

**TUGAS AKHIR**

**ANALISIS NUMERIK SAMBUNGAN PASAK BALOK KOLOM  
BETON PRACETAK**

***FINITE ELEMENT ANALYSIS ON CONNECTION OF  
PRECAST CONCRETE BEAM***

**MUHAMMAD ATHAR AL AYUBI A.R  
D111 17 1807**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
2021**

# LEMBAR PENGESAHAN

## LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

### ANALISIS NUMERIK SAMBUNGAN PASAK BALOK KOLOM BETON PRACETAK

Disusun dan diajukan oleh:

**MUHAMMAD ATHAR AL AYYUBI A.R**

**D011 17 1807**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 1 November 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing Utama,

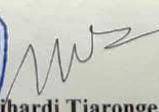
Pembimbing Pendamping,

  
Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M. Eng  
NIP. 196207291987031001

  
Dr. Eng. Arwin Amiruddin, ST, MT.  
NIP. 197912262005011001

Ketua Program Studi,



  
Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng  
Nip: 196805292002121002

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muhammad Athar Al Ayubi A.R  
NIM : D011 17 1807  
Program Studi : Teknik Sipil  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **ANALISIS NUMERIK SAMBUNGAN PASAK BALOK KOLOM BETON PRACETAK**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi/tesis/disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 01 November 2021

Yang Menyatakan

Tanda tangan

A 1000 Rupiah postage stamp with a Garuda emblem and a handwritten signature over it. The stamp features the text 'SEPULUH RIBU RUPIAH', '1000', 'METERAI TEMPEL', and the serial number '063FAJX352400874'.

Muhammad Athar Al Ayubi A.R

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT, atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir sebagai salah satu syarat yang dapat diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Numerik Sambungan Pasak Balok Kolom Beton Pracetak**” ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan kepada pembaca dan juga kepada penulis dalam memahami analisa numerik pada sambungan balok kolom secara umum dan khususnya tentang analisa numerik pada sambungan pracetak.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari dosen pembimbing. Maka dalam kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak **Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. Bapak **Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, dan Bapak **Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak **Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng.**, selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak **Dr. Eng. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, motivasi, dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen yang telah membantu penulis selama mengikuti pendidikan di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Seluruh staf dan karyawan di Departemen Teknik Sipil, di Fakultas Teknik, di Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh asisten dan staf Laboratorium Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu Ibunda **Hasbiah.** dan Ayahanda **Rokhman** serta adik saya **Nurul Ainun Nisa.**, atas doa, kasih sayang,

motivasi dan segala dukungannya selama ini, baik moral maupun material yang telah diberikan.

2. Bapak **Herman Alfis Tumengkol S.ST.,M.T** sebagai ketua Tim, kak **Yanny Febri Fitriani Sofyan, S.T.**, **Irfan Jaya** dan **Aryni Ponto**, sebagai partner tim yang telah berjuang bersama selama proses penelitian berlangsung.
3. **Jijim, Masnia, Lulu, Fifi, Rijal**, dan **William** yang telah banyak membantu selama proses penelitian dilaksanakan.
4. Kawan-kawan Kelas Internasional **Abraham, Anjaliekhan, Agil, Rafli, Syafira, Fachri, Dirga, Safa, Felayutan, dan jinan** yang senantiasa membantu dalam segala hal.
5. Terima kasih kepada teman-teman KKD Struktur yang tak bisa disebutkan satu-satu atas motivasi dan perhatiannya selama ini.
6. Teman-teman **PLASTIS 2018**, mahasiswa Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2017** yang telah memberikan warna tersendiri.
7. Terima kasih kepada teman-teman **Identity Generation 2016** yang menjadi tempat ternyaman untuk kembali.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

## ABSTRAK

Masalah sambungan merupakan persoalan utama pada perencanaan beton pracetak. Keruntuhan bangunan akibat gempa ditentukan oleh kualitas sambungannya, maka harus dipenuhi syarat sambungan balok-kolom. Untuk mengetahui perilaku sambungan balok-kolom, dapat dengan uji numerik program menggunakan Program berbasis metode elemen hingga (*finite element method*). Analisis elemen hingga *nonlinear* pada sambungan balok-kolom menggunakan perangkat lunak abaqus untuk mengetahui kapasitas geser sambungan, deformasi, dan pola retak.

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisa hasil perbandingan perilaku struktur sambungan pasak balok kolom beton pracetak dan sambungan balok kolom beton normal. Serta, menganalisa sambungan balok kolom beton pracetak dengan metode numerik.

Elemen yang digunakan dalam model elemen hingga untuk beton adalah tegangan 3D dan untuk tulangan baja dan tulangan pasak dimodelkan sebagai elemen rangka. Mesh size yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25 mm. Sedangkan, load yang digunakan adalah beban siklik.

Hasil analisa numerik sambungan balok-kolom beton pracetak menghasilkan nilai kapasitas gaya yang lebih besar jika dibandingkan dengan sambungan balok-kolom beton normal, mengalami peningkatan sebesar 18% untuk beban dorong monoton dan 7% untuk beban tarik monoton. Akibat beban tekan, beton mengalami kegagalan pada sambungan balok kolom pracetak pada daerah balok dan sebagian kecil dari dasar kolom. Sedangkan pada sambungan balok kolom normal terjadi pada balok, daerah kolom dekat antarmuka balok, dan sebagian besar bagian bawah kolom. Untuk beban tarik kerusakan pada beton cenderung sama.

Kata kunci : Sambungan, Beton, Pracetak, Numerik.

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	i
DAFTAR TABEL.....	iv
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	4
C. Maksud dan tujuan penelitian .....	5
D. Batasan Masalah .....	5
E. Sistematika Penulis .....	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....	8
A. Balok .....	8
B. Kolom.....	11
C. Beton Pracetak.....	13
D. Sambungan Balok Kolom .....	16
E. Beban Siklik .....	20
F. Metode Elemen Hingga.....	21
G. Hasil Penelitian Sebelumnya .....	27
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	30
A. Diagram Alir Penelitian .....	30
B. Desain Benda Uji .....	31
C. Analisa dengan Metode Elemen Hingga.....	33
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	49
A. Hasil Uji Numerik Sambungan Balok Kolom Beton Pracetak.....	49
B. Hasil Uji Numerik Pola Kegagalan Beton.....	53
C. Hasil Uji Numerik Sendi Plastis .....	56

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....	60
A. Kesimpulan .....	60
B. Saran .....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	62

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Jenis-Jenis Kolom .....	13
Gambar 2. Gaya dan Penulangan Geser pada Joint Balok-Kolom.....	17
Gambar 3. Jenis Exterior Joint.....	18
Gambar 4. Jenis Interior Joint .....	18
Gambar 5. Letak Sendi Plastis.....	19
Gambar 6. Histeris Loop .....	21
Gambar 7. C3D8R element linear brick untuk beton .....	22
Gambar 8. T3D2 truss element untuk tulangan.....	22
Gambar 9. Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan .....	25
Gambar 10. Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik.....	26
Gambar 11. Model Tegangan- Regangan Elastic Perfectly Plastic .....	27
Gambar 12. Diagram alir penelitian .....	30
Gambar 13. Sambungan balok kolom beton normal .....	31
Gambar 14. Sambungan balok kolom beton pracetak. ....	32
Gambar 15. Proses <i>Create Part</i> .....	34
Gambar 16. Proses <i>Sketch Part</i> .....	35
Gambar 17. Proses <i>create material</i> .....	36
Gambar 18. Penginputan material <i>concrete plasticity parameters</i> .....	38
Gambar 19. Proses <i>assign section</i> .....	39
Gambar 20. Proses <i>assembly</i> .....	39
Gambar 21. Proses <i>step</i> .....	40

Gambar 22. Metode iterasi .....	41
Gambar 23. Peningkatan bebannya per iterasi .....	41
Gambar 24. Proses interaction .....	42
Gambar 25. Proses Load.....	43
Gambar 26. Posisi Beban dan Boundary Condition SBK BN .....	43
Gambar 27. Posisi Beban dan Boundary Condition SBK BP .....	43
Gambar 28. Tipe elemen mesh SBK pada beton .....	45
Gambar 29. Tipe elemen mesh SBK pada baja tulangan .....	45
Gambar 31. Proses <i>Mesh</i> .....	47
Gambar 32. Proses <i>Running</i> .....	48
Gambar 33. Grafik hubungan antara beban dan displacement Sambungan Balok Kolom Beton Normal .....	50
Gambar 34. Grafik hubungan antara beban dan displacement Sambungan Balok Kolom Beton Pracetak .....	51
Gambar 35. Grafik perbandingan hubungan beban dan displacement pada SBK beton normal dan SBK beton pracetak .....	51
Gambar 36. Grafik perbandingan beban ultimit pada uji experimental dan numerik pada beban ultimit SBK Normal. ....	52
Gambar 37. Grafik perbandingan beban ultimit uji experimental dan numerik pada beban ultimit SBK Pracetak.....	53
Gambar 38. Perbandingan experimental dan numerik pada tegangan beton akibat beban dorong pada SBK Normal .....	54
Gambar 36. Perbandingan experimental dan numerik pada tegangan beton akibat beban dorong pada SBK pracetak.....	54

Gambar 39. Perbandingan experimental dan numerik pada tegangan beton akibat beban tarik pada SBK Normal .....	55
Gambar 40. Perbandingan experimental dan numerik pada tegangan beton akibat beban tarik pada SBK pracetak .....	56
Gambar 41. Tegangan leleh baja SBK normal akibat beban dorong.....	57
Gambar 42. Tegangan leleh baja SBK pracetak akibat beban dorong .....	57
Gambar 43. Tegangan leleh baja SBK normal akibat beban tarik .....	57
Gambar 44. Tegangan leleh baja SBK pracetak akibat beban tarik .....	58

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. <i>Material properties</i> .....	37
Tabel 2. <i>Concrete plasticity parameters</i> .....	37
Tabel 3. <i>Type element, shape, and meshing</i> .....	44
Table 4. Beban dan <i>displacement</i> untuk dua tipe sambungan .....	50
Tabel 5. Panjang sendi plastis balok.....	58

## **BAB 1. PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Penerapan struktur beton di lapangan yang efisien membutuhkan banyak pendekatan dan pemahaman tentang respon dan perilaku terhadap berbagai muatan. Ada banyak pendekatan untuk mempelajari perilaku struktur beton, diantaranya eksperimental, analisa numerik, teoritis, dll. Pengetahuan tentang perilaku beton sangatlah penting untuk menghindari terjadinya kesalahan struktural pada beton maupun dalam perbaikan atau perkuatan struktur yang mengalami kerusakan dan kesalahan desain kajian perilaku struktur beton bertulang pada umumnya yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium.

Pada perencanaan bangunan tahan gempa komponen balok-kolom memiliki bagian yang sangat penting dalam mentransfer gaya-gaya antar elemen pracetak yang disambung. Bila tidak direncanakan dengan baik (baik dari segi penempatan sambungan maupun kekakuan dan kekuatannya), maka sambungan pracetak (grouting, sistem pelat dll) dapat mengubah aliran gaya pada struktur pracetak, sehingga dapat mengubah hirarki keruntuhan yang ingin dicapai dan pada akhirnya dapat menyebabkan keruntuhan prematur pada struktur.

Masalah sambungan merupakan persoalan yang utama yang dihadapi pada perencanaan beton pracetak. Sambungan adalah elemen yang sangat penting dalam desain konstruksi bangunan tahan gempa. Keruntuhan bangunan akibat gempa ditentukan oleh kualitas

sambungannya. Agar bangunan memiliki performa yang baik saat menerima beban gempa, maka harus dipenuhi syarat sambungan balok-kolom

Untuk mengetahui perilaku sambungan dari tipe tersebut perlu dipelajari lebih lanjut. Cara untuk mempelajarinya dapat dengan uji eksperimental ataupun dengan uji numerik dengan program. Uji eksperimental merupakan pengujian yang dilakukan dengan model fisik yang dibuat di laboratorium sedangkan analisis uji numerik merupakan suatu teknik penyelesaian yang diformulasikan secara matematis. Perkembangan teknologi mendorong kemajuan program. maka dari itu uji numerik dengan program semakin dibutuhkan untuk melakukan kalkulasi yang tidak dapat diselesaikan dengan tangan. Untuk menganalisis suatu perilaku struktur dapat dilakukan menggunakan program berbasis elemen hingga "*finite element method*".

Perkembangan terbaru dalam teknologi komputer telah memungkinkan penggunaan metode elemen hingga untuk pemodelan 3D dan analisis struktur beton bertulang. Analisis elemen hingga nonlinear pada sambungan balok-kolom luar beton bertulang yang mengalami pembebanan lateral dilakukan untuk mengetahui modulus keruntuhan geser sambungan dalam hal kapasitas geser sambungan, deformasi, dan pola retak dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Model 3D solid shape menggunakan 3D stress hexahedral element type (C3D8R)

diimplementasikan untuk mensimulasikan perilaku beton. Model bentuk kawat dengan elemen bentuk rangka (T3D2) digunakan untuk mensimulasikan perilaku tulangan. (Diro dkk, 2020).

Behnam (2018) menggunakan konteks teoritis model plastisitas rusak beton (CDP) untuk analisis elemen hingga (FEA) sambungan balok-kolom lebar beton bertulang. Sensitivitas hasil untuk berbagai parameter model, termasuk parameter viskositas, ukuran mesh, sudut dilatasi, variabel permukaan hasil, parameter kerusakan, energi patah, dan jenis analisis telah dibahas. Kajian ini membahas tentang analisis elemen hingga pada sambungan balok kolom normal maupun pracetak untuk mendapatkan hubungan antara gaya dan deformasi, tegangan pada beton, dan sendi plastis yang terjadi pada baja. Ahmed et.al (2012) mengembangkan studi teoretis tentang pengaruh beban aksial kerja dan kadar beton terhadap perilaku statis RC. Sambungan balok-kolom menggunakan analisis elemen hingga nonlinear Perangkat lunak ABAQUS untuk menganalisis struktur beton bertulang pada kondisi tegangan bidang .

Berdasarkan penelitian sebelumnya Husni Mubarak (2019) Menjelaskan bahwa Abaqus merupakan program komputer berbasis elemen hingga untuk menganalisis berbagai macam permasalahan nonlinear termasuk balok beton bertulang dan beton prategang kemampuan program ini tidak lagi diragukan karena mampu 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 nonlinear sehingga memudahkan pengguna untuk memilih solusi yang tepat untuk model yang akan dianalisis.

Berdasarkan latar belakang tersebut maka disusunlah tugas akhir dengan judul: **“Analisa Numerik Sambungan Pasak Balok Kolom Beton Pracetak”**

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang, penulis mencoba merumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil analisis perbandingan struktur sambungan pasak balok kolom beton pracetak dan sambungan balok kolom beton normal akibat beban siklik?
2. Bagaimana analisis pola kegagalan sambungan balok kolom beton normal dan sambungan balok kolom beton pracetak menggunakan metode numerik?

### **C. Maksud dan tujuan penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang dikemukakan diatas maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis hasil uji numerik struktur sambungan pasak balok kolom beton pracetak dan sambungan balok kolom beton normal akibat beban siklik.
2. Menganalisis pola kegagalan sambungan balok kolom beton pracetak dan sambungan balok kolom beton normal dengan menggunakan metode numerik.

### **D. Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah sebagai berikut :

1. Beton yang direncanakan adalah beton pracetak dan beton normal dengan mutu beton  $f'c$  25 MPa dan rencana campuran beton berdasarkan SK.SNI.03-2847-2019.
2. Bahan tambahan menggunakan sika grouting pada sambungan balok kolom beton pracetak
3. Beban yang diberikan adalah beban siklik
4. Metode analisis yang digunakan adalah metode elemen hingga menggunakan software

5. Dalam analisa software digunakan tulangan D16 untuk Kolom dan D13 untuk struktur Balok dengan tulangan Sengkang  $\emptyset 8$

## **E. Sistematika Penulis**

Penulisan tugas akhir ini akan diuraikan dalam sistematika penulisan yang dibagi menjadi lima bab pokok bahasan sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Menjelaskan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan secara singkat.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Menyajikan kerangka teori konseptual mengenai penelitian secara singkat dan gambaran umum dari sampel penelitian yang akan diuji.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Bab ini akan berisi tentang metode penelitian yang dilakukan penulis dalam melakukan penelitian dari mulai awal persiapan hingga mencapai hasil.

### **BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dijelaskan hasil yang diperoleh dari penelitian serta pembahasan dari hasil yang didapatkan

## **BAB V PENUTUP**

Bab ini akan dipaparkan beberapa kesimpulan yang didapat dari hasil dan pembahasan juga akan diberi beberapa saran dari penulis kepada pembaca

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### A. 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 mempunyai fungsi sebagai pengikat kolom-kolom yang 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 03-2847-2019 Pasal 9.3 adalah sebagai berikut :

a. Gaya Tekan Terfaktor

Gaya aksial tekan terfaktor 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 disyaratkan agar lendutan tidak diperiksa.
2. Bila  $h$  aktual  $<$   $h$  min balok, lendutan perlu diperiksa sesuai dengan

Tabel 9.5 (a) SNI 03-2847-2019 Pasal 21.5.1.3.

$bw > 0,3 h$  , atau  $bw > 250$  mm

**A.1. Persyaratan Balok Menurut PBI 2019 .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 dapat 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 di daerah 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 di bagian balok 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.

## **A.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 tritisan dari dua bentang dengan konstruksi sambungan pin pada momen nol.

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.

## **B. Kolom**

### **B.1. Definisi Kolom**

Kolom merupakan suatu struktur tekan yang memegang peranan penting dari suatu bangunan, sehingga keruntuhan pada suatu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan runtuhnya (collapse) lantai yang bersangkutan dan juga runtuh total (total collapse) seluruh struktur. (Sudarmoko, 1996)

SK SNI T-15-2019-03 mendefinisikan kolom adalah komponen struktur bangunan yang tugas utamanya menyangga beban aksial tekan vertikal dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral terkecil.

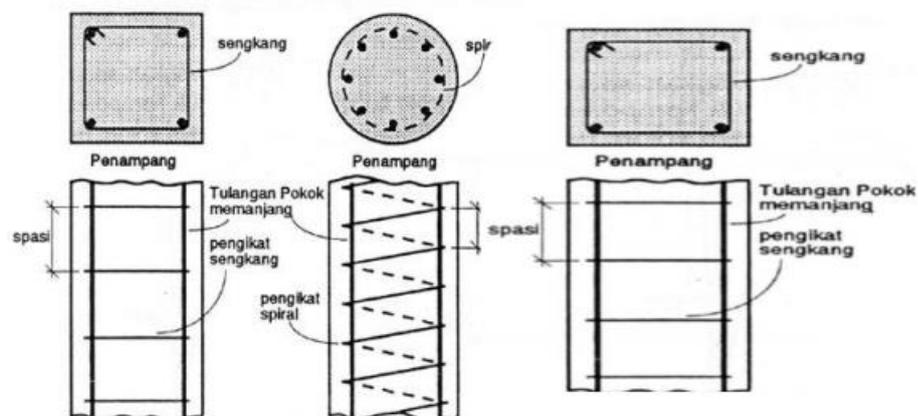
Kolom merupakan bagian vertikal dari suatu struktur rangka yang menerima beban tekan dan lentur. Kolom meneruskan beban-beban dari elevasi atas ke elevasi yang lebih bawah hingga akhirnya sampai ke tanah melalui pondasi. (Nawy, 1998)

Kolom harus dirancang untuk menahan gaya aksial dari beban terfaktor pada semua lantai atau atap dan momen maksimum dari beban terfaktor pada satu bentang lantai atau atap bersebelahan yang ditinjau. Kondisi pembebanan yang memberikan rasio momen maksimum terhadap beban aksial harus juga ditinjau.

## B.2. Jenis Kolom

Dalam buku struktur beton bertulang ( Diposhusodo, 1994), ada tiga jenis kolom beton bertulang yaitu :

- a. Kolom menggunakan pengikat sengkang lateral. Kolom ini merupakan kolom beton yang ditulangi dengan batang tulangan pokok memanjang, yang pada jarak spasi tertentu diikat dengan pengikat sengkang ke arah lateral. Tulangan ini berfungsi untuk memegang tulangan pokok memanjang agar tetap kokoh pada tempatnya.
- b. Kolom menggunakan pengikat spiral. Bentuknya sama dengan yang pertama hanya saja sebagai pengikat tulangan pokok memanjang adalah tulangan spiral yang dililitkan keliling membentuk heliks menerus di sepanjang kolom. Fungsi dari tulangan spiral adalah memberi kemampuan kolom untuk menyerap deformasi cukup besar sebelum runtuh, sehingga mampu mencegah terjadinya kehancuran seluruh struktur sebelum proses redistribusi momen dan tegangan terwujud
- c. Struktur kolom komposit, merupakan komponen struktur tekan yang diperkuat pada arah memanjang dengan gelagar baja profil atau pipa, dengan atau tanpa diberi batang tulangan pokok memanjang



Gambar 1. Jenis-Jenis Kolom

### C. Beton Pracetak

Beton pracetak adalah teknologi konstruksi struktur beton dengan komponen-komponen penyusun yang dicetak terlebih dahulu pada suatu tempat khusus (*off site fabrication*), terkadang komponen-komponen tersebut disusun dan disatukan terlebih dahulu (*pre-assembly*), dan selanjutnya dipasang di lokasi (*installation*), dengan demikian system pracetak ini akan berbeda dengan konstruksi monolit terutama pada aspek perencanaan yang bergantung atau ditentukan oleh metode pelaksanaan dari fabrikasi, penyatuan dan pemasangannya, serta ditentukan pula teknik perilaku sistem pracetak dalam hal cara penyambungan antara komponen join (M. Abduh,2007).

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).

Sistem struktur beton pracetak merupakan salah satu alternatif teknologi dalam perkembangan konstruksi di Indonesia yang mendukung efisiensi waktu, efisiensi energi, dan mendukung pelestarian lingkungan (Siti AisyahNurjannah, 2011).

Struktur beton bertulang yang dicor di tempat cenderung bersifat monolit dan menerus. Sebaliknya, struktur pracetak terdiri dari sejumlah komponen yang dibuat di pabrik, kemudian disambung di lokasi bangunan sampai akhirnya membentuk struktur utuh. Pada struktur pracetak, hubungan yang menghasilkan kontinuitas dengan memakai bantuan perangkat keras khusus, batang tulangan dan beton untuk menyalurkan semua tegangan tarik, tekan, dan geser disebut sambungan keras (Winter dan Wilson, 1993, h.519)

Menurut NEHRP (dalam Hawkins, 2000), sistem sambungan pracetak dibagi menjadi dua kategori yaitu sambungan kuat dan sambungan :

1. Sambungan Kuat (Strong Connection)

Sambungan antar elemen pracetak tetap berperilaku elastik pada saat gempa kuat. Sistem sambungan harus dan terbukti secara teoritis dan eksperimental memiliki kekuatan dan kekakuan yang minimal sama dengan yang dimiliki struktur sambungan beton monolit yang setara.

## 2. Sambungan Duktail (*Ductile Connection*)

Sambungan boleh terjadi deformasi inelastis. Sistem sambungan harus terbukti secara teoritis dan eksperimental memenuhi persyaratan kehandalan dan kekakuan struktur tahan gempa.

Terdapat juga jenis sambungan antara komponen beton pracetak yang biasa dipergunakan dibagi menjadi 2 kelompok sebagai berikut (Wahyudi et al., 2010):

### a. Sambungan Kering (*Dry Connection*)

Sambungan antar komponen beton pracetak menggunakan plat besi sebagai penghubung, yang kemudian dilas atau dibaut.

### b. Sambungan basah (*Wet Connection*)

Sambungan antar komponen beton pracetak yang ditandai dengan keluarnya besi tulangan dari beton pracetak yang akan disambungkan dengan cara dicor di tempat.

## D. Sambungan Balok Kolom

### D.1. Konsep Sambungan Balok- Kolom

Menurut Paulay dan Priestley (1992), menjelaskan bahwa joint balok-kolom merupakan daerah kritis yang dapat merespon inelastis untuk menahan gempa. Joint akan bekerja sebagai gaya geser horizontal dan vertikal serta memiliki nilai beberapa kali balok dan kolom yang bersebelahan.

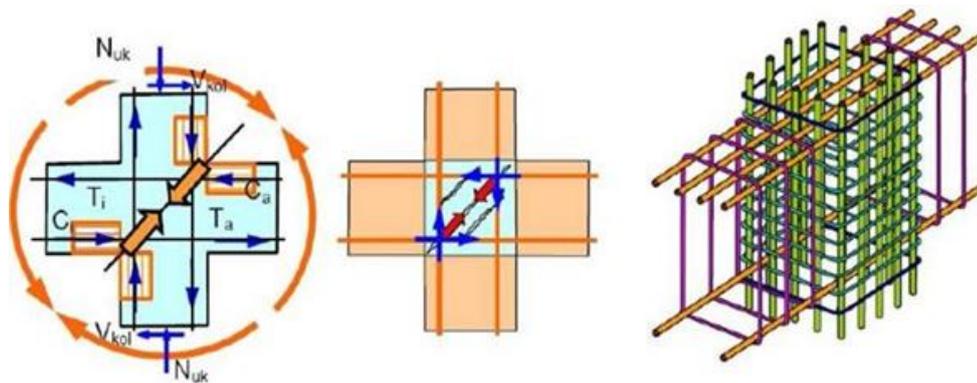
Adapun *joint* dapat dibedakan menurut tempat deformasi sebagai *joint* elastik dan *joint* inelastik. Pengertian *joint* elastik dan *joint* inelastik yaitu:

1. *Joint Elastic* dimana deformasi inelastis tidak terjadi pada balok dan kolom yang berbatasan dengan panel *joint* karena memiliki tulangan yang kuat.
2. *Joint Inelastic* dimana sendi plastis terjadi pada balok di muka kolom setelah beberapa kali siklus deformasi inelastik terjadi pada panel *joint*.

Menurut Widodo (2007), pada joint balok-kolom dalam struktur statis tak tentu memegang peranan penting dalam pengengkangan sehingga tidak terjadi kebebasan rotasi pada balok. Pengengkangan terjadi apabila joint balok-kolom merupakan satu kesatuan yang monolit

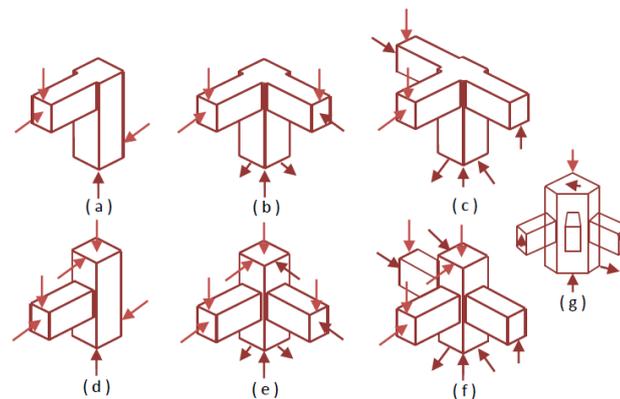
dan kaku. Kekakuan joint diperlukan agar redistribusi unbalance moment pada analisis struktur dapat dilakukan.

Daerah sambungan balok-kolom pada struktur gedung dari beton bertulang berfungsi untuk mentransfer gaya-gaya dari suatu elemen ke elemen lainnya seperti pada Gambar 2. Akibat pengaruh gaya lateral seperti gempa, sambungan balok-kolom akan mengalami gaya geser dan gaya horizontal yang lebih besar dari pada elemen balok dan kolom yang berdekatan. (Barsom, 1999)

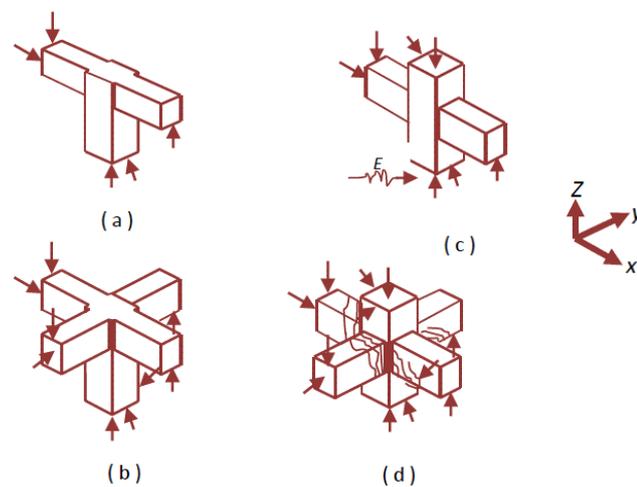


Gambar 2. Gaya dan Penulangan Geser pada Joint Balok-Kolom

Joint adalah pertemuan kolom dengan balok pada satu titik. Daerah joint merupakan bagian struktur bangunan yang paling rawan terhadap gempa. Jenis joint balok-kolom dalam suatu struktur dapat dibedakan dari letak titik kumpulnya yaitu joint luar (Exterior Joint) dan joint dalam (Interior Joint) yang diilustrasikan pada gambar 3 dan gambar 4



Gambar 3. Jenis Exterior Joint



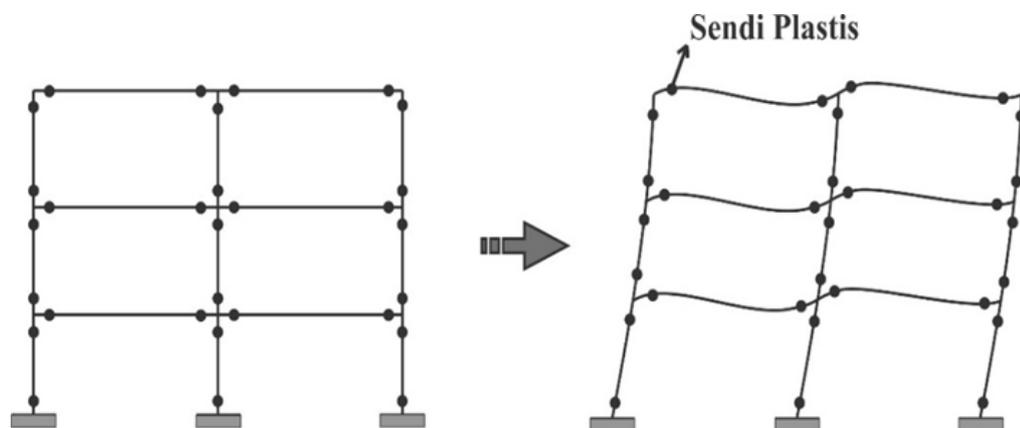
Gambar 4. Jenis Interior Joint

## D.2. Permasalahan pada sambungan Balok-Kolom

Daerah hubungan balok-kolom merupakan daerah kritis pada suatu struktur rangka beton bertulang, yang harus didesain secara khusus untuk berdeformasi inelastik pada saat terjadi gempa kuat. Sebagai akibat yang timbul dari momen kolom di atas dan bawahnya, serta momen-momen dari balok pada saat memikul beban gempa, daerah hubungan balok-kolom akan mengalami gaya geser horizontal dan vertikal yang besar. Gaya geser yang timbul ini besarnya akan menjadi beberapa kali lipat

lebih tinggi daripada gaya geser yang timbul pada balok dan kolom yang terhubung. Akibatnya apabila daerah hubungan balok-kolom tidak didesain dengan benar, akan menimbulkan keruntuhan geser yang bersifat getas dan membahayakan pengguna bangunan. (Setiawan, 2012)

Mekanisme kerusakan sebuah struktur harus didesain pada lokasi-lokasi tertentu sehingga setelah gempa kuat terjadi, dapat dengan mudah diperbaiki. Lokasi keruntuhan harus didesain pada balok dan kolom yang disebut sendi plastis. Sendi plastis atau *hinge* merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur (balok dan kolom) menahan gaya dalam. Konsep perencanaan struktur harus sesuai dengan *strong column-weak beam*. Apabila terjadi keruntuhan struktur maka baloklah yang harus runtuh dahulu, namun apabila kolomnya yang runtuh dahulu maka struktur langsung hancur. Letak sendi plastis terletak dimuka kolom dan tepi muka balok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5 (Reza, et.al, 2016)

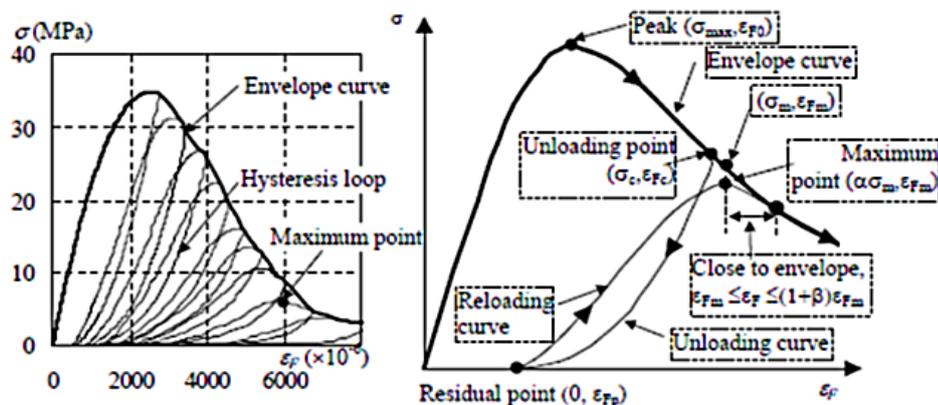


Gambar 5. Letak Sendi Plastis

## E. Beban Siklik

Beban siklik merupakan beban berulang yang diterima oleh suatu struktur. Kegagalan struktur juga bisa disebabkan oleh beban siklis yang terjadi, meskipun desain awal struktur memiliki kekuatan yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Kegagalan akibat kelelahan struktur (fatigue) yang merupakan fenomena dimana beton pecah ketika mengalami beban berulang pada tegangan lebih kecil daripada kekuatan tekan maksimum dan kekuatan fatigue yang didefinisikan sebagai kekuatan yang dapat didukung untuk sejumlah siklus tertentu. Fatigue dipengaruhi oleh berbagai pembebanan, tingkat pembebanan, load history dan sifat material (Al-Sulayfani, 2008).

Pada struktur kolom, beban aksial merupakan representatif dari berat sendiri dan beban siklis merupakan beban luar yang terjadi berulang misalkan beban gempa. Beban aksial dan siklis ini akan bekerja secara bersamaan pada struktur kolom. Untuk memprediksi perilaku struktur beton di bawah pembebanan seismik, model tegangan-regangan beton di bawah beban siklik (*loop histeresis*) adalah hal yang penting untuk diamati [Watanabe] dan digambarkan seperti gambar dibawah.



Gambar 6. Histeris Loop

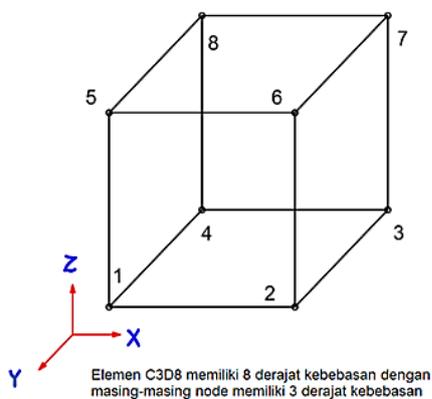
## F. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga atau finite element method (FEM) merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah struktural, termal dan elektromagnetik. Dalam metode ini seluruh masalah yang kompleks seperti variasi bentuk, kondisi batas dan beban diselesaikan dengan metode pendekatan. Karena keanekaragaman dan fleksibilitas sebagai perangkat analisis, metode ini mendapat perhatian dalam dunia teknik.

Prinsip dasar dari metoda elemen hingga adalah membagi struktur atau kontinum menjadi elemen hingga 'meshing'. Setiap elemen hingga harus diformulasikan mempunyai material dan bentuk tertentu. Kemudian, disusunlah matriks kekakuan dari kontinum terbagi tersebut. Setelah itu, diberikan kondisi batas esensial dan kondisi batas non-esensial (pembebanan). Setelah itu dihitung regangan elemen dari setiap derajat kebebasan elemen.

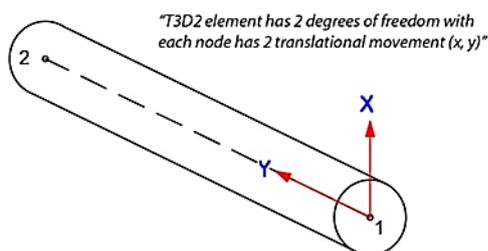
### F.1. Metode Elemen

Elemen model yang digunakan pada beton solid kontinum C3D8R. elemen ini terdiri dari tiga derajat kebebasan di setiap node dalam bentuk gerakan translasi  $U_1$ ,  $U_2$ , dan  $U_3$ . Berikut adalah gambar elemen model :



Gambar 7. C3D8R element linear brick untuk beton

C3D8R juga dikenal sebagai elemen isoparametri yang umumnya lebih disukai untuk digunakan dalam kasus pemodelan karena menawarkan konvergensi yang lebih cepat selama proses iterasi.



Gambar 8. T3D2 truss element untuk tulangan

Elemen truss 2 node dengan wire 3D digunakan untuk menentukan elemen baja tulangan dimana elemen ini dihomogenkan dengan beton. Pada T3D2, dua simpul menggambarkan dua derajat kebebasan terdiri

dari kompresi dan ketegangan yang lentur saat itu karenanya diabaikan. Jenis pemodelan yang digunakan adalah embedded yang meninjau tulangan sebagai elemen batang aksial yang ditempatkan di dalam elemen isoparametrik beton, sehingga menghilangkan derajat kebebasan transisi dan slip simpul ketika baja penguat telah bergabung dengan node beton.

## **F.2. *Material Properties***

Dalam beton konvensional, concrete damage plasticity (CDP) dipilih karena karakteristiknya untuk menunjukkan degradasi kekuatan dan kekakuan material di tingkat kerusakan beton. Model CDP adalah kontinum, berbasis plastisitas, model kerusakan yang dianggap bahwa mekanisme kegagalan utama terdiri dari retak tarik dan menghancurkan tekan (Tambusay, suprobo, & Amiruddin, 2017). Secara umum, konsep utama mekanika kontinum digunakan untuk mensimulasikan kompleks perilaku nonlinear dan bahan semu-rapuh (mis. Beton). Selain itu konsep, mekanika kontinum diproyeksikan untuk memberikan prediksi yang lebih baik di Indonesia terkait dengan respons struktural untuk semua jenis dan tingkat pembebanan. Berkenaan dengan kecukupan mengadopsi konsep kontinum mekanik, CDP juga telah dinilai sebagai salah satu model terbaik untuk mewakili perilaku kompleks beton dengan menerapkan elastisitas rusak

isotropic pada kombinasi dengan isotropic tekan dan plastisitas tarik untuk menghitung perilaku inelastis.

Seperti yang dinyatakan dalam buku manual ABAQUS, keuntungan menggunakan model CDP adalah terdaftar sebagai berikut:

- a. Ini memberikan kemampuan umum untuk pemodelan beton dan bahan-bahan dalam semua jenis struktur (balok, rangka, kerang, padatan, dan sebagainya).
- b. Ini menggunakan konsep kerusakan isotropic elastis dalam kombinasi dengan isotropik plastisitas tarik dan tekan untuk mewakili perilaku inelastis beton.
- c. Ini dapat digunakan untuk beton biasa terutama untuk analisis struktur beton bertulang.
- d. Dapat digunakan dengan *rebar* untuk memodelkan tulangan beton.

Pada ABAQUS, parameter kerusakan plastis beton telah dikembangkan dalam sejumlah pendekatan.

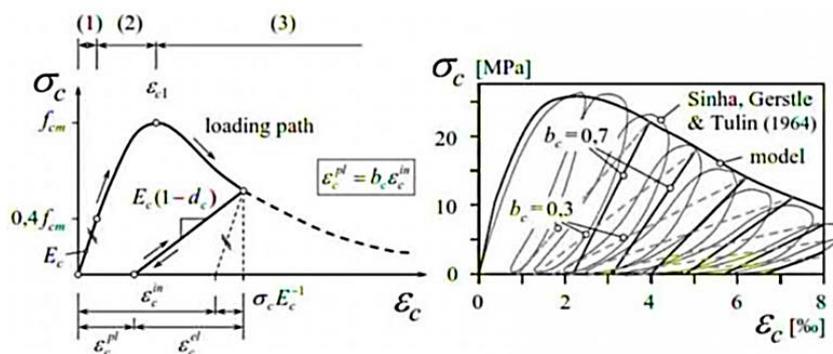
### **F.3. *Material Model***

#### **1. Material model beton**

Untuk material model concrete damage plasticity dipilih karena pada dasarnya concrete damage plasticity memiliki

kapasitas atau kemampuan umum untuk analisis struktur beton dibawah pembebanan siklik dan atau dinamis. Model ini juga cocok untuk analisis material lainnya, seperti batuan, mortar, dan keramik; tetapi perilaku beton yang digunakan di bagian ini untuk memotivasi berbagai aspek teori konstitutif. Di bawah pembatasan tekanan yang rendah, beton berperilaku rapuh; mekanisme kegagalan utama adalah retak saat ditarik dan hancur saat ditekan. Sifat rapuh beton menghilang ketika pembatas tekanan cukup besar untuk mencegah perambatan retak. Dalam keadaan ini, kegagalan didorong oleh konsolidasi dan runtuhnya mikrostruktur mikro beton.

Pembentukan kerusakan akibat tekan ( $d_c$ ) tergantung dengan regangan plastis yang terjadi, yang mana menunjukkan hubungan yang proporsional dengan regangan inelastiknya dengan faktor konstan  $b_c$ , dengan  $0 < b_c < 1$ . Nilai  $c = 0,7$  sesuai dengan data eksperimen pengujian pada Gambar 7, parameter kerusakan tekan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

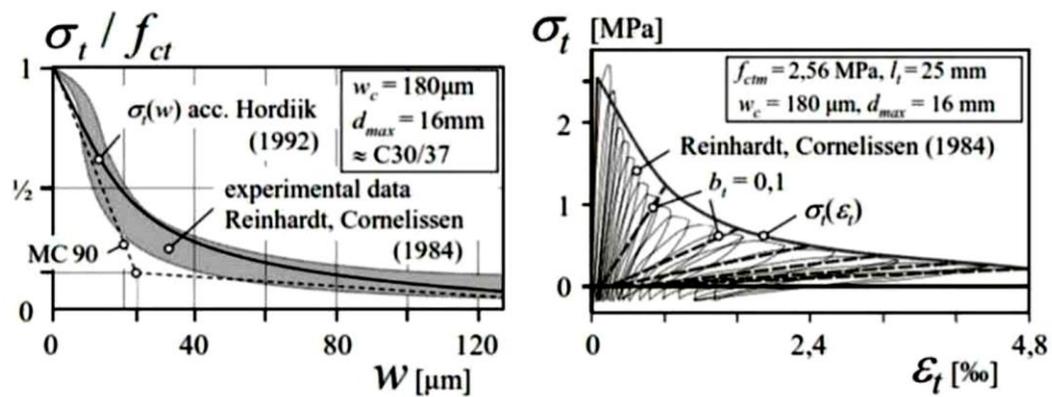


Gambar 9. Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan

Sumber : Sinha, 1964

- Keterangan :
- $dc$  = compression damage parameter,
  - $\Sigma c$  = tegangan tekan beton (MPa),
  - $E_c$  = modulus elastisitas beton (MPa),
  - $\varepsilon_c^{pl}$  = regangan tekan plastis beton,
  - $bc$  = factor konstan pendekatan monotonic tekan.

Serupa dengan pembentukan kerusakan tekan, kerusakan tarik ( $dt$ ) bergantung pada regangan plastis dan elastik pada saat beton mengalami tarik. Parameter  $bt = 0,1$  sesuai dengan hasil eksperimen pengujian tarik pada Gambar 5.



Gambar 10. Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik

Sumber : Reinhardt & Cornelissen, 1964

Perhitungan hubungan regangan dengan kerusakan  $eu$  dapat dihitung dengan persamaan (2).

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_c E^{-1}} \dots\dots\dots(2)$$

- Keterangan :
- $dt$  = tension damage parameter,
  - $ot$  = tegangan tekan beton (MPa),

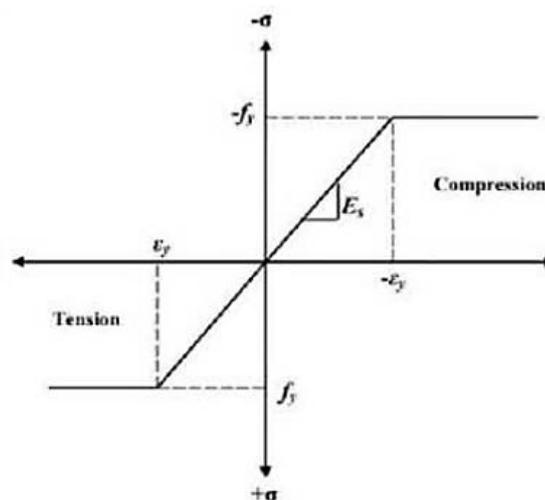
$E_t$  = modulus elastisitas beton (MPa),

$\varepsilon_c^{pl}$  = regangan tarik plastis beton,

$bt$  = factor konstan pendekatan monotonic tekan.

## 2. Material model baja

Material baja tulangan dimodelkan sebagai elastic perfectly plastik seperti pada Gambar 11, dimana respon elastik linear dianggap terjadi sebelum leleh maupun pengerasan-regangan (strain hardening) tidak terjadi.



Gambar 11. Model Tegangan- Regangan Elastic Perfectly Plastic

Sumber : Abaqus manual.

## G. Hasil Penelitian Sebelumnya

Herman Parung, R. Irmawaty, Ricko A. Mappayukki, dan Sudirman (2010). Penelitian yang dilakukan untuk meneliti tentang kekuatan sambungan balok-kolom pracetak menggunakan plat baja sebagai

konektor (JPSP-Joint Pracetak Sambungan Plat Baja). Sambungan pracetak dibuat untuk sambungan balok-kolom tipe interior dan eksterior, diuji dengan beban monotonic dan siklik. Kekuatan kedua benda uji dibandingkan kekuatannya dengan konstruksi yang monolit. Hasil diperoleh:

1. Tipe retak pada kedua konstruksi baik pracetak maupun monolit adalah serupa, yakni retak lentur, retak ini berada di daerah sambungan antara pracetak dan bagian yang disambung.
2. Kekuatan JPSP lebih tinggi dari konstruksi monolit. Hal ini dapat dilihat dari defleksi yang lebih rendah dari JPSP.
3. Tidak ada tanda keruntuhan joint, di mana sambungan kolom pracetak dilas sebelum digrouting.

Rudi Y. Adi, Ilham Nurhuda, Sukamta, dan Intan Fitriani (2014). Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki kekakuan dan mempelajari perilaku beton pracetak antara kolom monolit tanpa sambungan dengan kolom dengan sambungan. Sambungan yang digunakan adalah sambungan kering menggunakan plat dan baut mur. Hasil yang diperoleh:

1. Pada hubungan beban dengan lendutan dapat disimpulkan bahwa kekakuan benda uji kolom dengan sambungan lebih besar dibandingkan benda uji kolom monolit tanpa sambungan. Hal ini didapat dari rasio beban dengan lendutan kolom dengan sambungan yang lebih besar.

2. Pada hubungan tegangan dengan regangan beton dapat disimpulkan bahwa modulus elastisitas benda uji kolom monolit tanpa sambungan lebih besar dibandingkan benda uji kolom dengan sambungan.

Husni Mubarak (2019). Studi penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur beton bertulang dan perilaku beton prategang dengan hasil analisa disimulasikan menggunakan software Abaqus CAE 6.14. Dengan hasil tersebut penelitian perilaku balok beton bertulang dan balok beton prategang dengan metode elemen hingga menggunakan Software Abaqus 6.14 dilakukan dengan baik dan mendekati akurat dari hasil uji laboratorium.

Vido Septa Hidayat (2018). Studi ini bertujuan untuk menganalisis perilaku dinding batako-kait dengan metode elemen hingga, metode elemen hingga menggunakan software Abaqus. Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap dinding batako dengan bentuk batako yang berbeda dari batako konvensional pada umumnya. Dari hasil pemodelan numerik terhadap unit batako-kait menunjukkan perilaku yang mendekati pengujian terhadap benda uji di laboratorium.