004022006041001

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul *FINITE ELEMENT ANALYSIS* PERILAKU BETON BERTULANG DAN BETON PRATEGANG MENGGUNAKAN *SOFTWARE ABAQUS 6.14* telah dipertahankan di depan sidang Panitia Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggaL 10 bulan Desember tahun 2019.

Oleh

Nama : Husni Mubarok

NIM : 5113414022

Program Studi : Teknik Sipil, S1

Panitia

Ketua

Aris Widodo, S.Pd., M.T
NIP.19650722201121001

Sekretaris

Dr. Rini Kusumawardani, S.T, M.T., M.Sc.
NIP.197809212005012001

Penguji I

Dr. Rini Kusumawardani, S.T, M.T., M.Sc.
NIP.197809212005012001

Penguji II

Endah Kanti P, S.T., M.T.,
NIP.197207091998032003

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Mahmud Kori Effendi S.T., M.T.
NIP.198004022006041001

Mengetahui :
Dekan Fakultas Teknik Unnes

Dr. Nur Qudus, M.T.,IPM.
NIP.196911301994031001

Scanned by CamScanner

ABSTRAK

Beton kuat dalam tekanan namun lemah dalam regangan. Pada beton bertulang, penambahan material baja untuk menahan tegangan tarik, namun banyak hal yang terjadi di lapangan terkadang tidak sesuai dengan kebutuhan struktur. Dalam studi ini, balok beton bertulang dan balok balok pra-tegang dianalisis untuk perilaku non-linier dan dibebani beban eksternal menggunakan metode analisis elemen hingga. Abaqus CAE, adalah software yang digunakan untuk analisis bagian dari beton tersebut. Prediksi numerik menggunakan Abaqus CAE meliputi hubungan beban dan lendutan beton bertulang dan beton pra-tekan serta gambaran variasi tegangan yang terjadi pada beton bertulang dan pra-tekan yang digambarkan melalui aplikasi Abaqus CAE ini.

Geometri benda uji struktur balok beton bertulang yang digunakan dalam penelitian ini diadopsi dari penelitian Buckhouse. Sebelum melakukan analisis numerik pada model balok beton prategang, perlu adanya kalibrasi untuk memastikan keakuratan pemodelan menggunakan *software abaqus 6.14* ini yaitu dengan memodelkan hasil uji laboratorium dari Buckhouse dengan kode benda uji C1(BU) kemudian dimodelkan menggunakan *software abaqus 6.14* (BN) dan balok prategang *abaqus* (BP1). Untuk pembanding hasil pemodelan balok beton prategang *abaqus* (BP1) dikomparasikan dengan hasil peneltian dari Wolanski yang menggunakan aplikasi ANSYS (BP2).

Hasil analisa menggunakan software abaqus menunjukkan balok beton bertulang *abaqus* (BN) mengalami retak pertama pada beban 4981 lbs dengan *displacement* 0,057 inch. Pada Beton Normal Uji lab (BU) retak pertama pada beban 4500 lbs dengan *displacement* 0,06. Untuk beban *ultimate* pada balok beton bertulang *Abaqus* (BN) 16024 lbs dengan *displacement* 3,45 inch dan beban *Ultimate* Beton Normal Uji Lab (BN) 16310 lbs dengan persentase perbandingan selisih hasil sebesar 1,7 %. Hasil analisa pada Beton Prategang *Abaqus* (BP1) beban *ultimate* 28147 lbs dengan *displacement* 2,9 inch atau mampu menampung beban 43% lebih banyak dari Balok Beton Bertulang (BN). Dan untuk Beton Prategang ANSYS (BP1)) beban *ultimate* 28016 lbs dengan *displacement* 3,2 inch . Persentase perbandingan selisih hasil BP1 dan BP2 sebesar 0,4%. Dengan hasil tersebut penelitian perilaku balok beton bertulang dan balok beton prategang dengan metode elemen hingga menggunakan *Software Abaqus 6.14* dilalukukan dengan baik dan mendekati akurat dari hasil uji laboratorium.

Kata Kunci : Balok, Prategang, *Abaqus*, Retak, *Displacement*

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT dan mengharapkan ridho yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Finite Element Analysis* Perilaku Beton Bertulang dan Beton Prategang Menggunakan *Software Abaqus 6.14.* Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam semua mendapatkan safaat-Nya di yaumil akhir nanti, Amin. Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T., Dekan Fakultas Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan fasilitas dan kesempatan bagi penulis untuk mengikuti program S1 di Fakultas Teknik.
3. Aris Widodo, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan fasilitas dan pelayanan selama penulis menempuh pendidikan.
4. Dr. Rini Kusumawardani, S.T, M.T., M.Sc., Koordinator Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan pengarahan dan bantuan selama penulis menimba ilmu.
5. Dr. Rini Kusumawardani, S.T, M.T., M.Sc., Dosen Penguji I yang telah memberi saran dan masukan kepada penulis sehingga skripsi ini menjadi lebih baik.
6. Endah Kanti P, S.T., M.T., Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan sehingga skripsi ini menjadi lebih baik.
7. Dr.Eng. Mahmud Kori Effendi, S.T., M.T., Dosen Penguji III dan selaku Dosen Pembimbing yang telah berkenan memberikan bimbingan, pengarahan, dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
8. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan bantuan selama penulis menimba ilmu di Universitas Negeri Semarang.
9. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang yang telah membantu dalam proses perkuliahan.
10. Semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan segala kritik dan saran. Penulis berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Semarang, 28 November 2019

Penulis

MOTTO

Barang siapa menempuh suatu jalan untuk mencari ilmu,
maka Allah memudahkannya mendapat jalan ke surga
(H.R Muslim)

"Menuntut ilmu adalah taqwa, menyampaikan ilmu adalah ibadah, mengulang-ulang adalah zikir, dan mencari ilmu adalah jihad"

PERSEMBAHAN

Untuk Ibu (Alm. Ida Solicha), Ayah (Suyono yusuf), Adik-adik (Affandi Muslim, Tri Sony Aji Saputra, Hufan Ainun Najib, Nur Jaman, Wahyu Nur Richan Setiawan) yang selalu memberikan semangat, motivasi, dan selalu berdoa yang terbaik untukku.

Untuk Dosen dan Guru yang senantiasa membimbing saya dengan ikhlas.

Untuk teman-teman yang selalu memberikan semangat dan selalu menghibur.

DAFTAR ISI

Halaman

PERNYATAAN KEASLIAN ..... **i**

PERSETUJUAN PEMBIMBING ..... **ii**

PENGESAHAN ..... **iii**

ABSTRAK ..... **iv**

PRAKATA ..... **v**

MOTTO ..... **vi**

PERSEMBAHAN ..... **vii**

DAFTAR ISI ..... **viii**

DAFTAR TABEL ..... **xiii**

PENDAHULUAN **1**

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Identifikasi Masalah 2

1.3. Pembatasan Masalah 2

1.4. Perumusan Masalah 3

1.5. Tujuan Penelitian 3

1.6. Manfaat Penelitian 3

1.7. Penegasan Istilah 4

STUDI PUSTAKA **6**

2.1. Balok 6

2.1.1 Persyaratan Balok Menurut PBBI 1971.N.I 2 hal, 91 : 7

2.1.2Klasifikasi Balok 8

2.2 Beton 8

2.3 Karakteristik Material 10

2.3 Mekanika Material 10

2.4 Karakteristik Material Beton 13

2.4.1. Tegangan dan regangan beton 13

2.5. Karakteristik Material Baja 15

2.5.1. Baja Tulangan 15

2.5.2. Baja Prategang 16

2.6. Struktur Beton Bertulang 17

2.6.1. Konsep Dasar Beton Bertulang 17

2.6.2 Perilaku Balok Beton Bertulang 19

2.6.3 Tegangan Regangan Balok Beton Bertulang 20

2.7. Struktur Beton Prategang 21

2.7.1. Konsep Dasar Beton Prategang 21

2.7.2 Perbandingan Beton Prategang dengan Beton Bertulang 24

2.7.3 Konsep Pemberian Gaya Prategang 25

2.7.4 Metode Pemberian Gaya Prategang 26

2.7.4.1 Metode Pratarik (*Pre-Tension Method*) 26

2.7.4.2 Metode Pascatarik (*Post-Tension Method*) 28

2.8. Pola Keretakan 29

2.9. *Experimen Based Testing of Concrete* 31

2.10. Metode Elemen Hingga..... 32

2.11. Elemen 3-Dimensi Tetrahedral 33

2.12. Software Abaqus 34

2.12.1 Prepocessing..... 39

2.12.2 Simulasi..... 41

2.12.3 Post Processing 41

2.12.4 Satuan dalam *Abaqus* 42

2.12.5 Model Konstitutif Beton 42

2.12.6 Parameter *Concrete Damage Plasticity* 43

METODE PENELITIAN 52

3.1. Materi Penelitian 52

3.2. Peralatan Penelitian..... 53

3.3. *Setup* Penelitian..... 53

3.3.1 Balok Beton Bertulang..... 53

3.3.2. Balok Beton Prategang (BP) 54

3.4. Bagan Alur Penelitian 56

3.5. Metode Analisis 57

3.5.1. Membuka Menu *Software Abaqus CAE 6.14* 57

3.5.2. Pembuatan Modul *Part* Bagian Bagaian Elemen..... 58

3.5.2. Material *Property*..... 63

3.5.3. *Assembly*..... 74

3.5.4. *Step Module*..... 76

3.5.5. *Load* 77

3.5.6. Mesh..... 79

3.5.7. Modul *Job* 81

3.5.8. Post Proccesing..... 84

a. *Output* gaya dari reaksi tumpuan pada *Abaaqus* 85

b. *Output* lendutan pada *Abaqus*..... 86

HASIL DAN PEMBAHASAN 90

4.1. Beton Bertulang 90

4.1.1 Beton uji laboratorium 90

4.1.2 Beton bertulang hasil Analisa menggunakan *software Abaqus 6.14* 92

4.1.3 Pola Retak 93

4.2. Beton Prategang 95

PENUTUP..... 98

5.1. Kesimpulan 98

5.1. Saran..... 100

DAFTAR PUSTAKA..... 101

LAMPIRAN 104

Perhitungan Secara Teoritis 104

1. Balok Beton Bertulang 104

2. Perhitungan Balok Beton Prategang 109

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konsistensi Satuan dalam Abaqus 42

Tabel 2.2 Parameter Concrate Damage Plasticity 44

Tabel 3.1 Data Balok Beton Bertulang..... 53

Tabel 3.2 Data Balok Beton Prategang 54

Tabel 3.3 Data Part Atau Bagian Elemen..... 58

Tabel 3.4 Data Parameter *Plasticity* Beton..... 64

Tabel 3.5 Data Konstitutif Desak Beton 64

Tabel 3.6 Data Konstitutif Tarik Beton..... 65

Tabel 3.7 Parameter *Elasticity* Baja Beton Bertulang..... 68

Tabel 3.8 Parameter *Plasticity* Baja Untuk Beton Bertulang..... 68

Tabel 3.9 Parameter Elasticity Baja Prategang 70

Tabel 3.10 Parameter Plasticity Baja Prategang..... 70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penerapan struktur beton di lapangan yang efisien membutuhkan banyak studi dan pemahaman tentang respon dan perilaku terhadap berbagai muatan. Ada banyak pendekatan untuk mempelajari perilaku struktur beton, diantaranya eksperimental, numerik, teoritis, dll. Pengetahuan tentang perilaku beton sangatlah penting untuk menghindari terjadinya kesalahan struktural pada beton ataupun dalam perbaikan atau perkuatan struktur yang mengalami kerusakan dan kesalahan desain Kajian tentang perilaku struktur beton bertulang pada umumnya diperoleh dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium. Dengan alasan biaya dan keterbatasan waktu untuk penelitian tentang perilaku beton, analisis elemen hingga (*Finite Elemen Analisis*) adalah pendekatan secara *numeric* yang menyediakan alat yang dapat mendekati akurat mensimulasikan perilaku struktur beton. Analisis elemen hingga, seperti yang digunakan dalam rekayasa struktural, menentukan perilaku keseluruhan struktur dengan membaginya menjadi sejumlah elemen sederhana, yang masing-masing memiliki sifat mekanik dan fisik yang terdefinisi dengan baik. Sejumlah software analisis elemen hingga komersial yang tersedia antara lain *ABAQUS, ATENA, ANSYS, NASTRAN, Hypermesh*, dll. Penggunaan perangkat tersebut untuk analisa struktur sudah terbukti lebih cepat dan sangat efektif jika dibandingkan dengan analisis ekperimental. Studi ini menyajikan eksperimental analisis perilaku non-liniear balok beton bertulang dan

balok pra-tegang yang menggunakan metode elemen hingga *ABAQUS 6.14*. Pada penelitian ini yang akan ditinjau adalah perilaku beton bertulang dan balok prategang yang meliputi hubungan beban dan lendutan serta gambaran visual tegangan pada masing-masing pemodelan.

1.2. Identifikasi Masalah

Permasalahan perilaku struktur balok prategang bisa diidentifikasi sebagai berikut :

1. Perbandingan perilaku struktur balok beton bertulang uji laboratorium dengan Analisa numerik menggunakan *Abaqus 6.14.*
2. Analisa perilaku beton prategang menggunakan metode numerik.

1.3. Pembatasan Masalah

Untuk memperkuat pembahasan dari identifikasi masalah yang ada, maka perlu adanya pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Benda uji dan material properti yang digunakan adalah 1. balok beton normal dengan dimensi 180 inch x 18 inch x 10 inch dan balok beton prategang dengan dimensi 90 inch x 18 inch x 5 inch (karena simetris, untuk mempermudah Analisa dibagi menjadi empat bagian), menggunakan bahan beton dengan mutu beton fc' = 4800 Psi mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Christopher M. Foley and Evan R. Buckhouse di *Marquee University*.
2. Model yang dianalisa diambil dari jurnal ilmiah.

3. Penelitian dilakukan terhadap perilaku lentur beton bertulang dan beton prategang.
4. Analisa numerik beton bertulang dan beton prategang menggunakan program *Abaqus 6.14.*
5. Analisis yang dilakukan berupa:
    a. Hubungan beban (P) dan *displacement* (u)
    b. Pola retak

1.4. Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah maka diambil rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku struktur balok beton bertulang uji laboratorium dengan Analisa numerik menggunakan *Abaqus 6.14.*
3. Bagaimana analisa perilaku beton prategang menggunakan metode numerik.

1.5. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui :

1. Untuk menganalisa dan mengevaluasi hasil laboratorium uji beton bertulang dengan hasil analisa secara numerik menggunakan *software Abaqus 6.14.*
2. Untuk mengetahui perilaku struktur balok beton prategang dari hasil analisa simulasi menggunakan *software Abaqus 6.14.*

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Dapat mengkalibrasi hasil uji laboratorium dengan hasil Analisa secara numerik sehingga penelitian sejenis bisa lebih efektif.

2. Dapat mengetahui perilaku struktur balok beton bertulang dan balok beton prategang dari hasil analisa simulasi menggunakan *software Abaqus 6.14.*
3. Dapat mengetahui pola retakan dan model keruntuhan struktur balok beton bertulang dan balok prategang dari hasil analisa simulasi menggunakan *software Abaqus 6.14.*

1.7. Penegasan Istilah

Tulisan ini membahas mengenai perilaku lentur struktur balok beton bertulang dan balok beton prategang menggunakan *Software Abaqus 6.14*, untuk itu penulis perlu memberikan penegasan dan penjelasan seperlunya sebagai berikut:

1. Analisis

   Definisi mengenai analisis, yaitu menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (2002:43), "Analisis adalah penguraian suatu pokok atas berbagai bagiannya dan penelaahan bagian itu sendiri serta hubungan antar bagian untuk memperoleh pengertian yang tepat dan pemahaman arti keseluruhan".

2. Baja prategang

   Batang baja prategang merupakan paduan baja berkekuatan tarik tinggi yang digunakan untuk pemberian prategang dapat berulir atau polos, dan tersedia dalam ukuran diameter nominal dari ¾ in. (19 mm) sampai 1,375 in. (35mm). batang batang tersebut harus memenuhi standar ASTM 722. Selain ditarik dalam kondisi dingin dengan maksud meningkatkan kuat leleh, batang prategang juga dilepaskan tegangannya (stress relieved) untuk meningkatkan daktilitasnya (Nawy, 2001).

3. Software Abaqus

Abaqus salah satu software yang digunakan dalam metode elemen hingga untuk menganalisa simulasi dari pengujian maupun pemodelan saja. Abaqus banyak dgunakan dalam bidang ilmu teknik sipil karena mampu menganalisis dan mensimulasikan dengan baik kontruksi bangunan.

Abaqus sendiri dalam metode elemen hingga memiliki 3 (tiga) modul antara lain :

I. Abaqus standard, adalah salah satu modul elemen hingga untuk keperluan umum, modul ini menyedikan kemampuan untuk menganlisis berbagai masalah termasuk nonstruktural.

II. Abaqus Explicit, adalah yang digunakan dalam metode elemen hingga untuk benda yang lebih dinamis.

III. Abaqus CAE, yaituvmodul analisis yang lebih komplit, ruang lingkup Abaqus untuk memodelkan, mengelola, memonitor analisa abaqus dan memvisualisasikan hasilnya (Simulia). Pada penelitian kali ini menggunakan Abaqus CAE versi Abaqus 6.14.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. Balok

Balok adalah bagian dari suatu struktur bangunan yang rigid dan dirancang untuk mentransfer dan menanggung beban menuju elemen-elemen kolom penopang. Selain itu balok juga mempunai fungsi sebagai pengikat kolom-kolom yang apabila terjadi pergerakan pada kolom tersebut tetap bersatu sebagai struktur bangunan mempertahankan bentuk dan posisinya seperti semula. Pola gaya yang tidak seragam dapat mengakibatkan balok melengkung atau defleksi yang harus ditahan oleh kekuatan internal material.

Prinsip perencanaan balok induk yang dibebani lentur atau aksial berdasarkan SNI 03-2847-2013 Pasal 9.3 adalah sebagai berikut :

a) Gaya Tekan Terfaktor

   Gaya aksial tekan terfaktor komponen struktur tidak melebihi 0,1.

b) Rasio Perbandingan Lebar dengan Tinggi.

   Perbandingan lebar terhadap tinggi balok (b/h) tidak boleh kurang dari 0,3.

   Menentukan nilai h (pembulatan keatas kelipatan 50 mm) dengan:

   1. Tinggi balok minimum yang diisyaratkan agar lendutan tidak diperiksa.
   2. Bila h aktual < h min balok, lendutan perlu diperiksa sesuai dengan

      Tabel 9.5 (a) SNI 03-2847-2013 Pasal 21.5.1.3.

      bw > 0,3 h , atau

      bw > 250 mm.

2.1.1. Persyaratan Balok Menurut PBBI 1971.N.I 2 hal, 91 :

a) Lebar badan balok tidak boleh diambil kurang dari 1/50 kali bentang bersih. Tinggi balok harus dipilih sedemikian rupa hingga dengan lebar badan yang dipilih.

b) Untuk semua jenis baja tulangan, diameter (diameter pengenal) batang tulangan untuk balok tidak boleh diambil kurang dari 12 mm. Sedapat mungkin harus dihindarkan pemasangan tulangan balok dalam lebih dari 2 lapis, kecuali pada keadaan-keadaan khusus.

c) Tulangan tarik harus disebar merata didaerah tarik maksimum dari penampang.

d) Pada balok-balok yang lebih tinggi dari 90 cm pada bidang-bidang sampingnya harus dipasang tulangan samping dengan luas minimum 10% dari luas tulangan tarik pokok. Diameter batang tulangan tersebut tidak boleh diambil kurang dari 8 mm pada jenis baja lunak dan 6 mm pada jenis baja keras.

e) Pada balok senantiasa harus dipasang sengkang. Jarak sengkang tidak boleh diambil lebih dari 30 cm, sedangkan dibagian balok sengkang sengkang bekerja sebagai tulangan geser. Atau jarak sengkang tersebut tidak boleh diambil lebih dari 2/3 dari tinggi balok. Diameter batang sengkang tidak boleh diambil kurang dari 6 mm pada jenis baja lunak dan 5 mm pada jenis baja keras.

2.1.2 Klasifikasi Balok

a) Balok sederhana bertumpu pada kolom diujung-ujungnya, dengan satu ujung bebas berotasi dan tidak memiliki momen tahan. Seperti struktur statis lainnya, nilai dari semua reaksi,pergeseran dan momen untuk balok sederhana adalah tidak tergantung bentuk penampang dan materialnya.
b) Kantilever adalah balok yang diproyeksikan atau struktur kaku lainnya didukung hanya pada satu ujung tetap.
c) Balok teritisan adalah balok sederhana yang memanjang melewati salah satu kolom tumpuannya.
d) Balok dengan ujung-ujung tetap (dikaitkan kuat) menahan translasi dan rotasi.
e) Bentangan tersuspensi adalah balok sederhana yang ditopang oleh teristisan dari dua bentang dengan konstruksi sambungan pin pada momen nol.
f) Balok kontinu memanjang secara menerus melewati lebih dari dua kolom tumpuan untuk menghasilkan kekakuan yang lebih besar dan momen yang lebih kecil dari serangkaian balok tidak menerus dengan panjang dan beban yang sama.

2.2. Beton

Beton didefinisikan sebagai campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolik (portland cement), agregat kasar, agregat halus, dan air dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah (admixture atau additive).

DPULPMB memberikan definisi tentang beton sebagai campuran antara semen portland atau semen hidrolik yang lainnya, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan yang membentuk massa padat (SNI 03-2847-2002). Nugraha, Paul (2007), mengungkapkan bahwa pada beton yang baik, setiap butir agregat seluruhnya terbungkus dengan mortar. Demikian pula halnya dengan ruang antar agregat, harus terisi oleh mortar. Jadi kualitas pasta atau mortar menentukan kualitas beton. Semen adalah unsur kunci dalam beton, meskipun jumlahnya hanya 7-15% dari campuran. Beton dengan jumlah semen 23 yang sedikit (sampai 7%) disebut beton kurus (lean concrete), sedangkan beton dengan jumlah semen yang banyak disebut beton gemuk (rich concrete). Menurut Mulyono (2006) secara umum beton dibedakan kedalam 2 kelompok, yaitu : 1. Beton berdasarkan kelas dan mutu beton. Kelas dan mutu beton ini, di bedakan menjadi 3 kelas, yaitu : a. Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan non struktutral. Untuk pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahanbahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Mutu kelas I dinyatakan dengan B0. Berikut :

1. Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli.
2. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K 125, K 175, dan K 225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan terhadap mutu bahanbahan sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak

disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu-mutu K 125 dan K 175 dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinu dari hasilhasil pemeriksaan benda uji.

3. Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural yang lebih tinggi dari K 225. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap serta dilayani oleh tenaga-tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara kontinu.

2.3. Karakteristik Material

Setiap material memiliki karakteristik tersediri. Untuk bisa mendesain atau memodelkan struktur beton bertulang dan beton prategang secara optimal, kita harus mengenal terlebih dahulu karakteristik/perilaku dari setiap material yang digunakan dalam struktur beton bertulang dan balok prategang. Material yang digunakan dalam pemodelan struktur beton bertulang dan balok prategang adalah, beton mutu tinggi, tendon baja prategang, dan tulangan baja biasa.

2.3.1. Mekanika Material

Melihat semua properti yang dimiliki dari setiap material, kurva tegangan – regangan adalah yang paling menarik untuk dibahas. Kurva tegangan – regangan dari suatu material memuat banyak informasi yang dapat kita pelajari atau amati (tegangan maksimum, regangan maksimum, kuat tarik, kuat tekan, modulus elastis, dll).

a) Tegangan

Sebuah gaya dan momen yang bekerja pada sebuah titik dari potongan penampang menghasilkan distribusi tegangan yang bekerja pada penampang tersebut. Tegangan dapat dipisahkan berdasarkan sumbu mana yang tegangan tersebut bekerja. Secara umum tegangan dapat dibagi anatara tegangan normal dan tegangan geser.

Tegangan normal adalah tegangan yang diakibatkan oleh gaya yang bekerja pada sumbu normal penampang dimana

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad \text{..... (1.1)}$$

dimana jika gaya yang bekerja menyebabkan pertambahan panjang maka disebut gaya tarik, sedangkan bilagaya yang bekerja menyebabkan perpendekan batang maka disebut gaya tekan.

b) Regangan

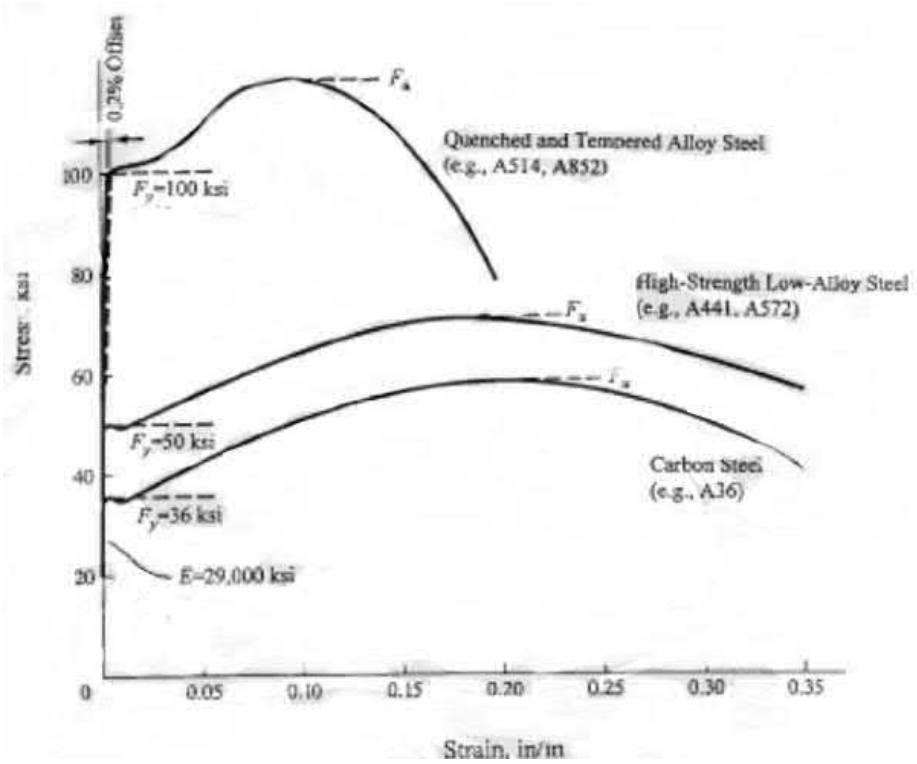
Ketika sebuah gaya bekerja pada benda, maka gaya yang bekerja tersebut akan merubah bentuk dan ukuran benda yang dikenai gaya tersebut. Akan tetapi perubahan tidak terjadi pada volume benda. pada gaya tekan benda akan memendek dan penampang akan membesar sedangkan pada gaya tarik benda akan memanjang dan luas penampang akan mengecil sehingga volume benda akan tetap sama.

Regangan menggambarkan deformasi yang terjadi pada panjang dan sudut antara dua titik. regangan normal adalah pertambahan panjang per satuan panjang dimana

$$\varepsilon = \lim_{B \to A\ long\ n} \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad \text{..... (1.2)}$$

c) Tegangan – regangan

Berdasarkan rumus tegangan dan regangan normal diatas kita dapat membuat grafik tegangan dan regangan. Grafik tegangan regangan pada setiap material adalah unik. dibawah akan dibahas grafik tegangan regangan pada baja



Gambar 2.1 grafik tegangan regangan pada baja

Beberapa karakteristik material dapat dilihat dari grafik diatas :

1. perilaku elastis : perilaku elastis terjadi apabila tegangan yang terjadi dalam area elastis. Dimana pada daerah elastis ini kurva yang terbentuk adalah garis linier. Jadi pada daerah tersebut tegangan yang terjadi proporsional terhadap regangan yang terjadi. Titik akhir dari garis linier ini disebut dengan batas elastis.

2. leleh : tegangan yang terjadi sedikit diatas area elastis yang akan menyebabkan material deformasi secara permanen. Perilaku ini disebut dengan titik leleh.
3. *strain hardening* : ketika material telah mencapai titik leleh atas tegangan dapat dititngkatkan dan menghasilkan kurva yang terus meningkat tetapi semakin datar hingga mencapai tegangan ultimate. Kurva tersebut dinamakan *strain hardening.*
4. *necking* : seteleah melewati tegangan ultimate kurva menurun hingga mencapai tegangan patah. pada area ini tegangan turun dan kemudian regangan bertambah tetapi luas permukaan berkurang pada sebuah titik, atau dinamakan *necking.*

2.4. Karakteristik Material Beton

Beton dalah material yang umum digunakan pada pekerjaan kontruksi bangunan. Beberapa properties dari beton yang penting yaitu :

1. Kuat terhadap tekan
2. Tahan lama dan tahan terhadap perubahan suhu
3. Tahan terhadap abrasi
4. Kuat terhadapa perubahan lingkungan (air laut, sulfat pada tanah, dll)

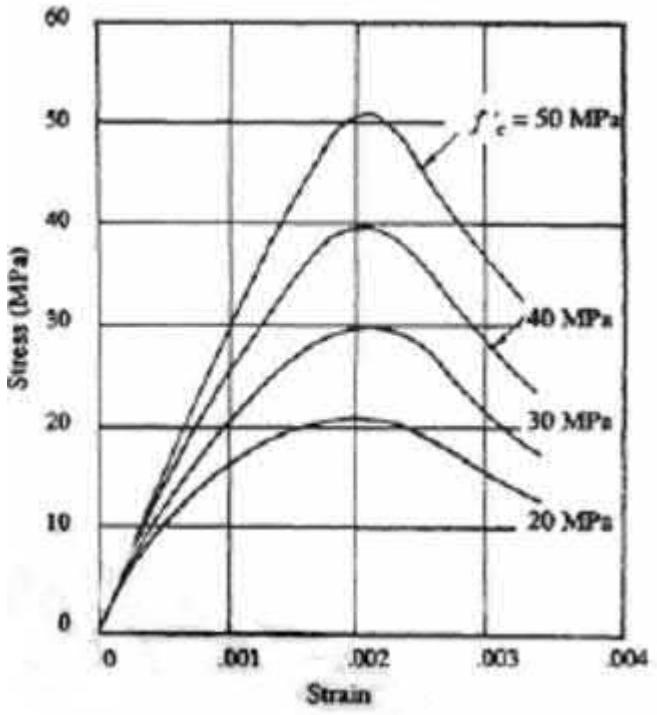
Keunggulan lain dari beton adalah material bahan baku di alam yang mudah didapat. hal tersebut membuat penggunaan beton bisa diaplikasikan diberbagai tempat.

2.4.1. Tegangan dan regangan beton

Kuat tekan beton biasanya didapat dari silinder beton dengan ratio tinggi dengan diameter adalah 2. Silinder beton diberi gaya longitudinal dengan laju tegangan yang rendah hingga mencapai tegangan maksimum dalam waktu 2 – 3 menit.

Standar pengujian beton menggunakan silinder dengan tinggi 305 mm dan diameter 152. Kuat tekan beton diuji pada saat umur beton 28 hari. Kuat tekan beton berkisar 13,8 – 55,2 N/mm^2.

Grafik tegangan – regangan beton pada gambar dibawah ini



Gambar 2.2 Grafik tegangan – regangan beton

umumnya kurva tegangan regangan pada beton mendekati linier sampai dengan setengah dari kuat tekan beton akan tetapi mendekati puncak dari kurva maka garis akan mendekati datar. Pada beton degan mutu rendah maka puncak dari kurva tegangan dan regangan yaitu datar.

Modulus elastisitas beton pada daerah elastis pada SNI dapat diambil sebesar

$$E = 4730 \sqrt{f'_c}$$

denga tegangan ultimate pada beton bisa diambil sebesar

$$\sigma_{\mu} = 0.67 \frac{f_{cu}}{\gamma_m} N/mm^2$$

dan regangan beton pada saat tegangan ultimate adalah

$$\varepsilon_y = 2.4\, x\, 10^{-10} (\frac{f_{cu}}{\gamma_m})^{\frac{1}{2}}$$

2.5. Karakteristik Material Baja

2.5.1. Baja Tulangan

Baja tulangan merupakan material berkekuatan tinggi yang memiliki kekuatan tarik maupun tekan, kekuatan lelehnya kurang lebih sepuluh kali dari kekuatan tekan struktur beton yang umum, atau seratus kali dari kekuatan tariknya. Menurut SNI 03-2847-2013, tulangan yang dapat digunakan pada elemen beton bertulang adalah baja tulangan dan baja kawat . Baja tulangan yang tersedia di 26 pasaran ada dua jenis, yaitu Baja Tulangan Polos (BJTP) dan Baja Tulangan Ulir (BJTD).

Tulangan polos biasanya digunakan untuk tulangan geser, begel, atau sengkang. Tulangan polos mempunyai tegangan leleh (fy) minimal sebesar 240 MPa (BJTP-24), dengan ukuran Ø6, Ø8, Ø10, Ø12, Ø14 dan Ø16.

Tulangan ulir/*deform* digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang. Tulangan ulir mempunyai tegangan leleh (fy) minimal 300 MPa (BJTD-30), dengan ukuran D10, D13, D16, D19, D22, D25, D29, D32 dan D36. SNI 03-2847-2013 hanya mengijinkan penggunaan baja tulangan polos pada tulangan spiral, sedangkan untuk penulangan lainnya diisyaratkan untuk menggunakan baja tulangan ulir. Mutu Baja yang digunakan dalam proyek.

2.5.2. Baja Prategang

Baja prategang dapat berbentuk kawat-kawat tunggal, *strands* yang terdiri atas beberapa kawat yang dipuntir membentuk elemen tunggal dan batang-batang bermutu tinggi. Tiga jenis yang umum digunakan adalah:

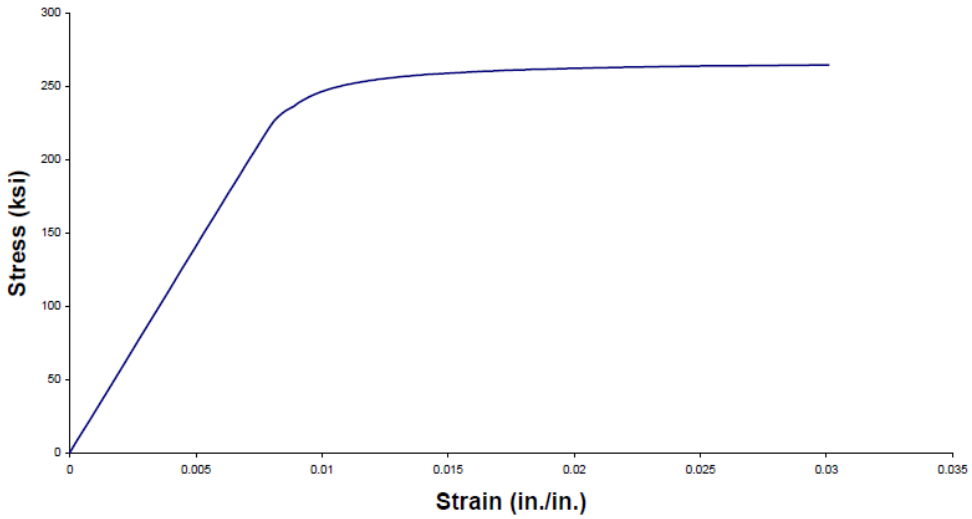
a) Kawat-kawat relaksasi rendah atau *stress-relieved* tak berlapisan.
b) *Strands* relaksasi rendah atau *stress-relieved strands* tak berlapisan.
c) Batang-batang baja mutu tinggi tak berlapisan.

Kawat-kawat *stress-relieved* adalah kawat-kawat tunggal yang ditarik-dingin yang sesuai dengan standar ASTM A 421; *stress-relieved strands* mengikuti standar ASTM A 416. *Strands* terbuat dari tujuh kawat dengan memutir enam diantaranya pada *pitch* sebesar 12 sampai 16 kali diameter di sekeliling kawat lurus yang sedikit lebih besar. Pelepasan tegangan dilakukan sesudah kawat-kawat dijalin menjadi *strand*.

Baja tulangan merupakan material berkekuatan tinggi yang memiliki kekuatan tarik maupun tekan, kekuatan lelehnya kurang lebih sepuluh kali dari kekuatan tekan struktur beton yang umum, atau seratus kali dari kekuatan tariknya. Menurut SNI 03-2847-2013, tulangan yang dapat digunakan pada elemen beton bertulang adalah baja tulangan dan baja kawat . Baja tulangan yang tersedia di 26 pasaran ada dua jenis, yaitu Baja Tulangan Polos (BJTP) dan Baja Tulangan Ulir (BJTD).

Tulangan polos biasanya digunakan untuk tulangan geser, begel, atau sengkang. Tulangan polos mempunyai tegangan leleh (fy) minimal sebesar 240 MPa (BJTP-24), dengan ukuran Ø6, Ø8, Ø10, Ø12, Ø14 dan Ø16.

Tulangan ulir/*deform* digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang. Tulangan ulir mempunyai tegangan leleh (fy) minimal 300 MPa (BJTD-30), dengan ukuran D10, D13, D16, D19, D22, D25, D29, D32 dan D36. SNI 03-2847-2013 hanya mengijinkan penggunaan baja tulangan polos pada tulangan spiral, sedangkan untuk penulangan lainnya diisyaratkan untuk menggunakan baja tulangan ulir. Mutu Baja yang digunakan dalam proyek.



Gambar 2.3 Grafik tegangan – regangan baja prategang 270 ksi

2.6. Struktur Beton Bertulang

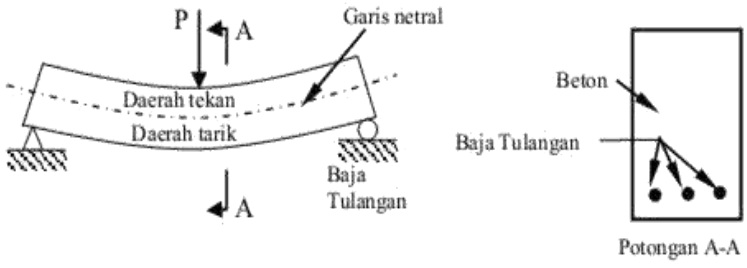
2.6.1. Konsep Dasar Beton Bertulang

Beton banyak digunakan secara luas sebagai bahan bangunan. Bahan beton diperoleh dengan cara mencampurkan semen portland, air, dan agregat dan kadang-kadang bahan tambah yang sangat bervariasi mulai dari bahan kimia tambahan, serat, sampai bahan buangan nonkimia pada perbandingan tertentu. Campuran tersebut apabila dituangkan dalam cetakan kemudian

dibiarkan maka akan mengeras seperti batuan (Tjokrodimuljo, 1996).

Pada dasarnya beton bertulang merupakan gabungan logis dari dua jenis bahan material yaitu beton polos dan tulangan baja. Beton polos merupakan bahan yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi memiliki kekuatan tarik yang rendah. Sedangkan tulangan baja akan memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Dengan adanya kelebihan masing masing elemen tersebut, maka konfigurasi antara beton dan tulangan baja diharapkan dapat saling kerjasama dalam menahan gaya-gaya yang bekerja dalam struktur tersebut, dimana gaya tekan ditahan oleh beton, dan tarik ditahan oleh tulangan baja (salmon, 1993). Baja dan beton, dapat bekerja sama atas dasar beberapa hal:

1. Lekatan yang merupakan interaksi antara tulangan baja dengan beton sekelilingnya, yang akan mencegah slip dari baja relatif terhadap beton.
2. Campuran beton yang memadai memberikan sifat anti serap yang cukup dari beton mencegah karat baja.
3. Angka kecepatan muai yang relatif serupa menimbulkan tegangan antara baja dan beton yang dapat diabaikan dibawah perubahan suhu udara.



Gambar 2.4 Kedudukan batang-batang tulangan dalam balok beton bertulang.

Sumber: Salmon, 1993

2.6.2 Perilaku Balok Beton Bertulang

Perilaku balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Ada tiga kemungkinan yang bisa terjadi yang menyebabkan kegagalan balok beton bertulang, yaitu :

a. Kondisi *balanced reinforced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan. Kondisi regangan : εc = 0,003 dan $\varepsilon s = f y \, Es$. Pada kondisi ini berlaku : $\rho = \rho balanced$ dan $= \varepsilon y$.

b. Kondisi *Over-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh. Pada kondisi ini berlaku: $\rho > \rho balanced$ dan $\varepsilon s < \varepsilon y$.

c. Kondisi *Under-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya. Pada kondisi ini berlaku : ρ < 75% $\rho balanced$ dan $\varepsilon s > \varepsilon y$.

Balok disebut *under-reinforced* jika balok mempunyai lebih sedikit tulangan dari pada yang diperlukan untuk suatu perbandingan seimbang. Jika sebuah balok berada dalam keadaan under-reinforced dan beban ultimit sudah hampir tercapai, baja akan mulai meleleh meskipun tegangan pada beton tekan masih belum mencapai tegangan ultimitnya. Jika beban terus diperbesar, tulangan

akan memanjang sehingga terjadi lendutan dan muncul retak besar pada beton tarik. Kondisi ini menjadi peringatan bahwa beban harus dikurangi atau struktur akan rusak dan runtuh. Hal inilah yang menjadi pertimbangan suatu balok harus didesain tetap dalam kondisi *under-reinforced.*

2.6.3 Tegangan Regangan Balok Beton Bertulang

Apabila terdapat gaya luar yang membebani suatu balok dengan nilai yang ditahan oleh beton dan baja tulangan relatif kecil, dan tegangan terluar beton lebih kecil dari modulus tarik, seluruh serat penampang secara efektif dapat menahan beban tersebut bersama dengan baja tulangan. Distribusi tegangan dalam penampang diilustrasikan dalam gambar 2.2.

Karena deformasi baja tulangan dan serat pada lapis yang sama adalah sebanding, gaya internal baja tulangan dapat ditentukan melalui perbandingan regangan. Konsep material homogen berlaku, dan hubungan antar momen dan tegangan dapat dirumuskan melalui persamaan :

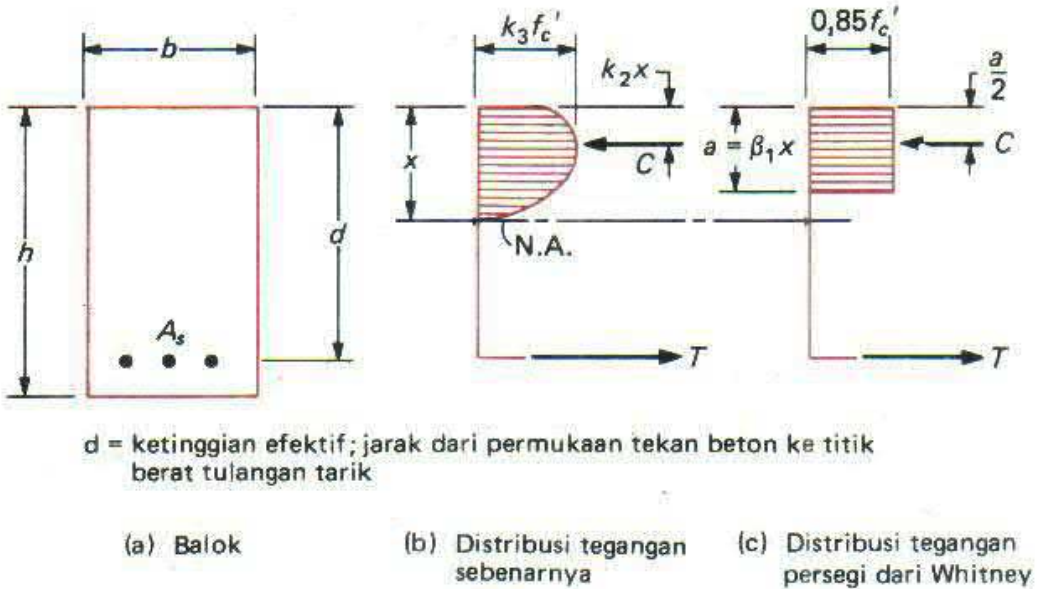
$$f = \frac{M.y}{I}$$

Dimana :

f = tegangan pada serat terluar

M = momen lentur penampang

y = jara ke serat terluar



Gambar 2.5 Definisi Dari Distribusi Tegangan Rektanguler Whiteney

Sumber ; Solomon, 1993

Apabila beban tersebut meningkat hingga kekuatan tarik beton dilampaui, tegangan tarik pada serat terluar akan lebih besar dari modelus terluar, dan retak akibat tarik akan terjadi. Karena serat beton tarik telah mengalami retak, maka pengaruhnya dalam menahan gaya internal dapat diabaikan. Seluruh tarikan akan ditahan oleh baja tulangan.

2.7. Struktur Beton Prategang

2.7.1. Konsep Dasar Beton Prategang

Pemberian gaya prategang secara longitudinal sejajar sumbu komponen struktur dikenal sebagai pemberian prategang linier. Pemberian gaya prategang dapat dilakukan sebelum atau sesudah beton dicor. Pemberian gaya prategangsebelum pengecoran beton disebut sebagai sistem pratarik (*pre-tension*) dan pemberian gaya prategang sesudah dilakukan pengecoran disebut sebagai sistem pasca-tarik (*post-tension*).

Beton prategang mempunyai 2 jenis penegangan, yaitu prategang penuh (*fully-stressed*) dan prategang sebagian (*partial-stressed*). Prategang penuh (*fullystressed*) merupakan pemberian gaya prategang hingga struktur tidak diizinkan menerima tegangan tarik baik pada masa transfer maupun pada saat layan dan tegangan pada serat bawah dianggap tidak ada. Sedangkan prategang sebagian (*partial-stressed*) merupakan struktur yang direncanakan untuk meneriam tegangan tarik di penampang selama masa transfer maupun masa layan dan pada serat bawah memiliki tegangan yang tidak sama dengan nol.

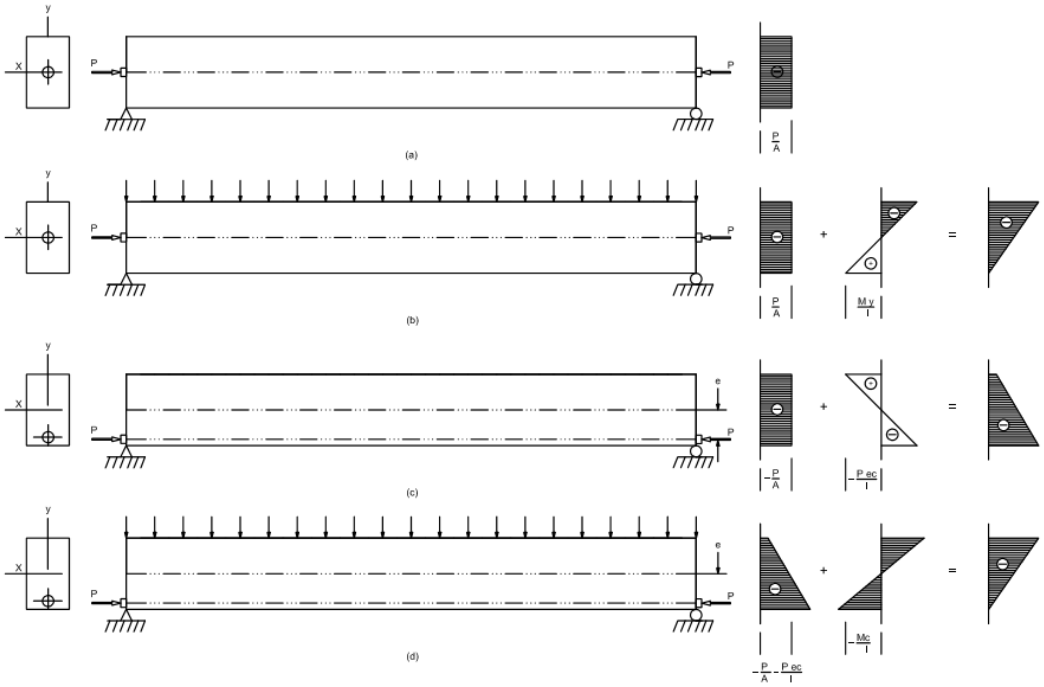
Menurut Nawy (2001) menyatakan bahwa pada balok prategang, balok diasumsikan bersifat homogen dan elastis. Ketidakmampuan beton untuk menahan tegangan tarik, digantikan oleh tegangan tekan yang diakibatkan oleh tendon prategang. Berikut konsep-konsep dasar pemberian prategang. Tinjauan balok persegi panjang yang ditumpu sederhanan mengalami gaya prategang *P kosentris* seperti pada gambar 3.1(a). Tegangan tekan seragam dan mempunyai intensitas :

$$f = -\frac{P}{Ac}$$

Dimana :

Ac = b.h

P = gaya tekan



Gambar 2.6 Distribusi tegangan serat beton pada balok persegi panjang dengan tendon lurus. (a) Tendon konsentris, hanya prategang. (b) Tendon konsentris, berat sendiri ditambahkan. (c) Tendon eksentris, hanya prategang. (d) Tendon eksentris, berat sendiri ditambahkan.

Sumber: *Beton Prategang suatu Pendekatan Mendasar Jilid I* (G. Nawy. 2001)

Jika timbul beban transversal pada balok 3.1(b), maka akan timbul momen maksimum ditengah bentang, maka tegangan serat atas menajdi :

$$f^t = \frac{P}{AC} - \frac{MC}{I_g}$$

dan dengan pada serat bawah menjadi :

$$f_b = \frac{P}{AC} - \frac{MC}{I_g}$$

dimana :

f^t = tegangan serat atas

f_b = tegangan serat bawah

c = h/2, untuk penampang persegi panjang

I_g = $bh^3/12$, untuk momen inersia bruto penampang

Pada konsep ini, gaya *P kosentris* menambah tegangan lentur tekan yang terjadi tegangan serat atas.

Untuk menghindari pembatasan ini, perlu ditambah tegangan tarik di serat atas dengan cara meletakan tendon prategang secara eksentris di bawah garis netral. jika tendon diletakan dengan besar eksentris e dari pusat berat beton, maka akan timbul momen *Pe,* sehingga tegangan di tengah bentang pada tegangan serat atas menjadi :

$$f^t = \frac{P}{AC} + \frac{Pec}{I_g} - \frac{MC}{I_g}$$

Sedangkan tegangan pada serat bawah menjadi :

$$f_b = \frac{P}{AC} - \frac{Pec}{I_g} + \frac{MC}{I_g}$$

Dimana: Ac = luas penampang beton

P = gaya tekan

e_c = eksentris tendon

M_c = momen akibat berat sendiri

I_g = momen inersia beton

2.7.2 Perbandingan Beton Prategang dengan Beton Bertulang

Tegangan permanen dikomponen struktur prategang diberikan sebelum seluruh beban mati dan hidup bekerja, agar tegangan tarik netto yang ditimbulkan oleh beban-beban tersebut dapat dieleminasi atau sangat dikurangi. Pada beton bertulang, diasumsikan bahwa kuat tarik beton dapat diabaikan. Hal ini disebabkan gaya tarik yang berasal dari momen lentur ditahan oleh lekatan yang

terjadi antara tulangan dan beton. Dengan demikian, retak dan defleksi pada dasarnya tidak dapat kembali didalam beton bertulang apabila komponen struktur tersebut mencpai kondisi batas pada saat mengalami beban kerja.

Tulangan di dalam komponen struktur beton bertulang tidak memberikan gaya dari dalam komponen struktur tersebut, suatu hal yang berlawanan dengan aksi baja prategang. Baja yang dibutuhkan untuk mneghasilkan gaya prategang didalam komponen struktur, sehingga memungkinkan terjadinya pemulihan retak dan defleksi. Apabila kuat tarik lentur beton melampaui, komponen struktur prategang mulai beraksi seperti elemen beton bertulang. Namun dengan mengontrol besarnya prategang, suatu sistem struktur dapat dibuat fleksibel atau kaku tanpa mempengaruhi kekuatannya.

2.7.3 Konsep Pemberian Gaya Prategang

Ada 3 konsep yang berbeda-beda yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Hal ini penting bagi seorang perencana untuk mengerti ketiga konsep tersebut agar dapat mendesain beton prategang dengan sebaik dan seefisien mungkin. Ketiga konsep tersebut sebagai berikut:

1. Konsep Pertama: Sistem prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis. Beton yang tidak mampu menahan tarikan dan kuat memikul tekanan (umumnya dengan baja mutu tinggi yang ditarik) sedemikian rupa sehingga bahan yang getas dapat memikul tegangan tarik. Dari konsep inilah lahir kriteria “tidak ada tegangan tarik” pada beton. Umumnya telah diketahui bahwa jika tidak ada tegangan tarik pada beton,

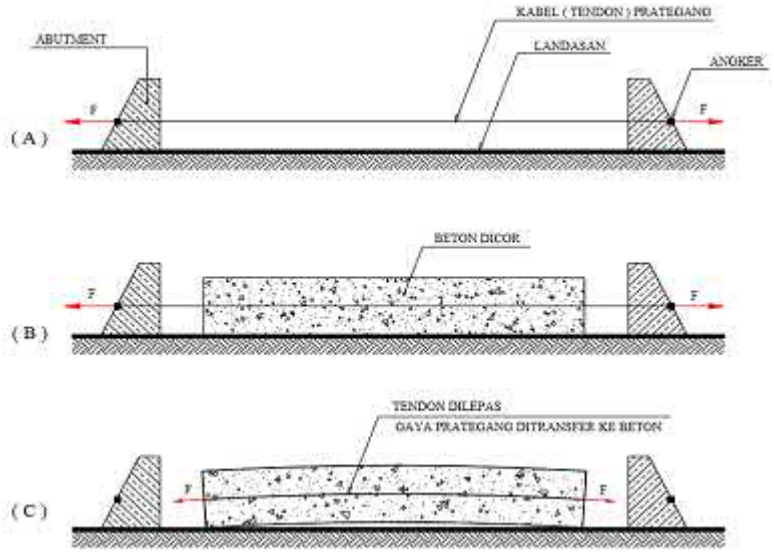
berarti tidak terjadi retak dan beton tidak merupakan bahan yang getas, melainkan berubah menjadi bahan yang elastis.

2. Konsep Kedua**,** Sistem prategang merupakan kombinasi baja mutu tinggi dengan beton. Pada beton prategang, baja mutu tinggi dipakai dengan jalan menariknya sebelum kekuatannya dimanfaatkan sepenuhnya. Jika baja mutu tinggi ditanamkan pada beton seperti pada beton bertulang biasa, beton sekitarnya akan menjadi retak sebelum kekuatan baja digunakan. Oleh karena itu, baja perlu ditarik sebelumnya terhadap beton. Dengan menarik dan menjangkarkan baja ke beton, dihasilkan tegangan dan regangan tekan pada beton dan tegangan dan regangan tarik pada baja. Kombinasi ini memungkinkan pemakaian atau perencanaan yang aman dan ekonomis dari kedua bahan tersebut dimana hal ini tidak akan tercapai jika baja hanya ditanamkan pada beton saja seperti beton bertulang.
3. Konsep ketiga, Sistem prategang untuk mencapai perimbangan beban. Konsep ini menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang.

2.7.4 Metode Pemberian Gaya Prategang

2.7.4.1 Metode Pratarik (*Pre-Tension Method*)

Baja diberikan gaya prategang terlebih dahulu sebelum dicor. Adapun prinsip dari metode ini ialah sebagai berikut :



Gambar 2.7 Metode Pratarik

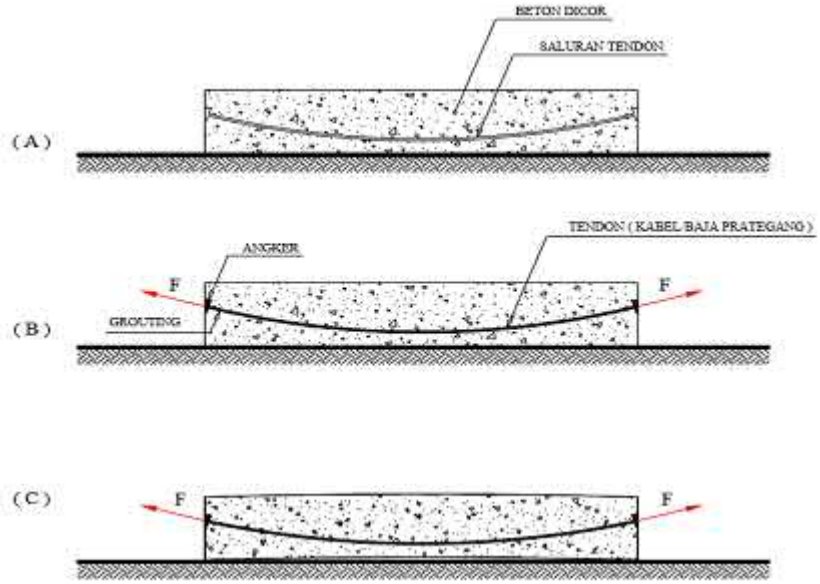
Tahap 1 : Kabel pada tendon diberik gaya tarik terlebih dahulu kenudian diangker pada abutmen tetap (gambar 3.2 (A)).

Tahap 2 : Kemudian dilakukan pengecoran pada cetakan (framework) yang sudah disediakan sedemikian rupa untuk melingkupi tendon yang sudah diberi gaya prategang dan dibiarkan mengering (gambar 3.2 (B)).

Tahap 3 : Setelah mengering sesuai dengan umur beton yang direncanakan, kemudian dilakukan pemotogan kabel pada tendon, sehingga terjadi gaya transfer ke beton. Setelah gaya prategang ditransfer, maka beton akan melengkung ke atas sebelum menerima beban kerja, seperti yang terlihat pada gambar 3.2 (C). Setelah beban mulai bekerja, maka baolik beton tersebut akan kembali menjadi rata.

2.7.4.2 Metode Pascatarik (*Post-Tension Method*)

Beton dicetak terlebih dahulu dengan sebelumnya sudah diletakkan saluran untuk kabel baja dimasukkan ke dalam beton. Saluran ini disebut dengan duct. Berikut adalah penjelasan tentang metode ini :



Gambar 2.8 Metode pasca tarik

Tahap 1 : Penyiapan duct melengkung dan cetakan (framework), kemudian beton dicor (gambar 3.3 (A)).

Tahap 2 : Setelah beton cukup umur dan kuat menahan gaya prategang, kemudian kabel baja dimasukkan ke dalam duct/saluran melengkung yang sudah disediakan. Selanjutnya dilaukan penarikkan dengan menggunakan jack 14 hydraulic. Penarikkan ini dilaukan pada salah satu sisi, sedangkan pada sisi satunya dilakukan pengangkuran mati. Setelah diangkur, kemudian pada ujung saluran dilakukan grouting (gambar 3.3 (B)).

Tahap 3 : Setelah pengangkura, balokbeton akan menjadi tertekan, maka beton mengalami transfer gaya. Karena saluran tendon melengkung, maka balok beton akan melegkung keatas (gambar 3.3 (C)).

2.8. Pola Keretakan

Retak adalah terjadinya pemisahan antara massa beton yang relatif panjang dengan yang sempit. Secara visual retak nampak seperti garis yang tak beraturan. Retak yang terjadi setelah beton mengeras salah satunya adalah retak struktural. Retak ini terjadi karena adanya pembebanan yang mengakibatkan timbulnya tegangan lentur, tegangan geser dan tegangan tarik.

Retak merupakan jenis kerusakan yang paling sering terjadi pada struktur beton, yang secara visual tampak seperti garis. Retak yang terjadi pada saat beton mulai mengeras (beton belum mampu menahan beban layan) antara lain terjadi karena pembekuan udara dingin (pada daerah dengan musim dingin), susut *(shrinkage)*, serta penurunan *(settlement)*. Retak yang terjadi saat beton mengeras salah satunya adalah retak structural. Retak ini terjadi karena adanya pembebanan yang mengakibatkan timbulnya tegangan lentur, tegangan geser, dan tegangan tarik (Aziz, 2014). Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert, 1990):

1. Retak Lentur *(flexural crack)*

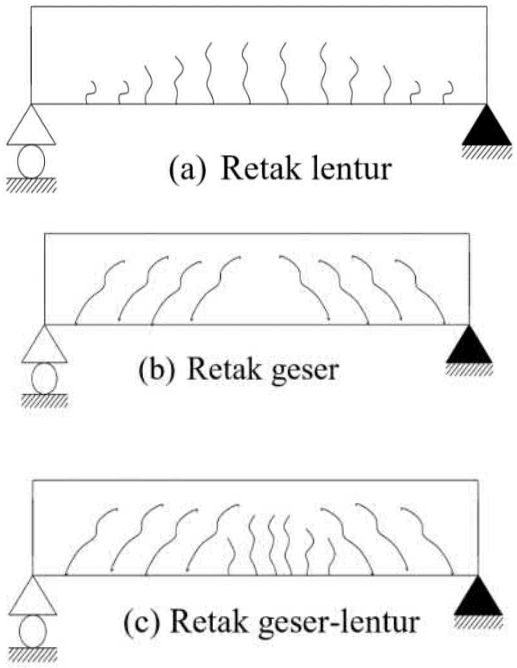
Retak yang terjadi akibat beban lentur yang jauh lebih besar dari beban geser. Terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok.

2. Retak Geser *(shear crack)*

Retak yang terjadi akibat gaya geser, dan bentuk dari retak ini akan membentuk sudut 45º terhadap gaya yang bekerja pada komponen tersebut. Retak ini terjadi pada lokasi yang belum mengalami retak lentur, dan hal ini terjadi karena gaya geser yang ada lebih besar dari momen yang terjadi.

3. Retak geser-lentur *(flexural shear crack)*

Retak yang terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya.



Gambar 2.9 Retak Pada Balok Beton Bertulang

Sumber: Gilbert, 1990

2.9. *Experimen Based Testing of Concrete*

Buckhouse (1997) telah melakukan peneletian terhadap perilaku lentur beton. Tiga balok benda uji dibuat dan dicor dengan besi tulangan geser dan tulangan lentur. Tulangan geser dipasang pada setiap benda uji agar memaksa terjadinya kegagalan lentur.

Tiga benda uji tersebut diberi beban di dua titik sampai terjadi kegagalan pada beton atau sampai beban maksimum yang dapat diterima benda uji.

Gambar 2.10 Pola retak pada Benda Uji beton normal (Buckhouse 1997)

Pola retak yang terjadi pada benda uji lapangan yang dilakukan oleh Buckhouse (1997) yaitu retak lentur *(flexural crack)*, retak yang terjadi akibat beban lentur yang jauh lebih besar dari beban geser. Terjadi di daerah yang

mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok.

Grafik hubungan antara beban dan *displacement* pada benda uji tersebut kemudian di plot untuk keperluan perbandingan pada hasil analisis menggunakan metode elemen hingga. Tugas akhir ini akan memanfaatkan hasil benda uji lapangan sebagai kalibrasi pada aplikasi *Abaqus CAE*.

2.10. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (Finite elemen Methode) merupakan suatu piranti numerik yang digunakan untuk menyelesaikan problem matematis dan permasalahan teknik dari suatu gejala fisik. Abaqus salah satu software yang digunakan dalam metode elemen hingga untuk menganalisa simulasi dari pengujian maupun pemodelan saja. Abaqus banyak dgunakan dalam bidang ilmu teknik sipil karena mampu menganalisis dan mensimulasikan dengan baik kontruksi bangunan. Abaqus sendiri dalam metode elemen hingga memiliki 3 (tiga) modul antara lain :

1. Abaqus standard, adalah salah satu modul elemen hingga untuk keperluan umum, modul ini menyedikan kemampuan untuk menganlisis berbagai masalah termasuk nonstruktural.
2. Abaqus Explicit, adalah yang digunakan dalam metode elemen hingga untuk benda yang lebih dinamis.

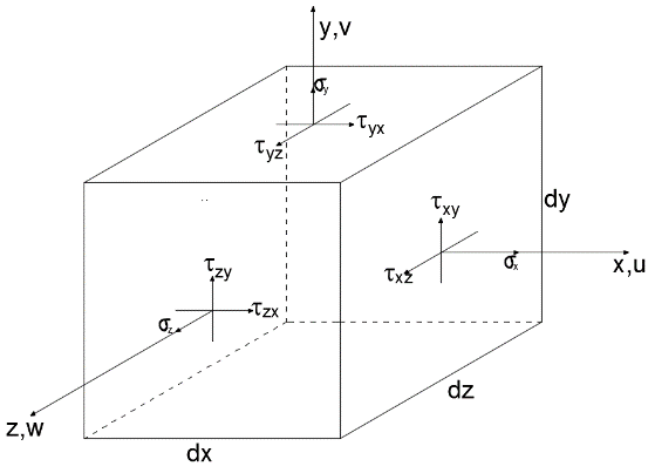
3. Abaqus CAE, yaituvmodul analisis yang lebih komplit, ruang lingkup Abaqus untuk memodelkan, mengelola, memonitor analisa abaqus dan memvisualisasikan hasilnya (Simulia).

Pada penelitian kali ini menggunakan Abaqus CAE versi Abaqus 6.14

2.11. Elemen 3-Dimensi Tetrahedral

Elemen dasar 3-Dimensi yang biasa digunakan dalam analisis adalah elemen tetrahedral yang selanjutnya digunakan untuk menentukan fungsi bentuk, matriks kekakuan, matriks beban yang dinyatakan dalam koordinat global. Salah satu contoh aplikasi dari elemen 3-dimensi adalah pada analisis bendungan, tabung berdinding tebal yang tertekan dan beberapa bagian dari industri otomotif dan alat-alat berat lainnya.

Sebuah elemen sangat kecil dalam sistem koordinat Cartesius berukuran *dx, dy* dan *dz* serta mengalami keadaan tegangan normal dan tegangan geser seperti terlihat pada Gambar 3.5. Jenis elemen seperti ini mempresentasikan kondisi tegangan pada tiga buah bidang yang saling tegak lurus pada kondisi tegangan 3-dimensi. Tegangan normal tegak lurus terhadap bidang permukaannya dan dinyatakan dengan simbol σx, σy dan σz. Tegangan geser bekerja pada permukaan bidang elemen dan dinyatakan dengan simbol τx, τy dan τz.



Gambar 2.11 Tegangan Tiga Dimensi pada Sebuah Elemen (Sofia, 2016)

Dengan adanya metode elemen hingga, pemodelan struktur-struktur dengan bentuk dan pembebanan yang sangat kompleks menjadi mungkin untuk diselesaikan, namun memerlukan waktu yang cukup lama untuk melakukan perhitungan. Untuk mempermudah dalam melakukan proses perhitungan numerik tentunya diperlukan *software* sebagai bantuannya. Salah satu *software* yang dapat digunakan adalah Abaqus.

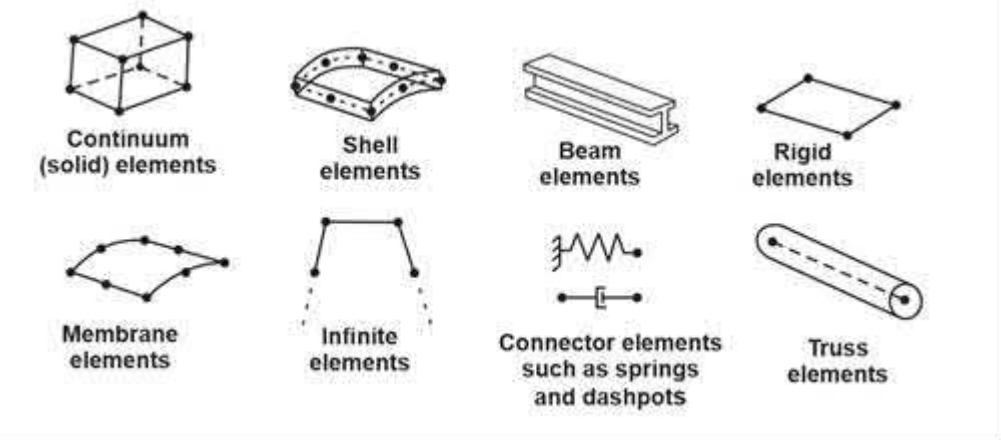
2.12.Software Abaqus

Abaqus adalah perangkat lunak untuk simulasi numerik berdasarkan metode elemen hingga yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi mulai dari pemodelan struktur teknik sipil yang kemudian dapat diverifikasi dengan hasil pengujian laboratorium. Abaqus memiliki dua analisis utama yaitu Abaqus/Standard dan Abaqus/Explicit (digunakan untuk memodelkan peristiwa dinamis menggunakan eksplisit dinamis formulasi elemen hingga). Abaqus/Standar menggunakan metode elemen hingga yang secara implisit memecahkan sistem persamaan pada setiap solusi “kenaikan” untuk analisis

model *solid, shell,* dan *truss*. Program ini dapat digunakan untuk memecahkan kombinasi masalah statis dan dinamis serta *liniear* dan *non-linier*.

Kurniawan (2014) menjelaskan bahwa *Abaqus* merupakan program komputer berbasis elemen hingga untuk menganalisis berbagai macam permasalahan nonlinier termasuk balok beton bertulang dan beton prategang. Kemampuan program ini tidak lagi diragukan karena mampu untuk melakukan meshing dengan akurat dengan berbagai pilihan model elemen agar dapat semakin mendekati dengan kondisi sebenarnya serta mampu melakukan analisis dinamik dan *siklik loading*. *Abaqus* memberikan solusi berbagai persamaan konstitutif untuk menyelesaikan permasalahan nonlinier sehingga memudahkan pengguna untuk memilih solusi yang tepat untuk model yang akan dianalisis.

Beberapa parameter awal yang merupakan sifat material, geometri yang tepat dan pemilihan solusi untuk memecahkan masalah menjadi bagian yang penting. Konsistensi *Abaqus* dalam pengembangan software memberikan kemajuan dalam ketepatan permodelan material, geometri dan model pembebanan sehingga dapat memperoleh hasil yang eksak dan mendekati kondisi nyata. Dalam permodelan, *Abaqus* memberikan banyak pilihan model yang dapat digunakan. Pengguna dapat memilih model sesuai dengan geometri, material, perilaku benda uji yang akan dimodelkan. Gambar 3.13 menunjukkan beberapa bentuk model yang dapat dipilih secara langsung dengan menggunakan program *Abaqus.*

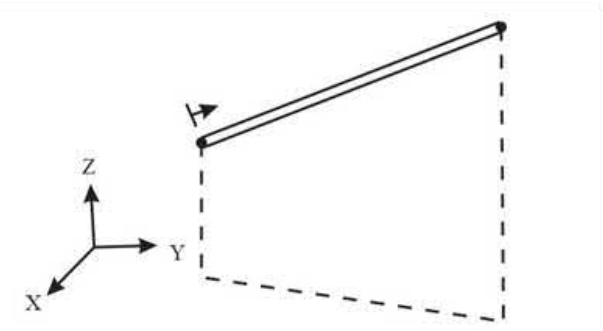


Gambar 2.12 Macam-Macam Model Elemen

Sumber: Hibbitt, 2006

a. Model balok beton

Dalam permodelannya, balok beton dimodelkan sebagai *three-dimensional solid part continum element*. Pertimbangannya adalah penggunaan *three-dimensional* model akan memberikan kemungkinan untuk menggunakan kondisi batas yang kompleks dan diharapkan lebih mendekati kondisi aktual sebenarnya dari benda uji. Tipe elemen ini memiliki delapan titik dengan tiga derajat kebebasan pada tiap titiknya dan translasinya pada arah x, y, z. elemen ini mampu untuk melakukan deformasi, retak pada tiga arah sumbu *orthogonal* dan kemudian hancur. Geometri dan posisi titik dapat dilihat pada Gambar 3.14.



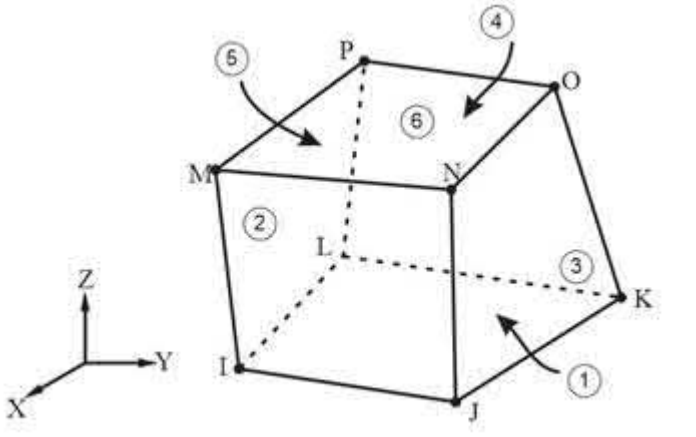
Gambar 2.13 *Three Dimensional Solid Element*

Sumber: Hibbitt, 2006

b. Model baja tulangan

Model truss disediakan Abaqus untuk memodelkan baja tulangan. Diperlukan minimal dua titik untuk dapat menggunakan elemen ini. Tiap titiknya memiliki tiga derajat kebebasan dan translasinya pada arah x, y, z. elemen ini memiliki kemampuan untuk mengalami deformasi plastis. Bentuk geometri dan posisi penempatan titik dapat dilihat pada Gambar 3.15.

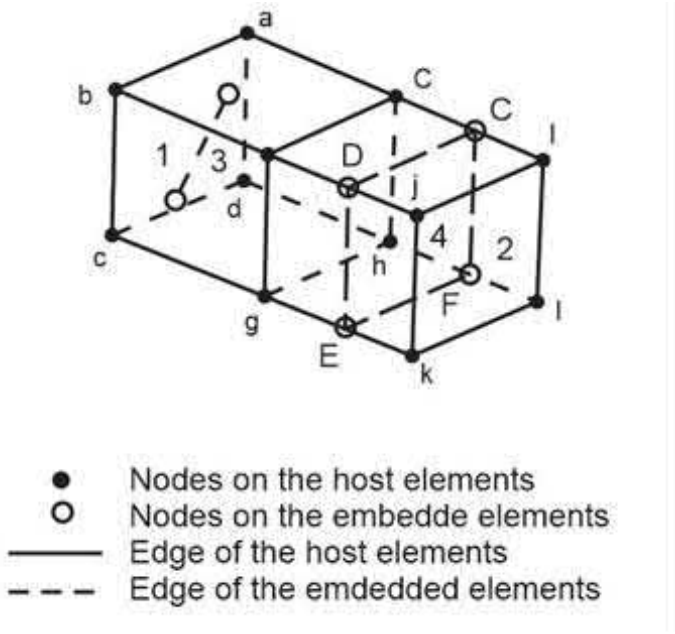
Abaqus memberikan dua pilihan untuk mendeskripsikan tulangan diskrit dalam model tiga dimensi. Tulangan dapat didesain sebagai embedded surface dengan model rebar layer atau embedded dengan menggunakan truss elemen. Namun umumnya pada pilihan pertama biasanya digunakan dalam permodelan plat, untuk benda uji berupa balok kolom beton atau joint digunakan embedded of truss element. Untuk plat sambung digunakan permodelan embedded dalam interaksinya dengan elemen beton. Konsep interaksi elemen di definisikan sebagai embedded maka akan terjadi interaksi yang sama antara elemen embedded dengan host elemennya. Translasional derajat kebebasan dari titik embedded



Gambar 2.14 Truss Elemen

Sumber: Hibbitt, 2006

Terkait dengan hasil interpolasi berdasarkan derajat kebebasan dari host elemennya. Jadi host elemen sebagai constrain pada embedded elemen, sehingga translasi yang terjadi pada titik embedded akan identik dengan host elemennya. Penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 2.15 Konsep Embedded Elemen

Sumber: Hibbitt, 2006

c. Meshing beton

Permodelan elemen hingga pada penelitian ini dibatasi oleh jenis material yang tersedia dalam *Abaqus* yang dinamakan brick elements sehingga dapat diperoleh distribusi gaya yang paling tepat pada analisis 3 dimensi.

d. Meshing baja tulangan

Tulangan merupakan elemen tarik pada beton bertulang, dapat didefinisikan sebagai elemen truss tiga dimensi baik secara linear ataupun quadratic. Pemilihan elemen ini sebagai truss, terkait dengan sifat tulangan yang meneruskan distribusi

gaya sepanjang tulangan. Hal ini sesuai dengan sifat elemen truss pada *Abaqus* yang mendistribusikan gaya sepanjang elemen. Sehingga dapat diperoleh perilaku yang tepat pada baja tulangan.

Analisis Abaqus secara lengkap biasanya terdiri dari tiga tingkat tertentu: preprocessing, simulasi, dan postprocessing seperti berikut ini (Hibbit, 2006)

2.12.1 Prepocessing

Pemodelan part dilakukan dalam Abaqus dengan memasukkan geometri yang telah di import dari input file. Dalam menggambarkan model yang akan dianalisis, ditentukan terlebih dahulu koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum melakukan simulasi data dimasukkan ke dalam modul Abaqus sehingga semua keyword dan parameter yang dimasukkan ke dalam input file bisa diperiksa kebenarannya sebelum dilakukan proses running. Urutan dalam memasukkan data harus diperhatikan dengan benar karena antara satu modul dengan modul lain saling berhubungan.

Secara garis besar urutan memasukkan data ke dalam modul-modul adalah sebagai berikut:

1. Modul part

Modul part adalah bagian dari modul yang akan digunakan untuk menggambar benda uji yang akan disimulasikan didalam Abaqus. Modul part menyediakan tool bar yang berfungsi untuk melakukan modifikasi benda maupun bentuk sesuai dengan model yang akan dibuat.

2. Modul property

Modul property berfungsi untuk memasukkan sifat mekanis bahan, jenis material, kekuatan bahan, dan spesifikasi teknis dari material yang akan dianalisis. Modul property sangat penting sebelum masuk kelangkah berikutnya, karena property dari material harus diberikan sebelum melakukan proses assembly.

3. Modul assembly

Assembly adalah menyusun bagian-bagian komponen (instance part) yang dibuat menjadi satu kesatuan model sehingga memungkinkan untuk dilakukan analisis numerik.

4. Modul step

Step berfungsi untuk menentukan urutan langkah-langkah yang akan didefinisikan sebagai letak pemberian beban atau kecepatan. Modul step menyediakan menu Set dan Surface untuk meletakkan beban yang akan dikerjakan pada benda.

5. Modul interaction

Interaction berfungsi untuk menentukan bagian material yang akan mengalami kontak. Interaction juga berguna untuk memberikan constraint pada benda yang dianalisis untuk mencegah bergesernya benda dari kedudukan awalnya.

6. Modul load

Load digunakan untuk memberikan beban dan boundary pada benda uji. Modul load juga digunakan sebagai sarana untuk memasukkan tipe kondisi batas (boundary conditions) yang akan dibuat.

7. Modul mesh

Mesh berfungsi membagi geometri dari benda yang akan dibuat menjadi node dan elemen. Modul ini bisa digunakan untuk menentukan mesh yang akan diberikan pada benda.

8. Modul job

Job berfungsi untuk melakukan proses running terhadap model yang telah kita buat. Setelah data yang dimasukkan selesai selanjutnya diserahkan pada job module untuk melakukan proses penyelesaian secara numerik. Selama proses numerik di dalam software pada message area yang berada dibawah viewport bisa dimonitor apakah submit job berhasil atau tidak, apabila terjadi error message maka harus kempali kepada modul untuk melakukan modifikasi terhadap bagian-bagian yang masih terdapat kesalahan.

2.12.2 Simulasi

Abaqus digunakan untuk melakukan simulasi dari hasil processing didalam *software*. Pada tingkat ini *Abaqus* memecahkan permasalahan yang diberikan kedalam program dengan melakukan penyelesaian secara numerik.

2.12.3 Post Processing

Hasil dari simulasi yang telah lengkap (*Completed*), beban, *displacement* atau retakan yeng telah selesai dihitung bisa dievaluasi. Evaluasi biasanya dilakukan secara interaktif menggunakan visualisasi modul dari *Abaqus* atau post processor yang lain. Modul visualisasi, membaca *binary file output database*, mempunyai bermacam-macam pilihan untuk ditampilkan meliputi plot kontur warna, animasi, plot perubahan bentuk, dan plot grafik X-Y.

2.12.4 Satuan dalam *Abaqus*

Dalam *software* Abaqus, tidak terdapat pilihan satuan didalamnya, kita harus menentukan sendiri satuan yang kita gunakan. Namun dalam penggunaannya harus konsisten, konsistensi satuan tersebut dapat dilihat dalam Tabel 2.1 Berikut

Tabel 2.1 Konsistensi Satuan dalam Abaqus

Quantitiy	SI	SI (mm)	US unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	Mm	ft	In
force	N	N	lbf	Lbf
Mass	kg	Tonne (10^3 kg)	slug	Lbf s^2in
Time	s	S	s	S
Stress	Pa (N/m^2)	MPa	Lbf/ft^2	Psi
Energy	J	nJ	ft lbf	In lbf
Density	Kg/m^2	$Tonne/m^3$	$Slug/ft^3$	Lbf s^2/in^4

Dalam penelitian ini satuan yang digunakan dalam permodelan numerik adalah satuan US unit (inch)

2.12.5 Model Konstitutif Beton

Abaqus menyediakan dua model untuk perilaku beton *non linear* yaitu, *smeared cracking* dan *concrete damage plasticity*. Perilaku beton dapat digunakan untuk memodelkan mortar, hal ini dikarenakan perilaku mortar yang relatif sama dengan perilaku beton. Pada penelitian ini akan digunakan perilaku material *concrete damage plasticity*.

2.12.6 Parameter *Concrete Damage Plasticity*

Ada lima parameter yang perlu didefinisikan untuk memecahkan fungsi dari aliran plastis Dructer-Prager dan fungsi lelah. Untuk memperoleh hasil yang eksak dari parameter-parameter ini, beberapa percobaan sebaiknya dilakukan. Karena kurangnya informasi maka akan digunakan parameter standar yang disediakan Abaqus atau yang diusulkan pada jurnal. Parameter yang harus dideskripsikan pada sifat plastis beton adalah:

1. Sudut Dilatasi ψ

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

2. Eksentrisitas

   Parameter ini adalah tingkat dimana fungsi *Drucker-Prager* mendekati asimtot. Dengan eksentrisitas cenderung nol maka aliran plastis cendrung pada garis lurus.

3. $\sigma co/\sigma bo$

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

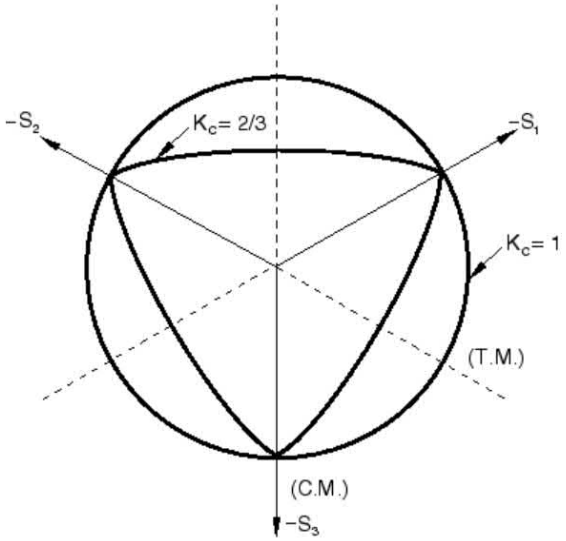
4. Parameter viskositas

   Aturan mengenai viskositas dapat diguakan ketika permasalahn mengalami konvergensi yang disebabkan karena perilaku pelemahan dan penurunan

kekuatan elasti. Parameter ini dapat diasumsikan dengan nilai sama dengan nol.

5. Kc Parameter

   Nilai dari parameter Kc ditentukan dalam mempertimbangkan leleh pada permukaan *deviatoric plane* seperti pada Gambar 2.20 Parameter Kc adalah rasio dari tegangan *invariant* kedua pada garis tarik menuju ke tegangan *invariant* kedua menuju ke garis tekan. Gambar 3.15 menunjukan leleh pada permukaan untuk nilai Kc sama dengan 1 dan 2/3.



Gambar 2.6 Nilai Kc

Sumber: Abaqus manual

Menurut Al-Osta dkk (2017) nilai dari parameter diatas dapat didekati dengan nilai sesuai pada Table 2.2

Tabel 2.2 Parameter Concrate Damage Plasticity

Ψ(*)	c	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	Kc	Viscosity parameter
36	0,1	1,16	0,667	0

6. Kuat Tekan Mortar

Sifat material dari mortar dalam kondisi tekan didapat dengan melakukan pengujian di laboratorium pada material mortar. Pengujian tersebut dilakukan berdasarkan ASTM C-109. Pengujian dilakukan menggunakan mesin UTM (*Universal Testing Machine*) Digital, sehingga didapatkan nilai beban dan *displacement* yang dapat digunakan untuk menghitung tegangan dan regangan. Nilai tegangan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.36 dan nilai regangan dihitung dengan Persaman 3.38.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{3.36}$$

Keterangan : σ_c = tegangan tekan beton (MPa),

P = beban yang bekerja,

A = luas penampang mortar.

Luas penampang mortar dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.37.

$$A=p\times l \tag{3.37}$$

Keterangan : p = panjang penampang kubus (*mm*),

l = lebar penampang kubus (*mm*).

$$\varepsilon c = \frac{\Delta L}{\mathrm{L}} \tag{3.38}$$

Keterangan : ε_c = regangan tekan beton,

ΔL = perubahan panjang (*mm*),

L = tinggi awal benda uji (*mm*).

Selain nilai tegangan dan regangan dibutuhkan juga nilai elastisitas material (E). Nilai elastisitas material diperoleh dengan cara membagi

tegangan elastis material dengan regangan elastisnya seperti Persamaan 3.39. Menurut Nawy, batas tegangan elastis beton berada pada nilai 40% dari tegangan maksimumnya.

$$E = \frac{\sigma_{elastis}}{\varepsilon_{elastis}} \quad (3.39)$$

7. Kuat Tarik Mortar

Sifat material dari mortar dalam kondisi tekan didapat dengan melakukan pengujian di laboratorium pada material mortar. Pengujian tersebut dilakukan berdasarkan ASTM C 307-03. Pengujian dilakukan menggunakan mesin UTM (*Universal Testing Machine*) Digital, sehingga didapatkan nilai tegangan dan regangan. Perhitungan tegangan dan regangan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.40-3.42.

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (3.40)$$

Keterangan : σ_t = tegangan tekan beton (MPa),

P = beban yang bekerja (N),

A = luas penampang benda uji (mm^2).

$$A = l \times t \quad (3.41)$$

Keterangan : l = lebar benda uji (*mm*),

t = tebal benda uji (*mm*).

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.42)$$

Keterangan : ε_t = regangan tarik beton,

ΔL = perubahan panjang (*mm*),

L = panjang awal benda uji (*mm*).

3.5.5 Tegangan Regangan Desak Beton

Hasil pengujian tekan beton di laboratorium dapat memberikan informasi yang akurat mengenai material. Namun jika tidak adanya data laboratorim yang dapat digunakan sebagai acuan, terdapat beberapa formulasi untuk menggambarkan grafik hubungan tegangan dan regangan dengan menggunakan data yang tersedia yaitu kuat tekan rata-rata dan modulus elastisnya. Kurniawan (2010) dalam peneltiannya menggunakan Persamaan 3.43 untuk regangan pada saat beton mengalami tegangan maksimum dan Persamaan 3.44 untuk regangan pada saat beton mencapai tegangan ultimit.

$$\varepsilon_{c1} = 0.0014[2 - ex(-0.024 f_{cm}) - exp(-0.140 f_{cm})] \quad (3.43)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 - 0.0011[1 - exp(-0.0215 f_{cm})] \quad (3.44)$$

Keterangan : ε_{c1} = regangan pada tegangan puncak beton,

ε_{cu} = regangan pada tegangan ultimit beton,

f_{cm} = kuat tekan rata-rata.

Untuk menghitung tegangan beton pada kondisi elastisnya dapat digunakan Persamaan 3.45.

$$\sigma_c = E_c \left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)\right] \quad (3.45)$$

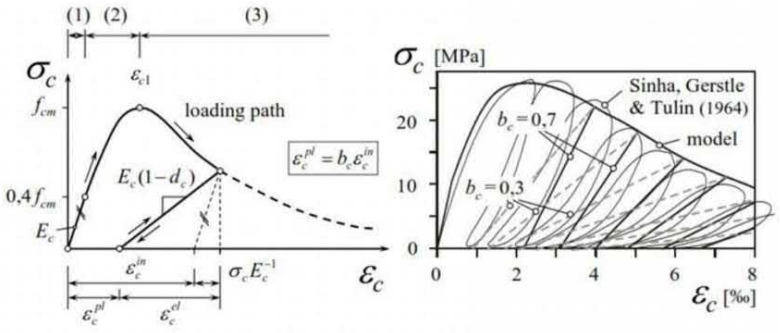
Nilai elastisitas beton dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.46.

$$E_c = 4700\sqrt{f_{cm}} \quad (3.46)$$

3.5.6 Parameter Kerusakan

Concrete damage plasticity yang merupakan model material yang disediakan Abaqus membutuhkan beberapa fungsi material yang menunjukan evolusi atau pembentukan kerusakan yaitu kerusakan saat mengalami tekan (d_c) dan tarik (d_t).

Pembentukan kerusakan akibat tekan (d_c) tergantung dengan regangan plastis yang terjadi, yang mana menunjukkan hubungan yang proporsional dengan regangan inelastiknya dengan factor konstal b_c, dengan $0 < b_c < 1$. Nilai $_c$ = 0,7 sesuai dengan data eksperiman pengujian pada Gambar 2.21, parameter kerusakan tekan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3. 47.



Gambar 2.17 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan

Sumber: Sinha, 1964

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E^{-1}}{\varepsilon_c^{pl}(1/b_c - 1) + \sigma_c E^{-1}} \qquad (3.47)$$

Keterangan : d_c= compression damage parameter,

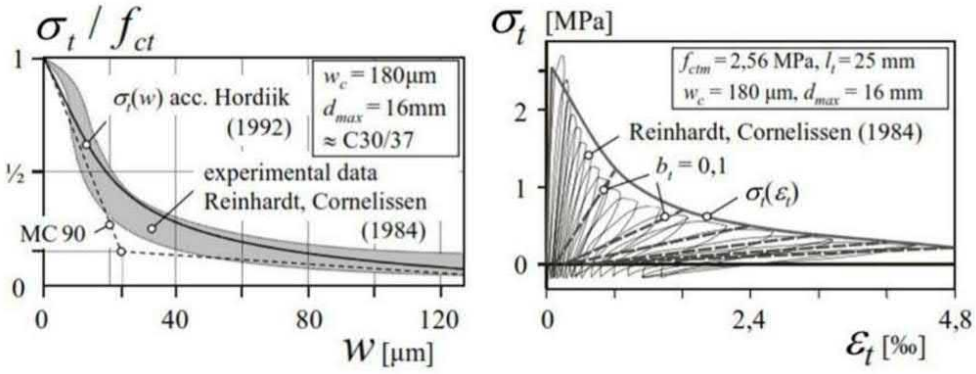
σ_c = tegangan tekan beton (MPa),

E_c = modulus elastisitas beton (MPa),

ε_c^{pl} = regangan tekan plastis beton,

b_c = factor konstan pendekatan monotonic tekan.

Serupa dengan pembentukan kerusakan tekan, kerusakan tarik (d_t) bergantung pada regangan plastik dan inelastik pada saat beton mengalami tarik. Parameter b_t = 0,1 sesuai dengan hasil eksperimen pengujian tarik pada Gambar 2.22.



Gambar 2.18 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik
Sumber: Reinhardt & Cornelissen, 1964

Perhitungan hubungan regangan dengan kerusakan *eu* dapat dihitung dengan Persamaan 3.48.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E^{-1}}{\varepsilon_c^{pl}(1/b_t - 1) + \sigma_c E^{-1}} \qquad (3.48)$$

Keterangan : d_t = *tension damage parameter*,

σ_t = tegangan tarik beton (MPa),

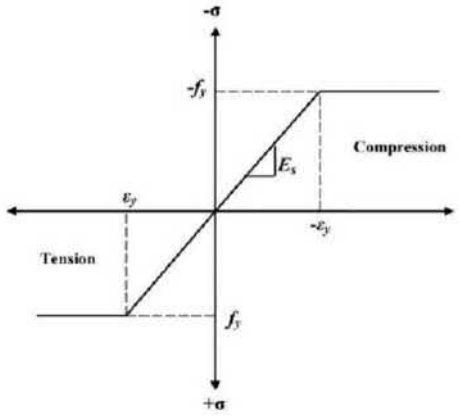
E_t = modulus elastisitas beton (MPa),

ε_c^{pl} = regangan tarik plastis beton,

b_t = factor konstan pendekatan monotonic tarik.

8 Model Konstitutif Baja

Material baja tulangan dimodelkan sebagai *elastic perfecly plastis* seperti pada Gambar 2.23, dimana respon elastik linier dianggap terjadi sebelum leleh maupun pengerasan-regangan (*strain hardening*) tidak terjadi.



Gambar 2.19 Model Tegangan-Regangan Elastic Perfectly Plastic
Sumber: Abaqus Manual

9. Massa Jenis Beton

Abaqus membutuhkan parameter massa jenis atau disebut juga mass density dalam pemodelannya, nilai *mass density* dapat dihitung dengan membagi berat suatu benda pada suatu volume tertentu dengan volumnya tersebut. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Persamaan 3.49.

$$\text{Berat jenis} = \frac{W}{V} \qquad (3.49)$$

Keterangan : W = berat benda,

V = Volume.

10. Poisson Ratio

Pada saat mortar mengalami desak maka akan menekan pada arah aksial dan mengalami pengembangan kearah lateral. Perbandingan antara regangan arah lateral dan arah aksial disebut sebagai poisson ratio. Pada penelitian ini nilai

poisson ratio beton yang digunakan ialah 0.2. Sedangkan untuk poisson ratio baja tulangan ialah 0.3.

BAB V

PENUTUP

Dengan menggunakan metode elemen hingga untuk menganalisa balok beton bertulang dan balok beton prategang telah berhasil dievaluasi. Pada balok beton bertulang dari metode elemen hingga dengan menggunakan *software Abaqus 6.14* mendekati hasil experimental yang dilakukan oleh Bukhouse (1997). Dari hasil yang mendekati uji lab tersebut kemudian dimodelkan balok beton prategang menggunakan *Software Abaqus 6.14*. Melihat hasil yang diperoleh dari pemodelan balok prategang disimpulkan bahwa *Software Abaqus 6.14* memodelkan dengan baik sesuai dengan karakterikstik material yang telah ditentukan dan pengaturan yang telah disesuiakan.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pembahasan dan analisis data dari permodelan model balok normal uji laboratorium (BU), balok normal abaqus (BN) balok beton prategang Abaqus (BP1) dan balok beton prategang ANSYS (BP2) maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut ;

1. Balok normal abaqus (BN) mengalami retak pertama pada saat beban sebesar 4981lbs dengan *displacement* sebesar 0,057 inch, sedangkan balok prategang yang dimodelkan *software abaqus 6.14* retak pertama pada beban 5543,18 lbs dengan *displacement* sebesar 0,14 inch.
2. Beban ultimate pada balok normal (BN) terjadi saat balok dibebani sebesar 4981 lbs dan mengalami *displacement* sebesar 3,45 inch, sedangkan pada saat keadaan *ultimate* terjadi saat balok dibebabin sebesar 16024 lbs dan mengalami *displacement* sebesar 3,45 inch.
3. Beban ultimate pada balok prategang (BP1) terjadi saat balok dibebani sebesar 28.147 lbs. Dengan demikian penambahan baja prategang dapat menambah hampir dua kali beban ultimate pada balok dengan menggunakan material properties yang sama.

4. Pola keretakan yang terjadi pada kedua model sama yaitu jenis retak lentur (*flexular crack*) karena perambatan retak bergerak secara intensif dari sisi tarik menuju ke sisi tekan balok

5.1. Saran

Adapun saran-saran yang dapat diberikan sebagai pertimbangan dalam penelitian ini maupun dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam melakukan penelitian lain adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian menggunakan *software* lain untuk mengetahui keakuratan *software Abaqus 6.14.*
2. Tinjauan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai wawasan untuk pengaplikasian software di masa depan dari konsep metode elemen hingga sebagai analisis, adapun model yang akan digunakan sebaiknya dikalibrasi dengan data eksperimen dengan baik sehingga akan memberikan parameter permodelan yang tepat untuk digunakan nantinya.

DAFTAR PUSTAKA

ABAQUS user's manual, volumes I, II, and III, version 6.1 : Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2006.

ACI Committee. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11)*. USA:Farmingto Hills.

Triatmodjo, B. 1996. *Metode Numerik,* Edisi Revisi. Yogyakart : Beta Offset.

Vilnay, M., Chernin, L., Cotsovos D. (2009). Advanced Material Modelling Of Concrete In Abaqus. *Abaqus Modelling of Concrete.* 1-12.

Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T., & Fawzia, S. (2011). A Material Model For Flexural Crack Simulation In Reinforced Concrete Elements Using Abaqus. *eddBE2011 Proceedings*. 260-264

Wai-fah, Chen and Charles Scawthorn. 2002*."Earthquake Engineering Handbook.*" CRC Press.

Wang, Taijun., Hsu, Thomas T.C. (2001). Nonlinear Finite Element Analysis Of Concrete Structures Using New Constitutive Models. *Computers And Structures.* 2781-2791.

Wang, Chu-Kia. Salmon, Charles G. Hariandja, Binsar. (1993). *Disain Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.

Weningtyas, Eka Riyadini., Soebandono, Bagus., Prayuda, Hakas. (2013). Studi Numerik Sambungan Balok Kolom Beton Bertulang Pracetak Eksterior Dengan Variasi Penampang Balok Menggunakan Beban Statik. *Skripsi.*

Wolanski. (2004).. Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis. *Thesis.*

Wu, X.H., Zhang, B. (2012). The Transformation of Nonlinear Structure Analysis Model From NosaCAD to ABAQUS and PERFORM-3D. *15 WCEE LISBOA.* 1-10

Yang, Zhou. (2017). Nonlinear Analysis Of Reinforced Concrete Slab On Partially Softening Ground. *Thesis.*

Zhang, Ji., Zhang, Zhongxian., Chen, Chuanyao. (2010). Yield Criterion In Plastic-Damage Models For Concrete. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 220-221.

Dearth, David R., P.E. (2015). Analysis of Reinforced Concrete (RC) McNeice Slab Using Nonlinear Finite Element Techniques MSC/Marc. *Applied Analysis & Technology, Inc*. 1-11.

Demin, Wei., Fukang, He. (2017). Investigation For Plastic Damage Constitutive Models Of The Concrete Material. *Procedia Engineering*. 71-78.

Demir, Aydin., Ozturk, Hakan., Bogdanovic, Aleksandra., Stojmanovska, Marta., Edip, Kemal. (2017). Sensitivity Of Dilation Angle In Numerical Simulation Of Reinforced Concrete Deep Beams. *Scientific Journal of Civil Engineering*. 33-37.

Emtiaz, Mostafiz., Al Azad, A.S.M. Alauddin., Shahin, H. M., Al Shafian, Sultan. (2017). Numerical Analysis of a Reinforced Concrete Slab-Column Connection Subjected to Lateral & Vertical Loading. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 1-5.

European Commitiee For Standardization Comite Europeen De Normalisation Europaisches Komitee Fur Normung. (1992). *Eurocode 2: Design Of Concrete Structures - Part 1-1 : General Rules And Rules For Buildings*.

Genikomsou, Aikaterini S., Polak, Maria A. Damaged Plasticity Modelling Of Concrete In Finite Element Analysis Of Reinforced Concrete Slabs. (2012). *International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. 1-8.

Gilbert, R. I. dan Mickleborough, N. C. 1990. *Design of Prestressed Concrete*. Sydney. Unwin Hyman Ltd.

Hafezolghorani, Milad., Hejazi, Farzad., Vaghei, Ramin., Jaafar, Mohd Saleh Bin., Karimzade, Keyhan. (2017). Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. *Structural Engineering International*. 68-78.

Jankowiak, T. and Lodygowski, T. (2005), Identification Of Parameter Of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model, Foundation Of Civil And Experimental And Numerical Study. *House of Poznan University of Technology*. 53-69.

Kachlakev, D.I.; Miller, T.; Yim, S.; Chansawat, K.; Potisuk, T. (2001). Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates.. *Oregon Department of Transportation Research Group.*

Kmiecik, P. & Kaminski, M. (2011). Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation taken into Consideration. *Civil and Mechanical Engineering*, 623-636.

Lin, T.Y & Burns, Ned H. (1991). *Desain Struktur Prategang Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E. (1989). A Plastic-Damage Model For Concrete. *International Journal of Solids Structures*, 229-326.

Luo, Dong. (2019). Dynamic Constitutive Model Analysis of High Parameter Steel Fiber Reinforced Concrete. *Symmetry.* 1-14.

Maggia Y. I., Gonçalves R.M., Leon R.T., Ribeiro L.F.L. (2005). Parametric Analysis Of Steel Bolted End Plate Connections Using Finite Element Modeling. *Journal of Constructional Steel Research.* 689-708.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988). Observed Stress-Strain Behavior Of Confined Concrete. *J. Struct. Eng.* 1827-1849.

Michał, Szczecina., Andrzej, Winnicki. (2015). Calibration of the CDP Model Parameters in Abaqus. *Advances in Structural Engineering and Mechanics*. 1-11.

Nawy, Edward G. 2001. Beton Prategang Jilid I dan 2. Jakarta: Erlangga.

Nawy, Edward G., Tavio, dan Kusuma, Benny. 2010. Beton Bertulang Jilid I dan 2. Surabaya: *ITSPress*.

Obaidat, Yasmeen Taleb. (2011). Structural Retrofitting Of Concrete Beams Using Frp - Debonding Issues. *Thesis.*

Prayuda, Hakas, dkk. (2018). Analisis Tegangan Regangan dan Defleksi pada Sambungan Balok-Kolom Beton Bertulang Menggunakan Beban Statik. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 122-130.

Rao, Ch. Koteswara., Raju, P. Polu., Babu, T. Naga Seshu. (2017). Comparative Study On Analysis Of Plain And Rc Beam Using *Abaqus. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 1531-1538.

Sihua, Deng., Ze, Qie., Li, Wang. (2015). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beam Bending Failure Experimentation Based on ABAQUS. *International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy*. 440-444

Sinaei, H., Shariati, M., Abna, A.H., Aghaei, M. and Shariati, A., (2012). Evaluation of reinforced concrete beam behavior using finite element analysis by ABAQUS. *Academic Journals.* 2002-2009.