

TESIS

**ANALISA OVERLAPPING TULANGAN PADA BALOK BETON
BERTULANG RETROFIT TERHADAP PERILAKU LENTUR**

Disusun dan diajukan oleh

SUMARNI KALA'

D012181005



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN (TESIS)

**ANALISA OVERLAPPING TULANGAN PADA BALOK BETON
BERTULANG RETROFIT TERHADAP PERILAKU LENTUR**

Disusun dan diajukan oleh :

SUMARNI KALA'

D012181005

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

pada tanggal 24 Februari 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

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

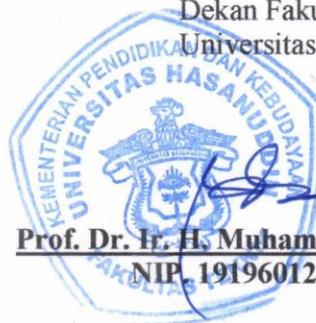
Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST, MT

NIP. 19620729 198703 1 001

NIP. 19791226 200501 1 001

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.

Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T

NIP. 19720619 200012 2 001

NIP. 1919601231 196809 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Sumarni Kala'
NIM : D012181005
Program Studi : Teknik Sipil / Struktur
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**(ANALISA OVERLAPPING TULANGAN PADA BALOK BETON
BERTULANG RETROFIT TERHADAP PERILAKU LENTUR)**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Tesis yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

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

Makassar, 06 Juni 2021

Yang Menyatakan



(Sumarni Kala')

ABSTRAK

Panjang balok beton bertulang sangat bervariasi, sedangkan pada umumnya tulangan yang diproduksi di Indonesia adalah 12 m. Oleh karena itu, penggunaan tulangan dalam bentang panjang menggunakan sambungan. Sambungan *lap splices* adalah sambungan yang paling ekonomis, dapat dibuat dengan cara menumpuk tulangan yang bersentuhan atau terpisah.

Penyambungan tulangan dapat menyebabkan kekuatan balok beton bertulang menjadi berkurang atau bahkan rusak sehingga diperlukan tindakan rehabilitasi yang dapat berupa retrofit (perbaikan). Retrofit dengan *wiremesh* dan *self compacting concrete* (SCC) dianggap dapat memperbaiki struktur bangunan. *Overlapping* tulangan pada perkuatan balok beton bertulang dengan *wiremesh* dan *self compacting concrete* dapat dianalisis dengan metode numerik untuk mengetahui pengaruhnya terhadap perilaku lentur.

Menganalisis perilaku struktur dapat dilakukan dengan menggunakan program berbasis metode elemen hingga. Penerapan metode elemen hingga digunakan dalam beberapa program, antara lain ABAQUS, ADINA, Atena, ANSYS, dll. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis overlapping tulangan pada balok beton bertulang retrofit terhadap perilaku lentur, overlapping dilakukan pada seperdua dan sepertiga dari bentang balok menggunakan perangkat lunak analisis berbasis metode elemen hingga.

Kata Kunci: balok beton bertulang, perilaku lentur, sambungan, retrofit

ABSTRACT

The length of reinforced concrete blocks varies widely, while in general, the reinforcement produced in Indonesia is 12 m. Therefore, the use of reinforcement in long spans uses joints. Lap splices are the most economical of the joints, and they can be made by stacking touching or separate reinforcement.

Splicing reinforcement can cause the strength of reinforced concrete beams to be reduced or even damaged so that rehabilitation measures are needed that can be in the form of retrofit (repair). Retrofitting with wire mesh and self-compacting concrete (SCC) is considered to improve building structures. Overlapping reinforcement in reinforced concrete beam reinforcement with wire mesh and self-compacting concrete can be analyzed by the numerical method to determine its effect on bending behavior. And to analyze the behavior of a structure can be done using a program based on the finite element method.

The application of the finite element method is used in several programs, including ABAQUS, ADINA, Atena, ANSYS, etc. The purpose of this study was to analyze the overlapping of reinforcement in retrofit reinforced concrete beams on the bending behavior, overlapping is carried out on one half and one-third of the beam span using analysis software based on the finite element method

Keyword: *reinforced concrete, bending behavior, overlappin, retrofit*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “**Analisa Overlapping Tulangan Pada Balok Beton Bertulang Retrofit Terhadap Perilaku Lentur**”.

Penelitian ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.

Saya menyadari sepenuhnya dalam penulisan penelitian ini tidak akan terlaksana sebagaimana yang diharapkan tanpa adanya bantuan, arahan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini perkenankan penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Pembimbing utama Bapak **Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng** yang telah membimbing penulis dalam penulisan penelitian ini.
2. Pembimbing pendamping Bapak **Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST,MT** yang telah banyak membimbing penulis dalam menyusun Hasil Penelitian ini.
3. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT.** (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin)
4. Ibu **Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.** (Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Gowa).

5. Para Dosen dan Staf Pascasarjana UNHAS dan Staf Prodi S2 Teknik Sipil yang telah membantu dan membimbing penulis selama mengikuti pendidikan pada Program Studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.
6. Ayahanda Yacob Kala' Pali', Ibunda Hj Mariati Rombe Payung, Saudara-saudaraku Muliadi Kala', Widiardi Kala', Winardi Kala', Muslimin Kala', Nurhayati Kala', Novaldi Kala' dan Hamid Kala' Rombe Payung yang terus memberikan dukungan dan semangat.
7. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi S2 Universitas Hasanuddin khususnya Angkatan 2018 Jurusan Teknik Sipil Konsentrasi Struktur.
8. Teman seperjuangan Nur Mutia Razak yang dari awal sampai akhir kuliah selalu berjuang bersama. Dan suami Andi Rachmat Saleh yang selalu menemani di proses terakhir.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam hasil penelitian ini, oleh karena itu penulis mengharapkan agar kiranya memberikan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan hasil penelitian ini. Akhir kata, Penulis mengharapkan hasil penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua, bangsa dan negara. Amin.

Makassar, 06 Juni 2021

Penulis



Sumarni Kala'

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Batasan Masalah.....	4
E. Manfaat Penelitian	4
F. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Hasil Penelitian Sebelumnya	6
B. Analisa Lentur Pada Balok Beton Bertulang	8
1. Tahap Beton Tanpa Retak	8
2. Tahap Beton Mulai Retak - Tegangan Elastis	9
3. Tahap Keruntuhan Balok – Tegangan Ultimit	10
C. Sambungan Tulangan	11
1. Sambungan Tulangan Tarik	11
2. Sambungan Tulangan Tekan	12
D. Metode Retrofit	12
1. <i>Wiremesh</i>	13
2. <i>Self Compacting Concrete (SCC)</i>	13
E. Analisa Elemen Hingga	14
1. Model Elemen	16
2. <i>Material Properties</i>	17
3. Material Model.....	19

BAB III METODE PENELITIAN	22
A. Rancangan Penelitian	22
B. Analisis Numerik.....	23
1. Desain Benda Uji	23
2. Pemodelan.....	28
3. <i>Input Properties</i>	30
4. Pemilihan Element.....	33
5. Penentuan Interaksi dan Mesh	35
6. Pemberian Tumpuan dan Beban.....	37
7. <i>Running</i>	38
BAB IV HASIL PENELITIAN	39
A. Hasil Uji Eksperimental.....	39
1. Hubungan Beban dan Lendutan Hasil Uji Eksperimental	39
2. Daktilitas	40
3. Pengamatan Pengujian Eksperimental.....	41
B. Hasil Analisis Numerik.....	43
1. Hubungan Beban dan Lendutan Hasil Analisis Numerik.....	43
2. Daktilitas	43
3. Pengamatan Hasil Analisa Numerik.....	44
C. Perbandingan Hasil Uji Eksperimen dan Hasil Uji Numerik	45
BAB V PENUTUP	51
A. Kesimpulan.....	51
B. Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kelas Sambungan Lewatan Dalam Kondisi Tarik	12
Tabel 4.1 Daktilitas Hasil Uji Eksperimental.....	40
Tabel 4.2 Daktilitas Hasil Analisa Numerik.....	44
Tabel 4.3 Rangkuman Uji Eksperimen dan Analisa Numerik	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tahap Beton Tanpa Retak	9
Gambar 2.2 Beton Mulai Retak - Tahap Tegangan Elastis	10
Gambar 2.3 Tahap Tegangan Ultimate	11
Gambar 2.4 <i>Konsep Dasar FEM</i>	16
Gambar 2.5 C3D8R Elemen Linear Brick untuk Beton	16
Gambar 2.6 T3D2 Elemen Baja untuk Tulangan	17
Gambar 2.7 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan	20
Gambar 2.8 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik.....	20
Gambar 2.9 Model Tegangan-Regangan Elastic Perfectly Plastic.....	21
Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian	22
Gambar 3.2 (a) Seperdua Bentang (b) Sepertiga Bentang	23
Gambar 3.3 BN	25
Gambar 3.4 BWS 1/2 50d	26
Gambar 3.5 BWS 1/3 50d	27
Gambar 3.6 Proses Create Part.....	28
Gambar 3.7 Proses Sketch Part.....	29
Gambar 3.8 Proses Create Material	32
Gambar 3.9 <i>Proses Create Section</i>	33
Gambar 3.10 Proses Assign Section	33
Gambar 3.11 Proses Assembly	34
Gambar 3.12 Proses Step	34
Gambar 3.13 Proses Interaction.....	35
Gambar 3.14 Proses Mesh	37
Gambar 3.15 Proses Load	37
Gambar 3.16 Proses Running	38
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Beban dan Lendutan Hasil Uji Eksperimental	39
Gambar 4.2 Pola Retak Balok Hasil Uji Numerik	41
Gambar 4.3 Debonding Failure.....	42
Gambar 4.4 Wiremesh dalam Keadaan Putus	42
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Beban dan Lendutan Hasil Analisa Numerik	43
Gambar 4.6 Pola Kegagalan Balok Hasil Analisa Numerik.....	45

Gambar 4.7 Hubungan Beban dan Lendutan BN.....	46
Gambar 4.8 Hubungan Beban dan Lendutan BWS 1/2 50d	47
Gambar 4.9 Hubungan Beban dan Lendutan BWS 1/3 50d	48
Gambar 4.10 Perbandingan Retak	48

DAFTAR NOTASI

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
P	Beban	KN
P_y	Beban Leleh	KN
P_{maks}	Beban Maksimum	KN
A	Luas penampang	cm ²
μ_{oi}	Daktalitas parsial	
μ_i	Daktalitas penuh	
Δe_i	Total simpangan <i>displacement</i>	Mm
E_i	Simpangan	Mm
E_y	Simpangan saat leleh	Mm
Φ_u	Kelengkungan batas	
Φ_y	Kelengkungan leleh	
δ_{maks}	Defleksi maksimum	Mm
δ_y	Defleksi saat leleh	Mm
Ξ	Rasio kekakuan	
V_n	Gaya geser nominal balok	N
V_e	Gaya geser kolom	N
l	Panjang balok	Mm
H	Tinggi kolom	Mm
B	Lebar balok	Mm
EI	Kekakuan	Nmm ²
M_{cr}	Momen retak	Nmm
E_c	Modulus elastisitas beton	MPa
M_u	Momen runtuh	Nmm
M_y	Momen leleh	Nmm
E_s	Modulus elastisitas baja	MPa
D	Beban mati	N
L	Beban hidup	N
f'_c	Kuat tekan beton	MPa
f_y	Kuat Tarik baja	MPa
SRBBPMM	Sistem Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Menengah	

SRBBPMK	Sistem Rangka Beton Bertulang Pemikul Momen Khusus
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
Strain gauge beton	Pengukur regangan beton
Strain gauge baja	Pengukur regangan baja
<i>Curing</i>	Perawatan beton 0-28 hari

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton bertulang adalah material komposit yang terdiri dari beton dan baja tulangan. Beton memiliki sifat yang kuat menahan tekan tetapi lemah menahan tarik. Sedangkan baja tulangan di dalam beton memiliki sifat sebagai penulangan lentur yang berfungsi menahan gaya tarik yang bekerja. Panjang bentangan balok beton bertulang sangat bervariasi sedangkan tulangan itu sendiri umumnya diproduksi dengan panjang maksimal 12 m. Untuk mengatasi penggunaan tulangan pada bentangan yang cukup panjang maka dilakukan penyambungan.

Menurut Lancelot (1985), penyambungan tulangan dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu sambungan lewatan (*lap splices*), sambungan las (*welded splices*), dan sambungan mekanis (*mechanical connections*). Menurut Dipohusodo (1994) sambungan lewatan merupakan sambungan yang paling ekonomis. Sambungan lewatan (*splice*) dapat dibuat dengan cara membuat *overlap* tulangan yang saling bersentuhan ataupun terpisah (Wang dan Salmon, 1993). Pada balok, penyambungan sebaiknya diletakkan pada bagian yang mengalami tegangan tarik paling rendah agar gaya tarik dapat terdistribusi dengan baik. Jika panjang penyambungan lebih kecil atau letak penyambungan yang tidak tepat maka dapat menjadi penyebab cepatnya kerusakan pada balok beton bertulang tersebut.

Adanya penyambungan tulangan dapat mengakibatkan kekutan balok beton bertulang berkurang atau bahkan rusak sehingga diperlukan tindakan rehabilitasi yang dapat berupa *retrofit* (perbaikan). *Retrofit* dengan *wiremesh* dan *self compacting concrete* (SCC) dianggap dapat memperbaiki struktur bangunan yang ada sehingga menghemat biaya perencanaan konstruksi bangunan.

Perilaku lentur pada balok beton bertulang dengan *overlapping* tulangan dan di-*retrofit* dengan wiremesh dan SCC dapat dipelajari lebih lanjut. Cara untuk mempelajarinya adalah dengan uji eksperimental ataupun dengan analisis numerik. Uji eksperimental merupakan pengujian yang dilakukan dengan model fisik yang dibuat di laboratorium sedangkan analisis numerik merupakan suatu teknik penyelesaian yang diformulasikan secara matematis. Uji eksperimental terbilang lebih rumit dan mahal dibandingkan dengan uji numerik.

Analisis numerik bisa dilakukan secara manual (*hand calculation*) atau dengan bantuan komputer. Menurut Setiawan (2016) dalam analisa suatu permasalahan yang didekati dengan menggunakan metoda numerik, pada umumnya melibatkan angka – angka dalam jumlah banyak dan proses perhitungan matematika yang cukup rumit. Perhitungan secara manual akan memakan waktu yang panjang dan lama (*consuming time*), namun dengan munculnya berbagai program komputer, masalah ini dapat diselesaikan dengan mudah. Perkembangan teknologi mendorong jauh kemajuan program. Maka dari itu, analisis numerik dengan program semakin dimungkinkan untuk melakukan kalkulasi yang tidak dapat diselesaikan dengan tangan. Sekarang untuk menganalisis suatu perilaku struktur dapat dilakukan menggunakan program berbasis metoda elemen hingga '*finite element method*'. Dalam ilmu teknik sipil, pengaplikasian metoda elemen hingga digunakan dalam beberapa program, diantaranya ABAQUS, ADINA, Atena, ANSYS, dll. Analisis menggunakan program dapat menghemat waktu dan biaya untuk pembuatan model fisik. Hal ini dikarenakan, tidak perlu merakit *specimen*, tidak perlu menunggu umur beton siap uji, tidak perlu memasang *strain gauge*, dan tidak perlu melakukan instalasi mesin. Selain itu analisis numerik dapat menghasilkan hasil yang tidak didapatkan dari uji eksperimental, diantaranya tegangan dan regangan pada setiap langkah analisis.

Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisa *overlapping* tulangan pada balok beton bertulang yang di-*retrofit* dengan *wiremesh* dan *self compacting concrete* (SCC), dimana *overlapping* tulangan diletakkan pada seperdua bentang balok dan sepertiga balok.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang maka dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana analisa *overlapping* tulangan pada seperdua dan sepertiga bentangan balok beton bertulang yang di-*retrofit* dengan *wiremesh* dan SCC menggunakan analisis numerik?
2. Bagaimana perbandingan hasil uji eksperimental dengan analisis numerik pada balok beton bertulang yang di-*retrofit* dengan *wiremesh* dan SCC serta diberi *overlapping* tulangan pada seperdua dan sepertiga bentang balok?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang dan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah :

1. Untuk menganalisa balok beton bertulang yang diberi *overlapping* tulangan pada seperdua dan sepertiga bentangan serta di-*retrofit* dengan *wiremesh* dan SCC dengan analisa numerik.
2. Untuk membandingkan hasil uji eksperimental dan analisis numerik yang dialami oleh balok beton bertulang yang diberi *overlapping* tulangan pada seperdua dan sepertiga bentangan serta di-*retrofit* dengan *wiremesh* dan SCC.

D. Batasan Masalah

Untuk membatasi pembahasan masalah pada tesis ini agar tidak terlalu luas maka uji numerik yang dilakukan terbatas pada hal-hal berikut :

1. Data uji eksperimental menggunakan hasil analisis dari Beatriks Thomana yang berjudul Studi Penggunaan Material Retrofit *Wiremesh* dan SCC dengan Variasi *Overlapping* Tulangan di Sepertiga Bentangan Terhadap Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang dan tugas akhir dari Eka Putri Pertiwi yang berjudul Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Variasi *Overlapping* Tulangan di Seperdua Bentangan dengan Metode Retrofit Menggunakan *Wiremesh* dan SCC.
2. *Overlapping* tulangan diletakkan pada seperdua ($1/2$) dan sepertiga ($1/3$) bentangan dengan panjang *overlapping* adalah $50d$.
3. Pemodelan balok beton bertulang menggunakan program komputer berbasis *Finite Elemen Method* (FEM).

E. Manfaat Penelitian

1. Diharapkan dapat menjadi referensi untuk mengetahui posisi *overlapping* tulangan yang tepat dalam penyambungan tulangan terutama untuk balok beton bertulang yang di-*retrofit*.
2. Diharapkan dapat bermanfaat sebagai inovasi untuk meningkatkan kualitas penyambungan balok beton bertulang.

F. Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tesis yang dilakukan, penulis membagi penulisan menjadi beberapa bagian, yaitu bagian pembuka, isi, dan bagian akhir. Bagian isi sendiri terbagi lagi menjadi beberapa bagian seperti berikut :

BAB I – PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang dilakukannya penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan tesis.

BAB II – TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini akan dipaparkan atau dijelaskan beberapa teori, standar, serta rumus yang akan digunakan selama penelitian serta penjelasan dari hasil penelitian.

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 – HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

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

BAB V - PENUTUP

Pada bab ini akan dipaparkan beberapa simpulan yang didapat dari hasil dan pembahasan juga akan diberikan beberapa saran penulis kepada pembaca.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil Penelitian Sebelumnya

Berdasarkan uji eksperimental yang dilakukan oleh Beatriks Thomana (2018) dari tugas akhir yang berjudul “Studi Penggunaan Material Retrofit *Wiremesh* dan SCC dengan Variasi *Overlapping* Tulangan di Sepertiga Bentangan Terhadap Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang” diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Lapisan *wiremesh* dan SCC serta perbesaran (variasi) *overlapping* tulangan mempengaruhi perilaku lentur balok. Balok yang diberi lapisan *wiremesh* dan SCC serta variasi *overlapping* tulangan lebih bersifat daktail dibandingkan dengan balok normal. Hal ini terlihat dari lendutan yang terjadi pada balok retrofit lebih besar daripada balok normal sebelum mengalami kegagalan.
2. Pola retak yang terjadi pada semua balok baik balok kontrol (normal) maupun balok retrofit mengalami retak lentur. Hal ini membuktikan bahwa lapisan *wiremesh* dan SCC menyebabkan meningkatnya kekuatan pada balok dalam menahan gaya lentur yang diberikan.
3. Mode kegagalan yang terjadi pada balok seluruhnya mengalami leleh pada tulangan tekan. Pada balok retrofit terjadi debonding dan putus pada *wiremesh* karena tidak mampu menahan beban yang diberikan pada balok. Hal ini diakibatkan karena kurang melekatnya beton eksisting dengan beton retrofit. Selain itu, lapisan beton SCC memberikan lekatan yang baik pada *wiremesh*.

Berdasarkan uji eksperimental yang dilakukan oleh Eka Putri Pertiwi (2018) dari tugas akhir yang berjudul “Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Variasi *Overlapping* Tulangan di Seperdua Bentangan dengan Metode Retrofit Menggunakan *Wiremesh* dan SCC” sebagai salah satu variasi benda uji.

1. Perilaku lentur yang ditunjukkan oleh balok beton bertulang dengan variasi *overlapping* tulangan di seperdua bentangan dan diberikan retrofit menggunakan *wiremesh* dan SCC menunjukkan bahwa *overlapping* tulangan dapat menurunkan kapasitas beban karena diletakkan pada bagian momen lentur maksimal. Maka tidak disarankan untuk memberikan *overlapping* di seperdua bentang.
2. Perbedaan balok beton bertulang dengan variasi *overlapping* tulangan di seperdua bentangan dan diberikan retrofit menggunakan *wiremesh* dan SCC ialah semakin panjang *overlapping*, maka semakin rendah nilai daktilitasnya. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa pada beton bertulang yang memiliki *overlapping* lebih panjang dengan perkuatan, memiliki lendutan yang lebih rendah.
3. Pola retak yang ditunjukkan menunjukkan bahwa balok beton bertulang dengan variasi *overlapping* tulangan di seperdua bentangan dan diberikan retrofit menggunakan *wiremesh* dan SCC hanya memiliki retak lentur di dalamnya.
4. Mode kegagalan yang terjadi pada balok beton bertulang dengan variasi *overlapping* tulangan di seperdua bentangan dan diberikan retrofit menggunakan *wiremesh* dan SCC ialah kegagalan lentur, retrofit yang digunakan, *wiremesh* dan SCC terlepas dari beton eksisting (*debonding*), dan juga *wiremesh* yang digunakan putus saat pengujian.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Slamet Prayitno, Sunarmasto, Hening Agustya (2016) yaitu "Pengaruh Panjang Sambungan Lewatan Lebih dari Syarat SNI-2847-2013 Terhadap Kuat Lentur Pada Balok Beton Bertulang Tulangan Baja Ulir" didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin panjang sambungan lewatan pada balok beton bertulang tulangan baja ulir, maka semakin besar momen lentur yang terjadi.
2. Momen hasil pengujian yang terjadi pada saat retak pertama dan pada saat leleh memiliki momen yang lebih besar daripada momen hasil analisis, maka dari itu panjang sambungan lewatan yang digunakan telah memenuhi syarat.
3. Semakin panjang sambungan lewatan pada balok beton bertulang tulangan baja ulir, maka semakin kecil lendutan yang terjadi pada saat beban maksimal.
4. Pola retak yang terjadi berdasarkan pengamatan saat pengujian pada tengah bentang, dimulai dari bagian bawah balok pada daerah tarik. Peningkatan beban aksial yang terjadi saat pembebanan menyebabkan peningkatan nilai lendutan dan juga rekatan yang terjadi bertambah panjang.

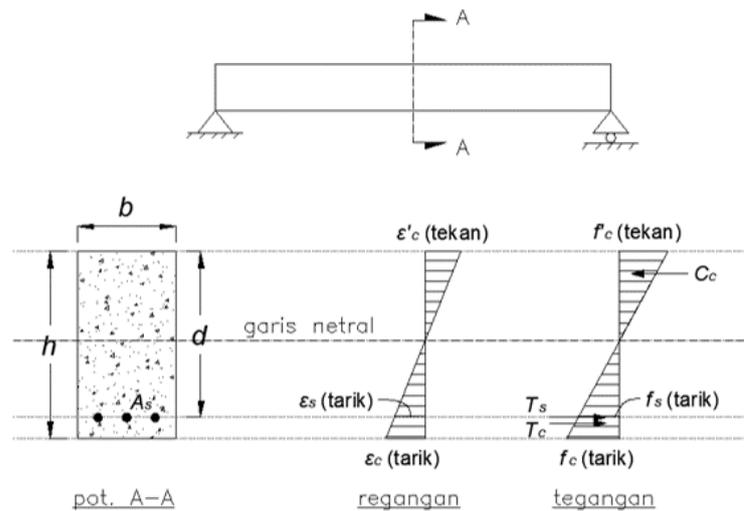
B. Analisa Lentur Pada Balok Beton Bertulang

Menurut McCormac (2003) diasumsikan bahwa sebuah beban melintang diletakkan pada sebuah balok beton yang dilengkapi dengan tulangan tarik dan bahwa beban tersebut ditingkatkan secara bertahap sampai balok mengalami runtuh. Ketika hal ini terjadi, diasumsikan bahwa balok tersebut telah mengalami tiga tahap yang berbeda sebelum keruntuhan terjadi. Tahap-tahap tersebut adalah (1) tahap beton tanpa retak, (2) tahap beton mulai retak-tegangan elastis dan (3) tahap tegangan ultimit. Balok yang dibicarakan disini adalah balok relatif panjang sehingga geser yang terjadi tidak akan memberi pengaruh besar kepada perilaku balok.

1. Tahap Beton Tanpa Retak

Pada beban-beban yang kecil ketika tegangan-tegangan tarik masih lebih rendah daripada modulus keruntuhan (tegangan tarik lentur dengan tekan pada saat beton mulai retak), seluruh penampang melintang balok menahan lentur dengan tekan

pada satu sisi dan tarik pada sisi lainnya. Gambar 2.1 menunjukkan variasi tegangan dan regangan untuk beban-beban kecil ini,

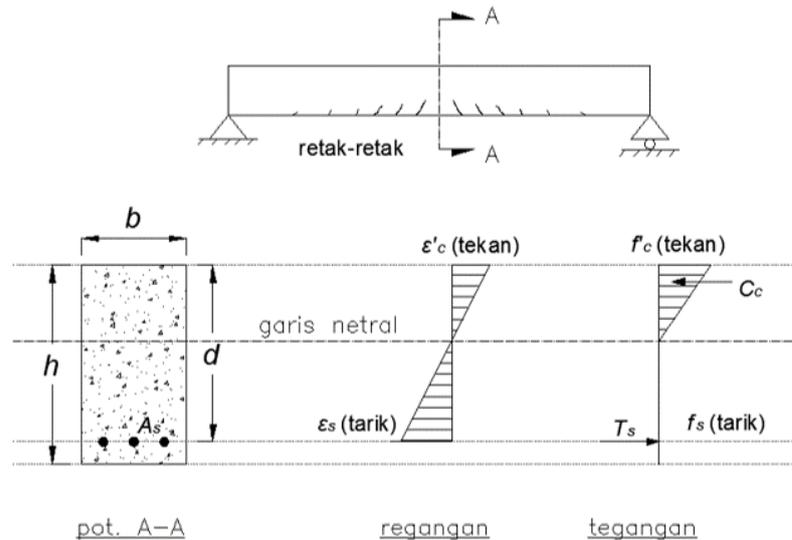


Gambar 2.1 Tahap Beton Tanpa Retak

2. Tahap Beton Mulai Retak - Tegangan Elastis

Karena beban terus ditingkatkan melampaui modulus keruntuhan balok, retak mulai terjadi di bagian bawah balok. Momen pada saat retak ini mulai terbentuk yaitu ketika tegangan tarik di bagian bawah balok sama dengan modulus keruntuhan disebut momen retak M_{cr} . Jika beban terus ditingkatkan, retak ini mulai menyebar mendekati sumbu netral. Retak terjadi pada tempat-tempat di sepanjang balok dimana momen aktualnya lebih besar daripada momen retak, seperti yang diperlihatkan dalam gambar 2.2(a).

Karena sekarang bagian bawah balok sudah retak, terjadilah tahap selanjutnya karena beton pada daerah yang mengalami retak tersebut jelas tidak dapat menahan tegangan tarik — bajalah yang harus melakukannya. Tahap ini akan terus berlanjut selama tegangan tekan pada serat bagian atas lebih kecil daripada setengah dari kuat tekan beton f_c dan selama tegangan baja lebih kecil daripada titik lelehnya. Tegangan dan regangan pada kisaran ini ditunjukkan pada gambar 2.2(b). Pada tahap ini tegangan tekan berubah-ubah secara linear terhadap jarak dari sumbu netral atau sebagai sebuah garis lurus.

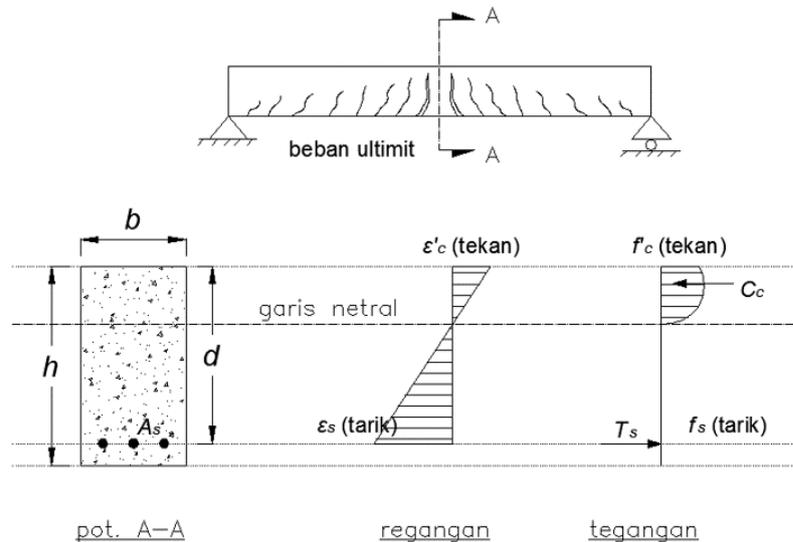


Gambar 2.2 Beton Mulai Retak - Tahap Tegangan Elastis

Variasi tegangan-regangan garis-lurus biasanya terjadi pada balok beton bertulang pada kondisi-kondisi beban-layan normal karena pada tingkat beban tersebut tegangan yang terjadi biasanya lebih kecil daripada $0,5f'_c$. Untuk menghitung tegangan beton dan baja pada kisaran ini, digunakan metode luasan-transformasi. Beban layan atau beban kerja adalah beban-beban yang diasumsikan sesungguhnya terjadi ketika sebuah struktur digunakan atau melakukan fungsi layannya. Ketika menerima beban-beban ini, momen-momen yang terjadi lebih besar daripada momen retak. Sehingga sisi balok yang mengalami tarik akan retak. Sudah jelas, sisi balok yang mengalami tarik akan retak.

3. Tahap Keruntuhan Balok – Tegangan Ultimit

Ketika beban terus ditambah sampai tegangan tekannya lebih besar daripada setengah f'_c , retak tarik akan merambat lebih ke atas, demikian pula sumbu netral, sehingga tegangan beton tidak berbentuk garis lurus lagi. Untuk pembicaraan awal ini, diasumsikan bahwa batang-batang tulangan telah leleh. Variasi tegangan yang terjadi adalah seperti diperlihatkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tahap Tegangan Ultimate

C. Sambungan Tulangan

Umumnya panjang baja tulangan yang ada dipasaran adalah 12 m, namun terkadang kebutuhan panjang tulangan melebihi panjang tulangan yang ada sehingga mengharuskan penggunaan sambungan tulangan (*splices*). Penyambungan tulangan yang banyak digunakan adalah berupa sambungan lewatan dan sambungan mekanis atau las. Panjang lewatan adalah panjang minimal yang diperlukan oleh tulangan, yang disambung secara *overlapping* pada beton bertulang, agar dapat memberikan transfer kekuatannya secara penuh pada tulangan penyambungannya. Sambungan lewatan sebaiknya tidak diletakkan pada daerah terjadi momen lentur maksimum, selain itu sebaiknya pula beberapa sambungan lewatan tidak terkumpul pada satu lokasi yang sama kerana akan memperlemah penampang beton

1. Sambungan Tulangan Tarik

Dua alternatif untuk sambungan lewatan pada kondisi tarik I_{st} , yaitu sambungan lewatan kelas A dan kelas B (yang tidak boleh kurang dari 300 mm) dan besarnya adalah :

- i. Sambungan lewatan kelas A1,0 l_d
- ii. Sambungan lewatan kelas B1,3 l_d

Tabel 2.1 Kelas Sambungan Lewatan Dalam Kondisi Tarik

$\frac{\text{As terpasang}}{\text{As perlu}}$	Presentase Maksimum A_s Yang Disambung Sepanjang l_d	
	50	100
$\geq 2,0$	Kelas A	Kelas B
$< 2,0$	Kelas B	Kelas A

2. Sambungan Tulangan Tekan

Panjang sambungan lewatan pada kondisi tekan ditentukan dalam ACI 318M-11 pasal 12.16 yaitu :

- i. $l_{sc} > 0,071f_yd_b$ (untuk $f_y \leq 420$ MPa)
- ii. $l_{sc} = (0,13f_y - 24) d_b$ (untuk $f_y > 420$ MPa)

Dalam semua hal, panjang lewatan pada kondisi tekan tidak boleh kurang daripada 300mm. Disamping itu nilai kuat tekan beton f'_c yang kurang dari 21 MPa, maka Panjang lewatannya dinaikkan sepertiganya.

D. Metode Retrofit

Dalam ilmu konstruksi terdapat istilah "*retrofitting*" yaitu metode atau teknik untuk melengkapi bangunan dengan memodifikasi atau me-*restore* dengan menambahkan bagian atau peralatan baru yang dianggap perlu karena tidak tersedia pada saat awal pembuatannya. Teknik *retrofitting* bertujuan untuk menyesuaikan kondisi atau keperluan baru terhadap bangunan seperti memperbaiki bangunan yang rusak, memperkuat bangunan, menambah ruangan dan lain sebagainya, tanpa harus membongkar total bangunan yang sudah ada.

Sebelum melakukan *retrofitting*, harus diperhatikan beberapa hal:

1. Melakukan peninjauan ke lapangan.
2. Melakukan pemeriksaan terhadap material dan mutu bahan yang digunakan.

3. Menganalisa sebab kerusakan bangunan.
4. Menganalisa kekuatan bangunan apakah masih mampu menahan beban atau tidak.
5. Setelah melakukan analisa, jika dianggap struktur bangunan masih mampu menahan beban maka *retrofitting* tidak perlu dilakukan. Dan sebaliknya, jika struktur bangunan dirasa tidak mampu menahan beban, maka perbaikan terhadap struktur yang rusak harus dilakukan, dapat berupa menambahkan material lain misalnya pemakaian wrap/fiber, penambahan struktur baja, pemasangan *external prestress*, dan lain sebagainya.
6. Setelah *retrofitting* selesai dieksekusi di lapangan, bangunan tersebut harus dianalisa kembali untuk memastikan bahwa struktur benar-benar dalam kondisi aman.

1. Wiremesh

Kawat anyam adalah nama populer di Indonesia untuk istilah *wiremesh*. Nama ini sesuai dengan produk besi yang memiliki bentuk seperti anyaman. Dalam dunia konstruksi, kehadiran *wiremesh* memberikan berbagai keuntungan diantaranya konstruksi lebih kuat dan efisien. Dalam pembuatan *wiremesh* batang besi dengan diameter tertentu dirangkaikan dalam dua arah. Rangkaian dibuat dengan jarak yang sama dan seragam hingga terbentuk lembaran. Ada dua jenis produk *wiremesh*, yaitu berupa lembaran dan rol (gulungan). Pada metode retrofit, *wiremesh* yang digunakan adalah rol karena lebih murah dan mudah saat di aplikasikan.

2. Self Compacting Concrete (SCC)

Self compacting concrete atau yang umum disingkat dengan istilah SCC adalah beton segar yang sangat plastis dan mudah mengalir karena berat sendirinya mengisi keseluruhan cetakan yang dikarenakan beton tersebut memiliki

sifat-sifat untuk memadatkan sendiri, tanpa adanya bantuan alat penggetar untuk pemadatan. Beton SCC yang baik harus tetap homogen, kohesif, tidak segresi, tidak terjadi *blocking* dan tidak *bleeding*. Pemakaian beton SCC sebagai material repair dapat meningkatkan kualitas beton repair oleh karena dapat menghindari sebagian dari potensi kesalahan manusia akibat manual *compaction*. Pemadatan yang kurang sempurna pada saat proses pengecoran dapat mengakibatkan berkurangnya durabilitas beton. Sebaliknya dengan beton SCC, struktur beton repair menjadi lebih padat terutama pada daerah pembesian yang sangat rapat dan waktu pelaksanaan pengecoran juga lebih cepat. Beberapa syarat yang harus dipenuhi agar campuran beton bisa dikategorikan sebagai SCC antara lain :

1. Pemilihan material yang sesuai
2. *Mix design* yang mampu memenuhi kriteria *filling ability*, *passing ability*, dan ketahanan terhadap segresi

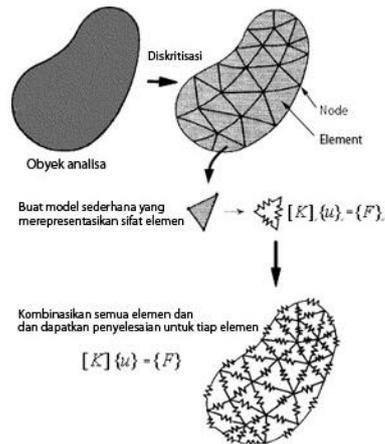
E. Analisa Elemen Hingga

Analisa elemen hingga merupakan suatu teknik numerik. Dalam metode elemen hingga, semua kompleksitas dari sebuah problem tetap dipertahankan sebagaimana adanya, seperti variasi bentuk, syarat batas, dan beban. Solusi penyelesaian yang dicapai dari metode elemen hingga merupakan pendekatan dari solusi eksaknya (Bhavikatti, 2005).

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala fisis. Tipe masalah teknis dan matematis fisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi menjadi dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non struktur. Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi analisa tegangan/*stress*, *buckling*, dan analisa getaran. Problem non struktur yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode ini meliputi

perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, dan distribusi dari potensial listrik dan potensial magnet. Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti persoalan pembebanan terhadap struktur yang kompleks pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji.

Konsep paling dasar dari metode elemen hingga adalah menyelesaikan suatu problem dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah. Kata "*finite* atau terhingga" digunakan untuk menekankan bahwa bagian-bagian kecil tersebut tak terhingga, seperti yang lazim digunakan pada metode integral analitik. Membagi bagian analisa menjadi bagian-bagian kecil disebut "*discretizing* atau diskritisasi". Bagian-bagian kecil ini disebut elemen, yang terdiri dari titik-titik sudut (disebut nodal, atau node) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik-titik tersebut. Membagi sebuah objek menjadi bagian-bagian kecil secara fisika sebenarnya menuntun kita kepada pembuatan persamaan diferensial. Jadi secara lebih matematis, FEM didefinisikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan problem yang dinyatakan dalam persamaan diferensial. Namun biasanya definisi FEM secara matematis memberikan kesan yang rumit yang.



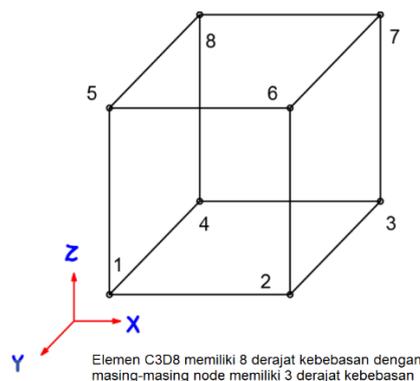
Gambar 2.4 Konsep Dasar FEM

Perkembangan pesat dari teknologi komputer mendorong metode ini, karena komputer dibutuhkan sebagai perangkat aplikasi dari metode numerik. Diantara *software* paket yang populer untuk analisis metode numerik adalah NASTRAN, ANSYS, LSDYNA dan ABAQUS. Dengan menggunakan *software* ini dapat menganalisis struktur yang kompleks.

ABAQUS merupakan salah satu *software computer-aided engineering (CAE)*. Saat ini ABAQUS berubah menjadi ABAQUS FEA atau SIMULIA ABAQUS FEA untuk *finite element analysis*.

1. Model Elemen

Elemen model yang digunakan pada beton adalah *solid* kontinum C3D8R. Elemen ini terdiri dari tiga derajat kebebasan di setiap node dalam bentuk gerakan translasi U1, U2, dan U3.

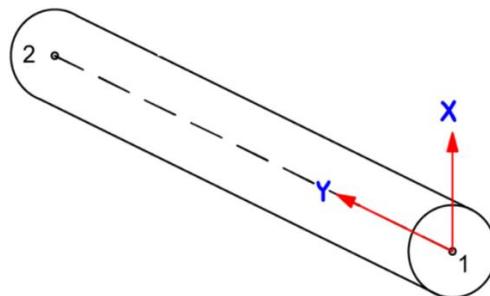


Gambar 2.5 C3D8R Elemen Linear Brick untuk Beton

C3D8R juga dikenal sebagai elemen isoperimetri yang umumnya lebih disukai untuk digunakan dalam kasus pemodelan karena menawarkan konvergensi yang lebih cepat selama proses iterasi. Dalam elemen C3D8R, integrasi yang dikurangi, lebih sering digunakan untuk mengurangi waktu perhitungan dalam analisis 3D nonlinier.

Elemen baja dua node (T3D2) dengan *wire* 3D telah digunakan untuk mendefinisikan elemen baja tulangan dimana elemen ini dihomogenkan di atas beton. Pada T3D2, dua-simpul menggambarkan dua derajat kebebasan terdiri dari kompresi dan ketegangan yang lentur saat itu karenanya diabaikan. Untuk memperhitungkan ikatan yang sempurna antara beton padat dan elemen tulangan, sistem kendali tertanam digunakan. Pada kasus ini, elemen dari T3D2 tertanam di dalam beton dengan demikian menghilangkan derajat kebebasan transisi dan slip simpul ketika baja penguat telah bergabung dengan node beton.

T3D2 elemen memiliki 2 derajat kebebasan dengan masing-masing node memiliki 2 perpindahan (x,y)



Gambar 2.6 T3D2 Elemen Baja untuk Tulangan

2. Material Properties

Parameter-parameter yang digunakan untuk proses simulasi antara lain *mass density*, *young's modulus* dan *von mises stress*.

- a. *Mass Density*
- b. Deformasi dan Modulus Elastisitas (*Young's Modulus*)
- c. *Von Mises Stress*

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. Secara umum, konsep utama mekanika kontinum digunakan untuk mensimulasikan kompleks perilaku non linear dari bahan semurapuh (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 isotropik pada kombinasi dengan isotropik 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 dalam semua jenis struktur (balok, rangka, kerang, padatan, dan sebagainya).
- b. Ini menggunakan konsep kerusakan isotropik 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 beton plastis telah dikembangkan dalam sejumlah pendekatan. Berbagai studi sekarang telah dilakukan untuk memberikan persamaan yang dapat dipercaya mengenai tujuan untuk menghasilkan prediksi yang masuk akal.

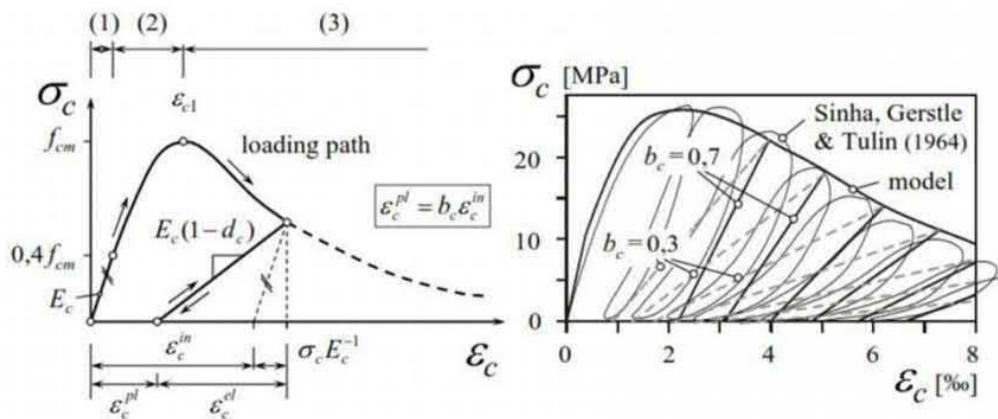
3. Material Model

a. Material Model Beton

Untuk Material model Concrete damage plasticity dipilih karena pada dasarnya Concrete damage plasticity memiliki kapasitas/kemampuan umum untuk analisis struktur beton di bawah pembebanan siklik dan/atau dinamis. Model ini juga cocok untuk analisis material lainnya, seperti batuan, mortar, dan keramik; tetapi perilaku beton yang digunakan dibagian ini untuk memotivasi berbagai aspek teori konstitutif. Di bawah pembatasan tekanan yang rendah, beton berperilaku rapuh; mekanisme kegagalan utama adalah retak saat ditarik dan 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.

Concrete damage plasticity yang merupakan model material yang disediakan Abaqus membutuhkan beberapa fungsi material yang menunjukkan 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 faktor konstan b_c , dengan $0 < b_c < 1$. Nilai $c = 0,7$ sesuai dengan data eksperimen pengujian pada Gambar 2.7, parameter kerusakan tekan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).



Gambar 2.7 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tekan
 Sumber: Sinha, 1964

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E^{-1}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan : d_c = compression damage parameter,

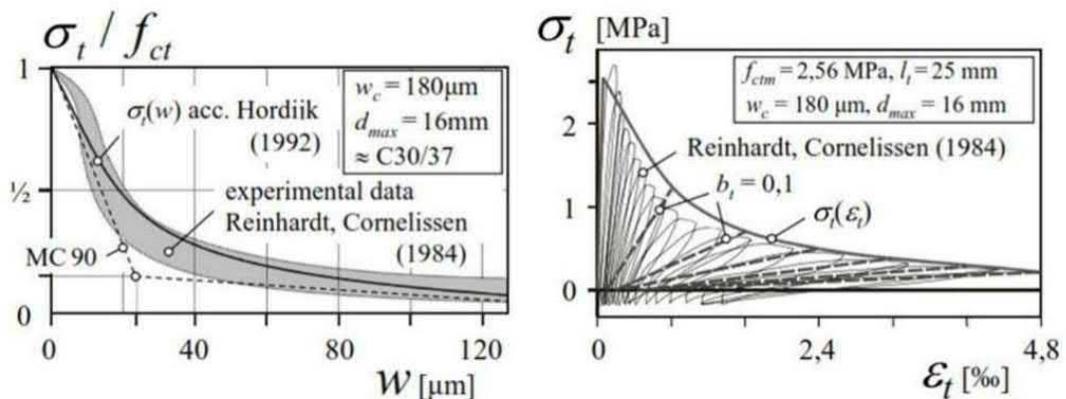
σ_c = tegangan tekan beton (MPa),

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 plastis dan inelastik pada saat beton mengalami tarik. Parameter $b_t = 0,1$ sesuai dengan hasil eksperimen pengujian tarik pada Gambar 2.18.



Gambar 2.8 Tegangan Regangan Eksperimen Pembebanan Tarik
 Sumber: Reinhardt & Cornelissen, 1964

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

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

Keterangan : $d_t =$ tension damage parameter,

$\sigma_t =$ tegangan tekan beton (MPa),

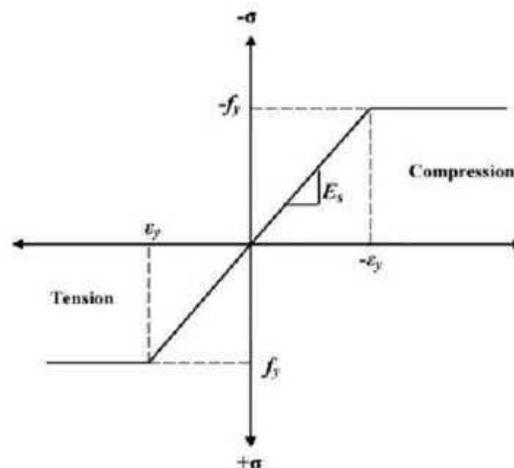
$E_t =$ modulus elastisitas beton (MPa),

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

$b_t =$ factor konstan pendekatan monotonic tekan.

b. Material Model Baja

Material baja tulangan dimodelkan sebagai *elastic perfectly plastic* seperti pada Gambar 2.9, dimana respon elastik linier dianggap terjadi sebelum leleh maupun pengerasan-regangan (*strain hardening*) tidak terjadi.



Gambar 2.9 Model Tegangan-Regangan Elastic Perfectly Plastic
Sumber: Abaqus Manual