



TESIS RC-142501

**ANALISA PARAMETER PERILAKU NON-LINIER
BETON TAK TERKEKANG DENGAN PEMBEBANAN
TRIAKSIAL MENGGUNAKAN PROGRAM BANTU
BERBASIS FINITE ELEMENT**

ALFIN SEPTYA NUGROHO

3113202016

DOSEN PEMBIMBING

DATA IRANATA , ST, MT, Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PERILAKU PARAMETER NON-LINIER BETON TAK
TERKEKANG DENGAN PEMBEBANAN TRIAKSIAL MENGGUNAKAN
PROGRAM BANTU BERBASIS FINITE ELEMENT**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ALFIN SEPTYA NUGROHO

NRP. 3113202016

Tanggal Ujian : 19 Juni 2015

Periode Wisuda : September 2015

Disetujui Oleh :



1. **Data Iranata, ST., MT., PhD**

(Pembimbing)

NIP. 198004302005011002



2. **Budi Suswanto, ST., MT., PhD**

(Penguji)

NIP. 197301281998021002



3. **Endah Wahyuni, ST., M.Sc., PhD**

(Penguji)

NIP. 197002011995122001



Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T

NIP. 19640405 199002 1 001



ANALISA PERILAKU PARAMETER NON-LINIER BETON TAK TERKEKANG DENGAN PEMBEBANAN TRIAKSIAL MENGGUNAKAN PROGRAM BANTU BERBASIS FINITE ELEMENT

Nama Mahasiswa : Alfin Septya Nugroho
NRP : 3113202016
Jurusan : Teknik Sipil FTSP - ITS
Dosen Pembimbing : Data Iranata, ST, MT, Ph.D

ABSTRAK

Beton merupakan material yang sering kita jumpai khususnya dalam bidang konstruksi. Beton merupakan material yang memiliki perilaku unik. Perilaku material dapat berupa sifat fisis ataupun mekanik, perilaku material didapatkan melalui hasil penelitian dilaboratorium. Dengan perkembangan teknologi dibidang Teknik Sipil penelitian dapat disederhanakan menjadi sebuah simulasi dengan menggunakan program bantu berbasis *Finite Element Method* (FEM), dimana salah satunya adalah Abaqus. Namun pada praktiknya dalam simulasi dibutuhkan parameter berupa data material sebagai input-nya. Untuk mendapatkan hasil perilaku yang sama antara benda uji dengan simulasi dibutuhkan parameter yang konvergen. Sedangkan untuk mendapatkan parameter yang konvergen diperlukan suatu pendekatan yang diwujudkan kedalam sebuah permodelan/simulasi.

Adapun parameter yang akan dianalisa merupakan parameter plastis CDP (*Concrete Damage Plasticity*) dan DPA (*Drucker Prager Analysis*). Sedangkan simulasi untuk pembebanan, bentuk benda uji, dan perletakkan mengacu pada hasil penelitian sebelumnya. Permodelan dilakukan menggunakan Abaqus, dengan benda uji (material *isotropic*) berbentuk kubus berdimensi 100x100x100mm. Pembebanan dilakukan menggunakan *pressure* pada bidang benda uji dengan 3 kondisi yaitu, uniaksial, biaksial, dan triaksial, sedangkan untuk perletakkan simulasi digunakan kombinasi pada kondisi batas translasi dan rotasi.

Dari hasil simulasi didapatkan parameter yang konvergen diantaranya, untuk parameter CDP digunakan nilai $\psi = 29^\circ$, eksentrisiti 0.1, $f_{co}/f_{cb}=1.16$, $K=0.778$, dan visco parameter=0 dengan menggunakan parameter perilaku tarik dan tekan beton. Sedangkan untuk parameter DPA digunakan parameter exponensial dengan nilai $a=0.394$, $b=1$, $pt=3.69$, $\psi = 28^\circ$, $\beta = 53^\circ$ dengan menggunakan submenu triaxial tes data. Tingkat akurasi pada simulasi dengan parameter CDP bergantung pada nilai dari parameter tegangan dan regangan uniaksial tarik dan tekan, sedangkan bila menggunakan parameter DPA bergantung pada data triaksial test hasil penelitian. Adapun untuk memudahkan perbandingan antara penelitian dengan simulasi (CDP dan DPA) digunakan tegangan von misses. Dari hasil simulasi didapatkan prosentase akurasi simulasi terhadap penelitian sebesar DPA 7.52% dan CDP 16.10%.

Kata Kunci : *Parameter, Triaksial, Abaqus, Concrete Damage Plasticity, Drucker-Prager Analysis.*

**PARAMETER ANALYSIS OF NON-LINIER BEHAVIOR UNCONFINED
CONCRETE BY TRIAXIAL LOADING USED SOFTWARE BASED
FINITE ELEMENT ANALYSIS**

Student Name : Alfin Septya Nugroho
NRP : 3113202016
Departement : Teknik Sipil FTSP - ITS
Lecturer : Data Iranata, ST, MT, Ph.D

ABSTRACT

Concrete is a material that is frequently encountered, especially in the construction field. Concrete is a material that has a unique behavior. Material behavior can be either mechanical or physical properties, material behavior obtained through the research laboratory. With the development of technology in civil engineering, research can be simplified into a simulation using Finite Element-based aid program Method (FEM), where one of them is Abaqus. However, in practice the required simulation parameters such as material data as its input. To get the same behavior between the test object with the necessary simulation parameters are converging. Meanwhile, to get the necessary parameters convergent an approach which is realized into a modeling/simulation.

The parameters that would be analyzed is the plastic parameter CDP (Concrete Damage Plasticity) and DPA (Drucker Prager Analysis). While simulations for loading, form the test object, and boundary condition reference to the results of previous studies. Modeling was performed using Abaqus, with specimen (isotropic material) cube-shaped dimensions 100x100x100mm. Imposition is done using a pressure on the field the test object with three conditions, namely, uniaxial, biaxial and triaxial, while for perletakkan simulation used a combination of the translational and rotational boundary conditions.

From the simulation results obtained convergent parameters including, for CDP parameter use the value $\psi = 29^\circ$, eksentrisiti 0.1, $f_{co} / f_{cb} = 1:16$, $K = 0778$, and visco parameter = 0 by using the parameters of tensile and compressive

behavior of concrete. As for the DPA parameters used exponential parameter with a value of $a = 0.394$, $b = 1$, $pt = 3.69$, $\psi = 28^\circ$, $\beta = 53^\circ$ using submenu triaxial test data. The level of accuracy in simulation with the parameters CDP depend on the value of the parameter stress and strain uniaxial tensile and compressive, whereas when using DPA parameters depend on the data triaxial test results of the research. As to facilitate comparison between studies with simulations (CDP and DPA) used voltage von misses. From the simulation results obtained percentage accuracy of the simulation to the research of DPA 7:52 CDP% and 16:10%.

Keywords : *Parameter, Triaxial, Abaqus, Concrete Damage Plasticity, Drucker-Prager Analysis.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena hanya berkat kasih karunia-Nya saja sehingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “**Analisa Parameter Prilaku Non-Linier Beton Tak Terkekang dengan Pembebanan Triaksial Menggunakan Program Bantu Berbasis Finite Element**”.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan Tesis ini penulis tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Allah SWT., atas segala rahmat dan karunia-Nya,
2. Ir. SAT Wisnubroto, MT dan drh Munayah, sebagai orangtua saya yang selalu memberi dukungan, doa, dan kasih sayang yang tak pernah ada putusnya,
3. Bapak Data Iranata, ST, MT, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang tidak hentinya memberikan pengarahan, dukungan, motivasi, dan ilmu yang tidak ternilai harganya.
4. Bapak Faimun, Ir., MSc., PhD. selaku dosen wali, atas segala arahan dan bimbingannya,
5. Budi Suswanto, ST., MT., PhD , Endah Wahyuni, ST., M.Sc., PhD, Pujo Aji, ST., MT., Dr. techn selaku dosen penguji Tesis saya.
6. Bapak Budi Suswanto, ST., MT., PhD selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil-FTSP ITS,
7. Endah Wahyuni, ST., M.Sc., PhD selaku Kaprodi Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil, FTSP ITS
8. Budhe Rr. Panca Widjayanti dan Pakdhe Suherdjati dan MbK drg.Pretty Sita Kusumawardhani yang selalu sabar dalam menerima saya dalam keluarga kecilnya. Dan selalu mendukung saya dan memberi saya tempat tinggal saat kuliah di ITS.
9. Pak Harjo, Pak Robin, Pak Jun, Pak Ridwan, Pak Damiri, Pak Put, Pak Yo dan staff Jurusan Teknik Sipil ITS yang selalu memudahkan saya dalam melakukan kegiatan akademik dan non akademik
10. Mbak Eva Wisna Agustin, Mas Teguh Ari Wibowo, Mas Agus, dan Mas Adi, dan adikku yang pintar Novita Riska Wardhani yang selalu mendukung saya,
11. Terimakasih atas bantuan orang yang spesial , yaitu Windy Ariesna Wardhani yang selalu mensupport saya dan membantu saya dalam kondisi apapun.
12. Teman-Teman S2 Struktur dan Non-Struktur, MbK niar, Asdam PhD, Dila, Laras, Fitri, Taufik, Resti, Hartana, Ikom, S52 (ryan Faza), Mas Faza, Mas Anggi, Mas Dafit, Tina, Ulum, Eric, Winda, MbK Daning, Mas Reza, Mas

- Rendy, Robi dan teman-teman lainnya yang membuat saya tetap bersemangat berkuliah.
13. Teman dan Sahabat saya Bachtiar Ryanto, Niko Puspa Wardhana, Iqbal Husein, Fitri , Hartana, dan teman-teman S-52 yang selalu mendukung dalam bentuk moral, doa, dan nasehat yang positif.
 14. Mbk Fitri Hardianti, Dedy Darmanto, Mas Gunawan, Mas Farid, Mas wahyu Candra, dan senior senior saya 2008 S51 yang telah mendukung saya dan memberi semangat dalam mengerjakan Skripsi ini.
 15. Halim, Rahmat, Amron, Giwa, dan adek-adek 2011 yang selalu mengejek saya dan memotivasi saya untuk maju mengerjakan Tesis ini hingga selesai,
 16. Terimakasih untuk adik-adik dan teman-teman Raditya (ditto), Alike, Bimo, Diki, Bayu, Teddy, Heri, Andro, dan lain-lian.
 17. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
 18. Dosen-dosen Teknik Sipil ITS atas semua ilmu yang telah diberikan dan tidak lelah mendidik kami sebagai mahasiswa Pasca Sarjana Teknik Sipil ITS.
 19. Teman-teman seperjuangan S-52 (2009), dan semua rekan mahasiswa Teknik Sipil ITS lainnya.
 20. Teman-teman S-53 dan S54 yang telah menemani saya dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan Tesis ini. Akhir kata semoga Tesis ini bermanfaat.

Surabaya, 22 Juni 2015

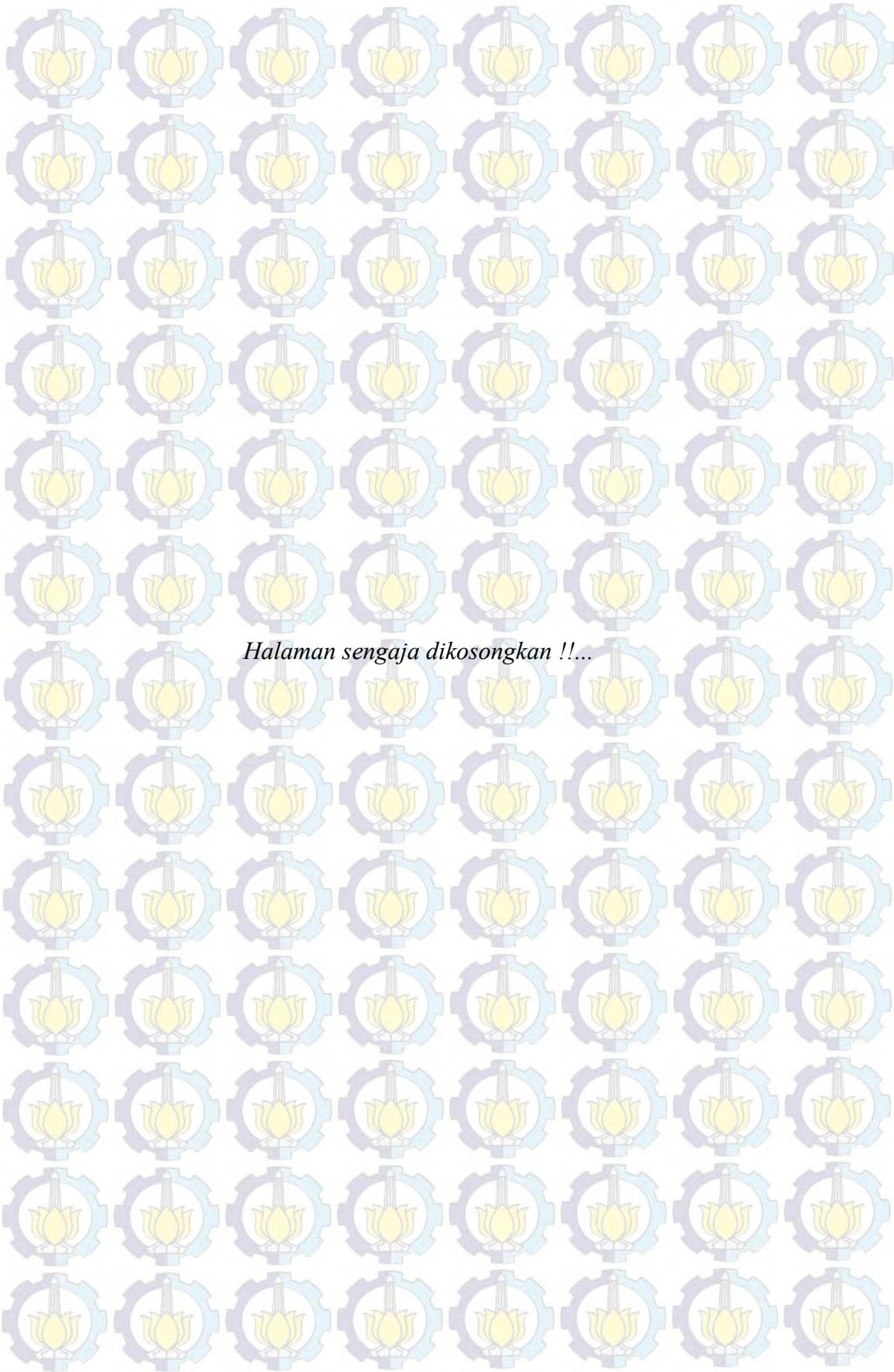
Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL | |
| LEMBAR PENGESAHAN | i |
| ABSTRAK | iii |
| ABSTRACT | v |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL | xix |
| DAFTAR NOTASI | xxi |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 23 |
| 1.1. Latar Belakang | 23 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 28 |
| 1.3. Tujuan | 28 |
| 1.4. Manfaat | 29 |
| 1.5. Batasan Masalah | 29 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 31 |
| 2.1. Karakteristik Elemen Beton | 31 |
| 2.1.1. Umum | 31 |
| 2.1.2. Kuat Tekan | 32 |
| 2.2. Finite Element Methode (FEM) | 34 |
| 2.2.1. Elastisitas, Keseimbangan, dan Kompatibilitas | 35 |
| 2.3. Teori Kegagalan | 39 |
| 2.3.1. Model Kegagalan Isotropik | 39 |

| | | |
|-----------------------|--|----|
| 2.3.2. | Kegagalan Dengan Teori Plastis..... | 40 |
| 2.3.3. | Teori Plastisitas Untuk Tegangan Von Missess | 40 |
| 2.3.4. | Kriteria Kegagalan Retak Untuk Elemen Non-Ortogonal..... | 41 |
| 2.3.5. | Kriteria Kegagalan Mohr Coulom untuk beton triaxial..... | 44 |
| 2.4 | Perilaku Kegagalan Beton | 45 |
| 2.4.1. | Perilaku Kegagalan Beton Tekan | 45 |
| 2.4.2. | Hubungan Kuat Tekan dan Tarik pada Beton | 47 |
| 2.4.3. | Curva Tegangan dan Regangan Beton Normal | 49 |
| 2.5 | Standart Tes Beton..... | 54 |
| 2.5.1. | Standar Tes Tekan Beton..... | 54 |
| 2.5.2. | Standar Tes Tarik Beton..... | 56 |
| 2.5.3. | Core Tes Beton | 58 |
| 2.6 | Perilaku Beton Dengan Beban Triaksial..... | 58 |
| 2.6.1. | Kekuatan Beton dengan Beban Biaxial dan Triaxial..... | 58 |
| 2.6.2. | Pembebanan Triaksial..... | 62 |
| 2.7 | Modulus Elastis Beton | 63 |
| BAB 3 METODOLOGI..... | | 67 |
| 3.1. | Gambaran Umum..... | 67 |
| 3.2. | Bagan Alur Metodologi | 68 |
| 3.3. | Uraian Bagan Alur Metodologi | 69 |
| 3.3.1. | Mulai..... | 69 |
| 3.3.2. | Studi Literatur..... | 69 |
| 3.3.3. | Analisa Dengan Program Bantu Finite Element (<i>Abaqus</i>)..... | 70 |
| 3.3.4. | Analisa Kondisi Batas | 70 |
| 3.3.5. | Analisa Plastisitas..... | 75 |
| 3.3.6. | RUN PROGRAM (Analisa Non-Linier)..... | 77 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.3.7. | Kesimpulan Simulasi | 92 |
| 3.4. | Studi Eksperimental Zhen-jun dan Song yu-pu..... | 93 |
| 3.4.1. | Review Penelitian..... | 93 |
| 3.4.2. | Penyelidikan Eksperimental..... | 95 |
| 3.4.3. | Peralatan Pembebanan | 96 |
| BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN..... | | 99 |
| 4.1. | Umum..... | 99 |
| 4.2. | Tahap Persiapan | 101 |
| 4.2.1. | Boundary Condition And Pressure Load | 104 |
| 4.3. | Permodelan Concrete Damage Plasticity (CDP)..... | 109 |
| 4.3.1. | Pendekatan Parameter Material..... | 111 |
| 4.3.2. | Analisa Dan Hasil CDP | 118 |
| 4.4. | Permodelan Drucker Prager Analysis | 120 |
| 4.4.1. | Pendekatan Parameter Material..... | 121 |
| 4.4.2. | Analisa Dan Hasil DPA | 128 |
| 4.5. | Summary Data Analysis..... | 141 |
| BAB 5 KESIMPULAN..... | | 143 |
| 5.1. | Kesimpulan..... | 143 |
| 5.2. | Saran..... | 144 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 145 |
| LAMPIRAN..... | | 151 |
| BIODATA PENULIS | | 167 |

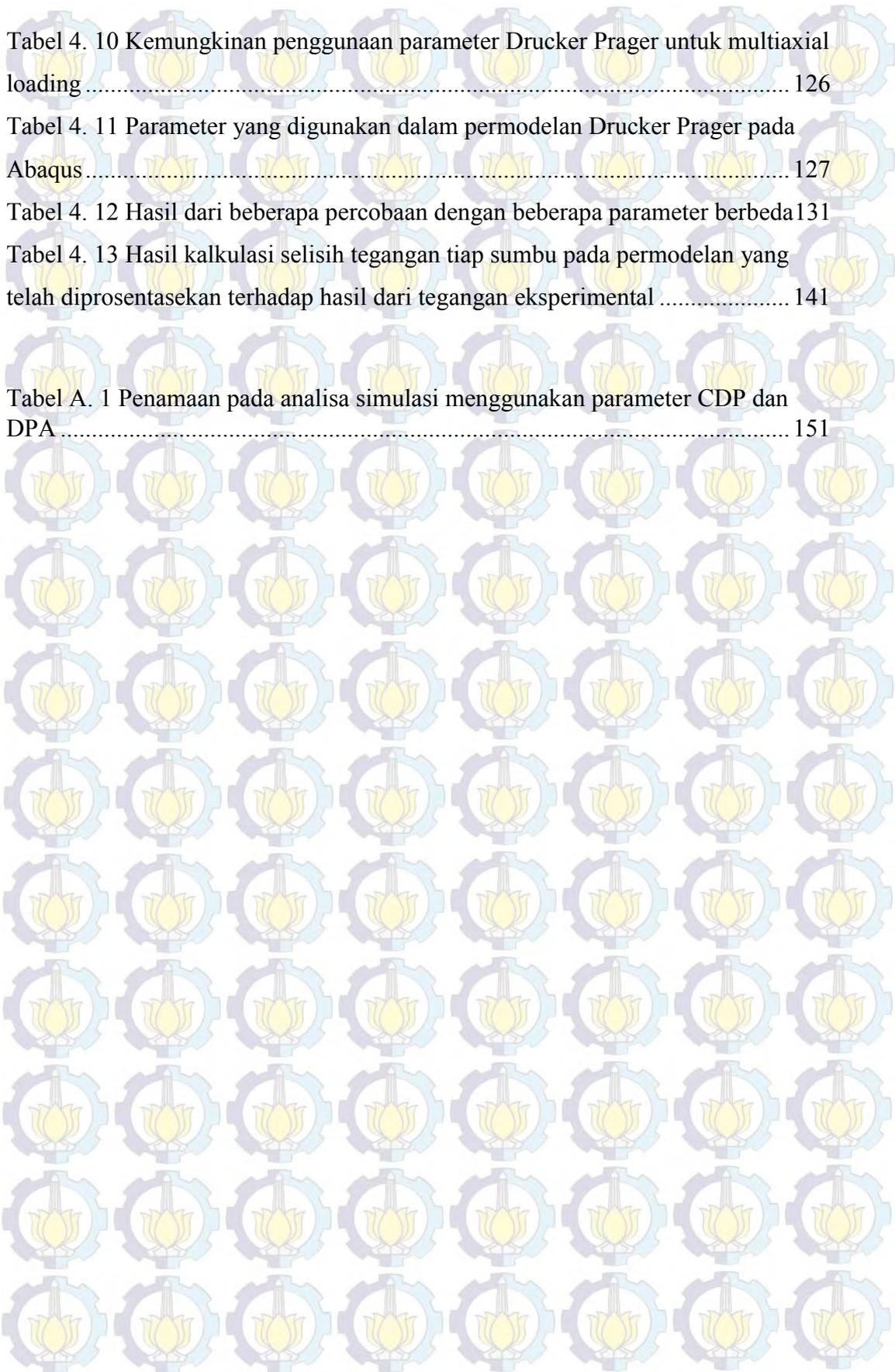


Halaman sengaja dikosongkan !!...

DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----|
| Tabel 2. 1 Tipe kondisi perletakkan yang umum dipakai pada balok, rangka bidang, dan portal bidang..... | 38 |
| Tabel 2. 2 Parameter konstitutif untuk permodelan material beton..... | 42 |
| Tabel 3. 1 Rasio tegangan pada hasil eksperimental..... | 74 |
| Tabel 3. 2 Nilai konstnta untuk mendapatkan nilai factor regresi linier a, b, dan c..... | 76 |
| Tabel 3. 3 Tabel penggunaan satuan pada Abaqus..... | 78 |
| Tabel 3. 4 Default parameter untuk model CDP..... | 81 |
| Tabel 3. 5 Material Propertis untuk bahan campuran beton dalam analisa Drucker-Prager..... | 84 |
| Tabel 3. 6 Perumusan untuk tegangan dan regangan plastis..... | 89 |
| Tabel 3. 7 Pengambilan nilai untuk parameter n..... | 91 |
| Tabel 3. 8 Hasil analisa eksperimental penelitian..... | 94 |
| Tabel 4. 1 Tabel Penamaan pada tiap permodelan pada Abaqus..... | 100 |
| Tabel 4. 2 Permodelan Perletakkan untuk benda uji 100x100x100mm terhadap sumbu x,y, dan z..... | 105 |
| Tabel 4. 3 Permodelan untuk pembebanan multiaksial pada permodelan..... | 108 |
| Tabel 4. 4 Nilai pembebanan untuk analisa CDP dan DPA terhadap factor stress ratio..... | 109 |
| Tabel 4. 5 Tabel Parameter pendekatan untuk CDP..... | 111 |
| Tabel 4. 6 Hasil perhitungan tegangan untuk bidang meridian..... | 113 |
| Tabel 4. 7 Hasil perhitungan pendekatan tegangan regangan untuk kondisi tension dan compression..... | 114 |
| Tabel 4. 8 Data parameter pendekatan untuk permodelan CDP pada pengujian permodelan pada Abaqus..... | 117 |
| Tabel 4. 9 Kalkulasi untuk parameter a,b, dan pt untuk Drucker Prager..... | 124 |

| | |
|---|-----|
| Tabel 4. 10 Kemungkinan penggunaan parameter Drucker Prager untuk multiaxial loading | 126 |
| Tabel 4. 11 Parameter yang digunakan dalam permodelan Drucker Prager pada Abaqus | 127 |
| Tabel 4. 12 Hasil dari beberapa percobaan dengan beberapa parameter berbeda | 131 |
| Tabel 4. 13 Hasil kalkulasi selisih tegangan tiap sumbu pada permodelan yang telah diprosentasekan terhadap hasil dari tegangan eksperimental | 141 |
| Tabel A. 1 Penamaan pada analisa simulasi menggunakan parameter CDP dan DPA | 151 |



DAFTAR GAMBAR

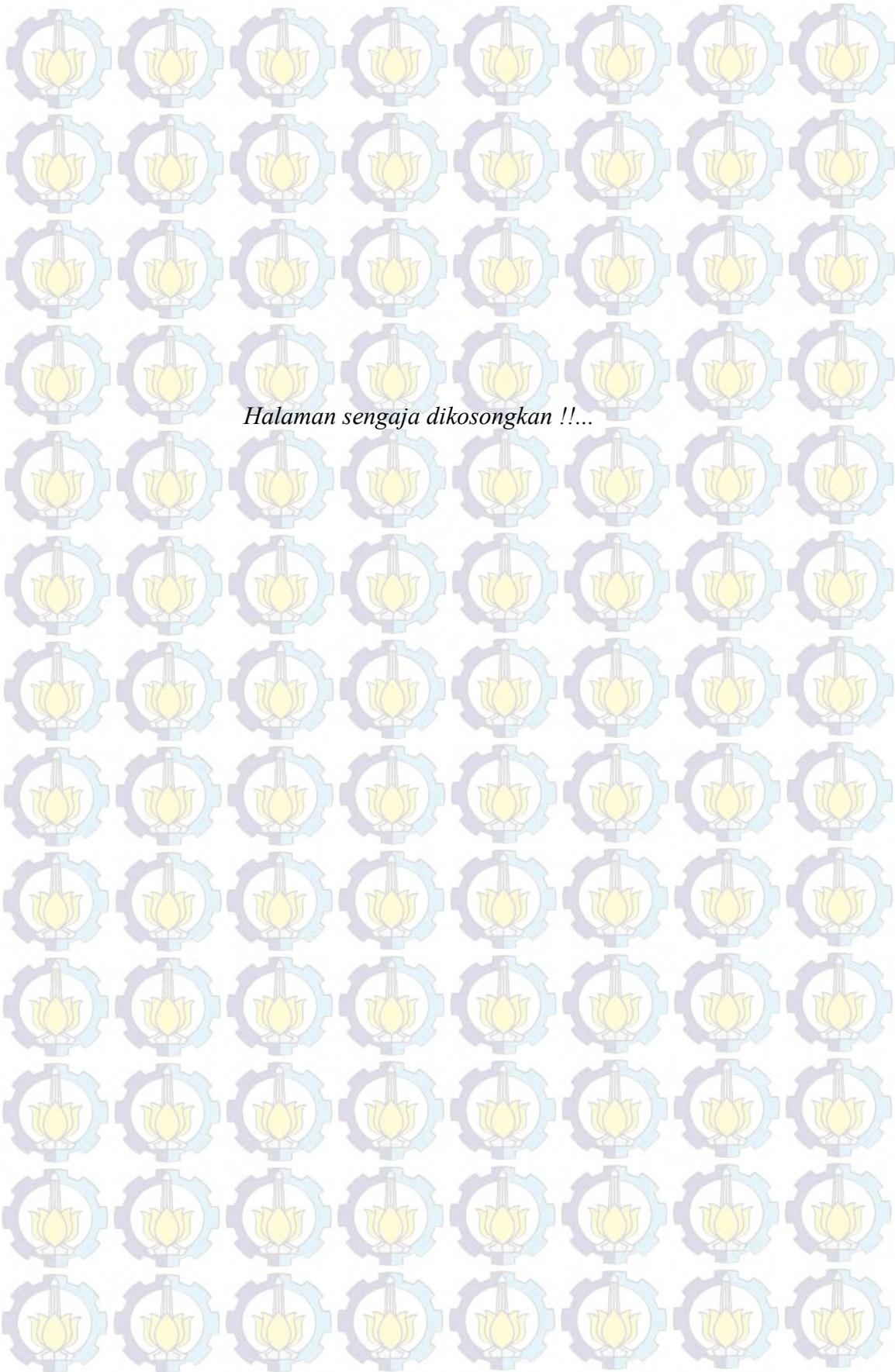
| | |
|---|----|
| Gambar 2. 1 Respon struktur beton bertulang (Wahjoedi 2011) | 32 |
| Gambar 2. 2 Kuat tekan benda uji kubus di laboratorium (Roosseno 1951) | 33 |
| Gambar 2. 3 Mode retak pada banyak arah..... | 42 |
| Gambar 2. 4 Hubungan tegangan dengan f_c beton (Launay dan Gachon 1971) . | 43 |
| Gambar 2. 5 Tipe kegagalan Mohr Coulom pada tekan permukaan triaxial beton untuk tegangan utama (Moran, 2011)..... | 44 |
| Gambar 2. 6 Tipe kegagalan Eksperimental pada tekan permukaan triaxial beton untuk tegangan utama (Moran,, 2011)..... | 45 |
| Gambar 2. 7 Grafik Hubungan tegangan regangan beton akibat beban uniaxial (James dan Macgregor, 2009)..... | 47 |
| Gambar 2. 8 Hubungan kuat tekan beton tarik dengan beton tekan (James dan Macgregor, 2009)..... | 48 |
| Gambar 2. 9 Tangen Modulus Elastis (James dan Macgregor, 2009) | 50 |
| Gambar 2. 10 Kurva umum tegangan dan regangan akibat beban tekan..... | 50 |
| Gambar 2. 11 Analisa tegangan dan regangan untuk beton normal (James dan Macgregor, 2009)..... | 51 |
| Gambar 2. 12 Kurva tegangan-regangan kuat tekan beton (Park & Paulay, 1974) | 52 |
| Gambar 2. 13 Contoh grafik tegangan-regangan kuat tekan beton..... | 53 |
| Gambar 2. 14 Efek temperature dan umur beton terhadap kuat tekan beton (semen tipe I, w/c 0.41 dan rongga 4.5 persen). (James dan Macgregor, 2009) . | 56 |
| Gambar 2. 15 Tes split silinder (James dan Macgregor, 2009) | 57 |
| Gambar 2. 16 Kodisi beban biaxial (James dan Macgregor, 2009)..... | 59 |
| Gambar 2. 17 Kekuatan dan model kegagalan beton tidak bertulang dengan mode uji beban biaxial (James dan Macgregor, 2009)..... | 60 |
| Gambar 2. 18 Tegangan akibat beban biaxial, yang mengakibatkan retak pada beton paralel terhadap arah tegangan tekan. (James dan Macgregor, 2009) | 61 |
| Gambar 2. 19 Efek dari penyebaran tegangan tarik terhadap kuat tekan dari retak beton yang terjadi (James dan Macgregor, 2009) | 61 |

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 20 Kurva tegangan dan regangan dari tekanan triaxial pada beton silinder tidak terkekang dengan $f'c$ 3600 psi. (James dan Macgregor, 2009)..... | 62 |
| Gambar 2. 21 Keruntuhan Mohr yang dibuat oleh beton yang di uji. (James dan Macgregor, 2009) | 63 |
| Gambar 2. 22 Hubungan tegangan-regangan beton dengan modulus elastisitas .. | 64 |
| Gambar 2. 23 Kurva tegangan-regangan kuat tarik beton (Prakash, dkk, 2011) .. | 66 |
| Gambar 3. 1 Alur Metodologi Penelitian | 68 |
| Gambar 3. 2 Geometrik data untuk benda uji simulasi dengan program bantu Abaqus | 71 |
| Gambar 3. 3 Boundary Condition dari permodelan yang akan dibuat dengan Abaqus | 73 |
| Gambar 3. 4 Perletakkan BC pada sisi elemen benda uji simulasi Abaqus | 74 |
| Gambar 3. 5 Parameter pada Abaqus untuk permodelan CDP (Concrete Damage Plasticity) | 79 |
| Gambar 3. 6 Permukaan Hyperbolic dari potensial plastis meridian pada bidang dengan eksentricity 0 (Kmiecik dan Kaminski,2001) | 80 |
| Gambar 3. 7 Model Drucker Prager dengan permukaan leleh bidang p-t..... | 85 |
| Gambar 3. 8 Parameter Drucker Prager Material pada menu Abaqus | 86 |
| Gambar 3. 9 Grafik nilai perbandingan dilatasi angel untuk permodelan (Jia dan Yu, 2011) | 87 |
| Gambar 3. 10 Grafik variasi friction angel (Jia dan Yu,, 2011)..... | 88 |
| Gambar 3. 11 Grafik tegangan dan regangan untuk model konstitutif (Taijun dan Thomas, 2001) | 90 |
| Gambar 3. 12 Grafik hubungan tegangan terhadap variasi temperature suhu ekstrem | 92 |
| Gambar 3. 13 Pola keretakan pada benda uji 100mm x100mm x100mm (Zhen dan Song, 2009)..... | 94 |
| Gambar 3. 14 Simulasi percobaan eksperimental (Zhen dan Song, 2009)..... | 96 |
| Gambar 3. 15 Alat untuk uji pembebanan triaksial pada beton kubus 100mm (Zhen dan Song , 2009)..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 3. 16 Proses pengujian benda uji beton 100 mm (Zhen dan Song , 2009). | 97 |
| Gambar 4. 1 Dekstop layar pada Abaqus 6.13 | 99 |
| Gambar 4. 2 Bentuk persegi pada permodelan Abaqus Part Solid Extrusion dengan Ukuran 100 | 101 |
| Gambar 4. 3 Hasil Meshing pada permodelan benda uji dengan berbagai bentuk meshing | 102 |
| Gambar 4. 4 (a) Submenu pada meshing untuk permodelan (b) Pengaturan untuk pebagian partisi pada Abaqus | 102 |
| Gambar 4. 5 Hasil meshing menggunakan pembagian persegi pada benda uji yang dimodelkan | 103 |
| Gambar 4. 6 Pembuatan set-surface baru untuk pembebanan displacement | 103 |
| Gambar 4. 7 Boundary Condition pada menu Abaqus | 104 |
| Gambar 4. 8 Permodelan pada eksperimental (Zhen-ju dan Song yu-pu 2009) | 105 |
| Gambar 4. 9 Cara membuat pembebanan dengan (pressure load) | 107 |
| Gambar 4. 10 Menu material untuk karakteristik plastis | 110 |
| Gambar 4. 11 Tampak menu pada concrete damage plasticity | 111 |
| Gambar 4. 12 Grafik bidang meridian untuk oktahedra dan tensil | 112 |
| Gambar 4. 13 Grafik hubungan tegangan regangan untuk kondisi compression | 115 |
| Gambar 4. 14 Grafik hubungan tegangan regangan untuk kondisi tension | 116 |
| Gambar 4. 15 Submenu pada Abaqus (Submenu pada Perilaku Beton Tekan). | 117 |
| Gambar 4. 16 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan CDP Compression (CDPX) | 118 |
| Gambar 4. 17 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan CDP Tension (CDPY) | 118 |
| Gambar 4. 18 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu xx pada permodelan biaxial CDP dengan ratio (0.05 ,0 ,-1) | 119 |
| Gambar 4. 19 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu yy pada permodelan biaxial CDP dengan ratio (0.05 ,0 ,-1) | 119 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 4. 20 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu $xx=zz$ pada permodelan triaxial CDP dengan ratio (1, -1, -1)..... | 120 |
| Gambar 4. 21 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu yy pada permodelan triaxial CDP dengan ratio (1, -1, -1)..... | 120 |
| Gambar 4. 22 Grafik parameter eksponen dan hidrostatis dari bidang p-q (6:10 Abaqus User Manual Vol. III)..... | 122 |
| Gambar 4. 23 Determinasi dari kegagalan geser (LH Han et al, 2008) | 123 |
| Gambar 4. 24 Grafik bidang p-q untuk pendefinisian tension dan compression | 124 |
| Gambar 4. 25 (a) Nilai untuk pendekatan parameter a dari eksponen linier (b) Strain rate untuk modeling pada $f'c$ 60.16 MPa..... | 125 |
| Gambar 4. 26 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan DPA Compression (DPAX) | 128 |
| Gambar 4. 27 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan DPA Tension (DPAY)..... | 128 |
| Gambar 4. 28 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu xx pada permodelan biaxial DPA dengan ratio (0.05, 0, -1) | 129 |
| Gambar 4. 29 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu yy pada permodelan biaxial DPA dengan ratio (0.05, 0, -1) | 129 |
| Gambar 4. 30 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu xx pada permodelan triaxial DPA dengan ratio (1, -1, -1) | 130 |
| Gambar 4. 31 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu yy pada permodelan triaxial DPA dengan ratio (1, -1, -1) | 130 |
| Gambar A.(a). 1 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPX | 151 |
| Gambar A.(a). 2 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPY | 152 |
| Gambar A.(a). 3 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY1..... | 152 |
| Gambar A.(a). 4 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY2..... | 153 |
| Gambar A.(a). 5 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY3..... | 153 |
| Gambar A.(a). 6 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY4..... | 154 |
| Gambar A.(a). 7 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY5..... | 154 |
| Gambar A.(a). 8 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ1 | 155 |

| | |
|---|-----|
| Gambar A.(a). 9 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ2..... | 155 |
| Gambar A.(a). 10 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ3..... | 156 |
| Gambar A.(a). 11 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ4..... | 156 |
| Gambar A.(a). 12 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ5..... | 157 |
| Gambar A.(a). 13 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ6..... | 157 |
| Gambar A.(a). 14 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ7..... | 158 |
| | |
| Gambar A.(b). 1 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAX..... | 159 |
| Gambar A.(b). 2 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAY..... | 159 |
| Gambar A.(b). 3 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY1..... | 160 |
| Gambar A.(b). 4 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY2..... | 160 |
| Gambar A.(b). 5 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY3..... | 161 |
| Gambar A.(b). 6 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY4..... | 161 |
| Gambar A.(b). 7 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY5..... | 162 |
| Gambar A.(b). 8 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ1..... | 162 |
| Gambar A.(b). 9 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ2..... | 163 |
| Gambar A.(b). 10 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ3..... | 163 |
| Gambar A.(b). 11 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ4..... | 164 |
| Gambar A.(b). 12 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ5..... | 164 |
| Gambar A.(b). 13 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ6..... | 165 |
| Gambar A.(b). 14 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ7..... | 165 |



Halaman sengaja dikosongkan !!...

DAFTAR NOTASI

$f'c$ = Kekuatan tekan beton (MPa)

P = Gaya tekan (N)

A = Luas penampang beton (mm^2)

E = Modulus Elastis (MPa)

G = Modulus Geser

σ_1 = Tegangan arah sumbu utama x

σ_2 = Tegangan arah sumbu utama y

σ_3 = Tegangan arah sumbu utama z

τ = Tegangan geser

ν = Poisson rasio elemen

γ = gamma elemen

ϵ = Regangan Elemen

a = konstanta Zhen-ju dan Song yu-pu

b = konstanta Zhen-ju dan Song yu-pu

c = konstanta Zhen-ju dan Song yu-pu

F_m = Gaya Momen

F = Gaya dalam (gaya lintang)

I = Momen Inersia Elemen (mm^4)

λ = konstanta bernilai 1.0 untuk kategori beton normal

f_r = modulus of rupture (psi)

$f'c$ = kuat tekan beton (psi)

ϵ_c = regangan beton di suatu titik yang ditentukan

ϵ_0 = regangan beton pada kondisi tegangan maksimum

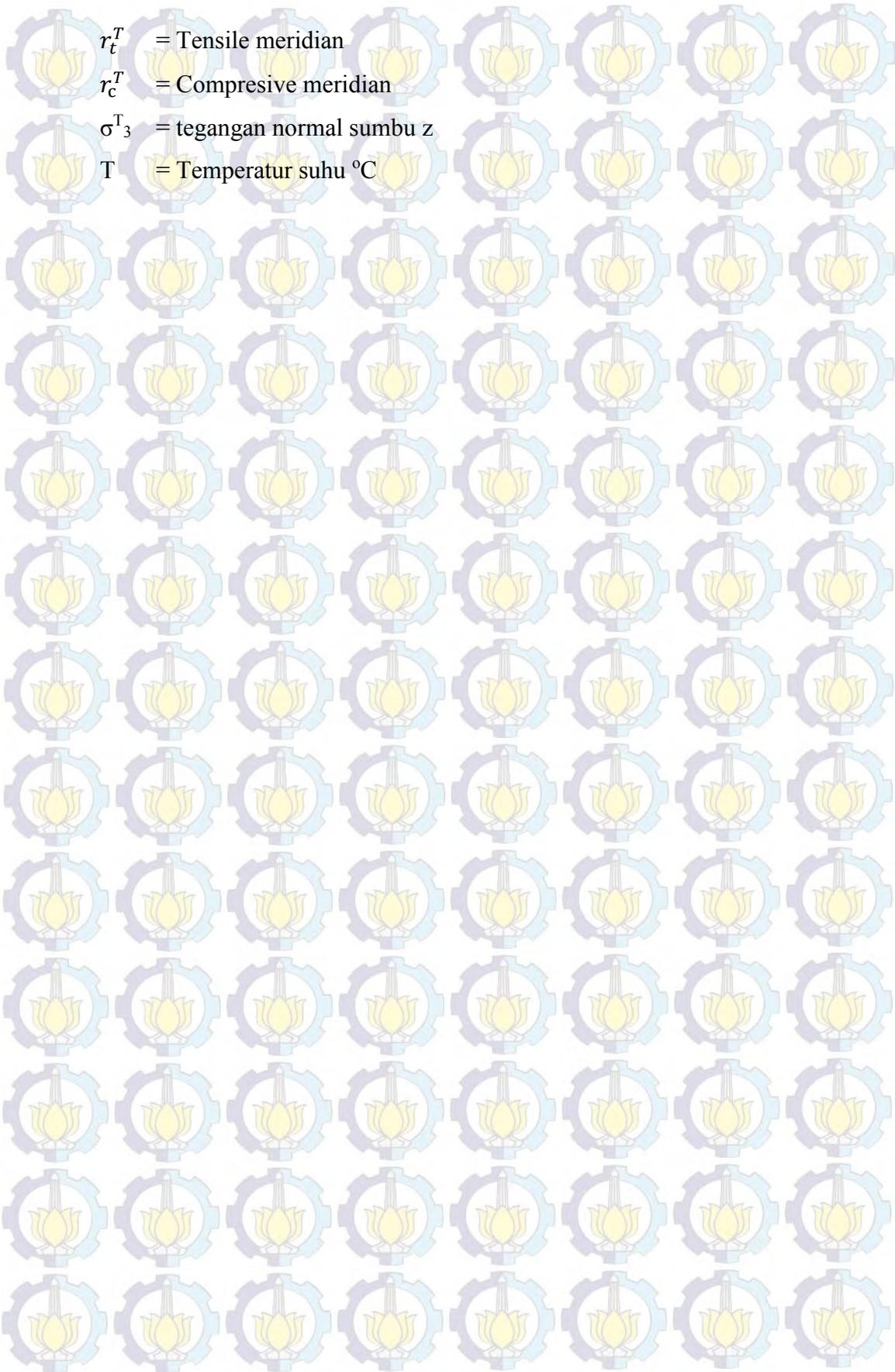
s = Standar deviasi benda uji beton

w_c = berat jenis beton (lb/ft^3)

σ_{oct}^T = tegangan normal oktahedral

σ_{octc}^T = tegangan tekan oktahedral

σ_{octt}^T = tegangan tarik oktahedral



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton merupakan bahan utama dalam konstruksi pada abad ini, serta menjadi material yang sangat berguna untuk berbagai tipe teknik dalam struktur bangunan. Beton memiliki keunggulan dari berbagai segi baik ekonomi, efisiensi, kekuatan, dan kekakuan membuat material ini menjadi sangat menarik untuk diaplikasikan pada struktur bentang panjang ataupun bangunan lainnya (Kwak dan Filippou, 1990). Umumnya beton diaplikasikan pada semua bangunan baik struktur umum ataupun khusus seperti, bendungan, jembatan, bangunan nuklir, bangunan penyimpan zat radio aktif, rumah presiden, dan lain-lain (Shiming dan Yupu, 2012). Praktek baton sebagai material bangunan khusus digunakan beton mutu tinggi sebagai pengganti atau alternatif dari beton normal tradisional. Beton mutu tinggi secara umum dibentuk untuk memiliki kekuatan yang tinggi, kecairan yang tinggi, serta penambahan admixture sejatinya dapat mengatur durabilitas beton. Kerapatan struktur mikro pada beton mutu tinggi juga mempengaruhi kekuatan beton dan mengurangi permeabilitas beton, dengan begitu kemampuan beton dalam menerima lentur (deformasi) sangat lemah atau dengan kata lain beton menjadi getas (Zhen-jun dan Yu-pu, 2009). Menurut (Kwak dan Filippou, 1990) dalam penggunaannya, beton harus memenuhi kondisi sebagai berikut :

- 1 Struktur yang menggunakan beton harus kuat dan aman. Dalam artian aplikasinya sangat fundamental dan harus memenuhi prinsip analisa kesetimbangan dan mekanika komponen material, sehingga bila terjadi runtuhnya akibat beban yang lebih dapat dihindari timbulnya kecelakaan.
- 2 Struktur harus memenuhi kekakuan dan tidak memiliki cacad. Perlunya kontrol lendutan pada saat beban layan terjadi dan meminimalkan terjadinya retak pada beton.

- 3 Struktur harus lebih ekonomis. Material yang digunakan harus di uji dan beton di rencanakan se-efisien mungkin sehingga dapat terlihat perbedaan harga satuan dari penggunaan beton dengan baja.

Penerapan beton pada struktur bangunan umumnya berupa elemen pelat, balok, kolom, dan pondasi. Pelat merupakan bagian pada struktur untuk menyalurkan beban mati dan hidup pada balok, namun ada juga pelat yang digunakan sebagai dinding. Pelat merupakan elemen yang unik dan dapat difungsikan dengan berbeda-beda. Balok merupakan elemen yang didesain menerima beban lentur dan geser sehingga timbul tegangan σ_1 dan σ_2 , sehingga beban yang dapat ditinjau yaitu biaxial (Zhang, 2002). Kolom merupakan bagian yang paling penting dalam desain struktur sehingga dalam SNI 2012 diatur mengenai "*strong coloumn weak beam*" dimana desain didasarkan dengan membuat struktur kolom lebih kuat dari struktur balok, sehingga bila terjadi beban yang melebihi beban rencana bangunan tidak langsung kolaps namun diharapkan masih dapat bertahan dan memeberikan waktu bagi manusia didalamnya untuk menyelamatkan diri. Kolom merupakan bagian yang menerima gaya yang berasal dari 3 arah, dengan kata lain kolom diharapkan mampu mendispersikan tegangan triaxial. Poer dan kolom merupakan bagian yang sama dimana kemungkinan elemen tersebut harus mampu menahan beban dari beberapa arah multiaxial.

(Linlin Shi, dkk 2013) menyebutkan bahwa kerusakan atau kegagalan suatu struktur timbul akibat beban gravitasi dan beban gempa baik secara statis maupun dinamis. Penelitian yang sering dilakukan untuk mengetahui perilaku beton adalah uniaxial, biaxial, triaxial dan multiaxial.

Perbedaan beban yang diberikan pada sebuah kasus membuat perbedaan pada perilaku beton dari segi tegangan, regangan, dan retak, baik retak mikro ataupun retak makro, keduanya merupakan prilaku yang sulit ditebak pada beton (V.T Tran, dkk 2010).

Perlu diketahui bahwa dengan analisa konvensional dan metode desain beton umumnya berdasarkan pada material properties pada beton dengan berdasarkan

pada kekuatan uniaxial, meskipun sejatinya kondisi uniaxial sangat jarang atau langka. Praktikanya, banyak struktur beton seperti dinding geser, kolom, dan reactor nuklir menerima tegangan dari berbagai arah atau multiaxial. Sehingga diperlukan penelitian non-linier yang berbasis finite elemen dalam menyelesaikan persoalan perilaku multiaxial pada beton tersebut (Zhen-jun dan Yu-pu, 2009).

Beberapa penelitian sudah dilakukan untuk menginvestigasi karakteristik kekuatan beton terhadap beban biaxial dan triaxial. Penelitian tersebut menyatakan bahwa tegangan dan regangan yang terjadi dapat mempengaruhi kekuatan beton terhadap beban tekan multiaxial. (Shiming dan Yupu, 2012) menyebutkan bahwa regangan dan tegangan dari beban biaxial lebih berbahaya bila dibandingkan dengan beban uniaxial. Sehingga bila diambil hipotesa dari pernyataan tersebut maka beban triaxial lebih berbahaya dibandingkan dengan beban biaxial ataupun uniaxial. Maka dalam kesempatan kali ini dilakukan rekayasa dalam memodelkan beton dengan beban triaxial.

Di Indonesia alat untuk melakukan pengujian beban triaxial ataupun multiaxial sangat langka dan bahkan sulit untuk didapatkan, untuk melakukan penelitian seputar beban multiaxial ataupun triaxial sangatlah sulit dilakukan. Sehingga perlu adanya rekayasa permodelan untuk memudahkan para praktisi ataupun pakar ahli dalam meneliti perilaku beton dengan beban triaxial. Dimana nantinya hasil dari rekayasa permodelan akan dibandingkan dengan hasil penelitian dari uji eksperimental yang telah ada.

Seiring dengan berkembangnya teknologi dalam berbagai bidang, teknologi dalam bidang komputer dan rekayasa (simulasi) juga terus berkembang dan semakin maju. Teknologi komputer dalam merekayasa permodelan telah banyak digunakan dalam bidang *engineering* contohnya teknik sipil, mesin, mikroelektronika, luar angkasa, penerbangan, *bioengineering*. Pendekatan simulasi atau permodelan banyak berguna dalam menghitung kasus-kasus kekuatan material, analisa thermal, kekuatan struktur bahkan mekanika fluida (Sylvia A, dkk 2013).

Selain kelebihan diatas dalam dunia teknik sipil pendekatan simulasi atau permodelan sangat banyak digunakan dalam bidang struktural. Hal ini berkaitan dengan perilaku material yang umumnya dibagi menjadi dua yaitu, perilaku elastic (linier) dan inelastik (non-linier). Perilaku elastic menunjukkan struktur akan berdeformasi jika diberi suatu pembebanan dan akan kembali ke posisi awal jika pembebanan tersebut dihilangkan. Sedangkan inelastik sendiri yaitu dimana keadaan perilaku hubungan deformasi dan pembebanan yang diberikan tidak proporsional (Sylvia A, dkk 2013).

Pemahaman mengenai perilaku sebuah elemen struktur pada umumnya diperoleh dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium. Uji eksperimental ini sangat penting untuk mendapatkan hasil gambaran mengenai respons struktur yang sesuai berdasarkan keadaan nyata. Namun hasil eksperimental ini mengalami kendala dalam segi waktu dan biaya karena untuk menghasilkan eksperimental yang akurat dibutuhkan data eksperimental yang sangat banyak sehingga membutuhkan benda uji yang banyak pula (Setiawan, 2008).

Suatu kesuksesan dari setiap pendekatan simulasi analisis tergantung pada keseimbangan antara akurasi dan praktik, dengan hambatan berupa parameter yang dibutuhkan dari permodelan, dan kurangnya informasi dari penelitian sebelumnya menjadi kesulitan tersendiri dalam menggabungkan data dengan meramalkan data yang belum ada kedalam permodelan. Untuk itu dalam memodelkan atau melakukan pendekatan melalui simulasi dibutuhkan kalibrasi angka yang akan dimasukkan kedalam permodelan yang berdasarkan angka minimum yang mungkin bisa dijadikan sebagai parameter sebuah material (Vassiles dan Andreas, 2007).

Dalam melakukan pendekatan atau simulasi yang dilakukan berbasis numerik ada bermacam-macam metode yang bisa digunakan seperti metode finite difference, finite volume, boundary elemen, dan metode elemen hingga. Diantara metode tersebut *metode elemen hingga* menjadi salah satu yang diterima dan dipakai secara luas dalam berbagai aplikasi ilmu teknik, termasuk dalam analisa elastik struktur (Sylvia A, dkk 2013).

Struktur yang terdiri dari elemen 2D atau 3D, yaitu pelat lentur, membrane, cangkang, dan solid, bentuk persamaan differensialnya jauh lebih kompleks sehingga solusi eksak untuk persamaan differensial parsial hanya terbatas pada tipe struktur dan beban yang sederhana. Salah satu pendekatan untuk memperoleh solusi numerik yang praktis adalah metode elem hingga. Metode ini tidak membutuhkan konsep teori dasar yang baru dalam mekanika struktur. Konsep dasar metode ini adalah bahwa *struktur kontinu* dapat dimodelisasi secara diskritisasi menjadi *struktur diskritis*. Struktur diskritis terbentuk dari gabungan elemen yang perilakunya diharapkan mewakili perilaku struktur kontinu. Perilaku masing-masing elemen digambarkan dengan fungsi pendekatan yang mewakili peralihan dan tegangan yang akhirnya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matriks (Katili, 2008).

Saat ini, semua dihadapkan pada kemudahan teknologi dengan perangkat lunak yang berbasis FEM. Program atau perangkat lunak tersebut dapat menyelesaikan persoalan struktur dengan input dari yang sederhana sampai dengan yang rumit. Namun kemudahan tersebut harus diimbangi dengan prinsip dasar dalam analisa struktur. Walaupun kemudahan dalam menganalisa dengan menggunakan program berbasis FEM, namun dalam penerapannya diperlukan jiwa *engineering* dalam memasukkan data material dan properti agar hasil yang diperoleh maksimal. Seorang pengguna *atau user* program berbasis FEM perlu mengerti kegunaan program dan bagaimana mengoperasikannya. Output atau hasil dari program yang digunakan akan berupa perilaku struktur ataupun elemen struktur, baik yang bersifat isotropic ataupun orthotropic. Perilaku-perilaku tersebut memerlukan strategi khusus baik dalam kondisi elastis linier maupun non-linier matriks (Katili, 2008).

Menimbang dan meninjau latar belakang diatas, maka akan dilakukan analisa dengan menggunakan program bantu perangkat lunak berbasis FEM (ABAQUS). Untuk mendapatkan parameter dan perilaku dari beton dengan beban triaxial, yang nantinya akan dibandingkan hasil penelitian secara permodelan perangkat lunak dengan permodelan eksperimental yang sudah ada. Program bantu ini dipilih karena memiliki kelebihan tersendiri dibanding

dengan program-program sejenis dimana tidak hanya dapat menganalisis struktur *frame* tetapi juga elemen-elemen material dari struktur tersebut. Selain itu program ini dapat memasukan beberapa data propertis material beton dengan cukup lengkap. Analisa yang akan dilakukan akan merujuk pada metode CDP (*Concrete Damage Plasticity*) dan DPA (*Drucker-Prager Analysis*) Sehingga diharapkan hasilnya akan mendekati dengan hasil eksperimental laboratorium.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat ditarik beberapa permasalahan yaitu :

1. Bagaimana menentukan parameter untuk permodelan elemen dari material beton yang akan dianalisa perilakunya?
2. Bagaimana melakukan analisa perilaku respon material dengan menggunakan metode CDP (*Concrete Damage Plasticity*)??
3. Bagaimana melakukan analisa perilaku respon material dengan menggunakan metode DPA (*Drucker Prager Analysis*)?
4. Bagaimana mengetahui perilaku benda uji hasil eksperimental dengan benda uji menggunakan simullasi dengan program bantu?

1.3 Tujuan

Dari rumusan masalah diatas maka akan dibuat beberapa tujuan untuk menyelesaikan masalah tersebut. Adapun tujuan dari penyusunan Tesis ini sebagai berikut:

1. Mendapatkan parameter yang cocok untuk permodelan di Abaqus.
2. Mendapatkan hasil analisa dengan menggunakan parameter CDP.
3. Mendapatkan hasil analisa dengan menggunakan parameter DPA
4. Menganalisa hasil analisa dengan program bantu FEM dengan membandingkan hasil uji eksperimental.

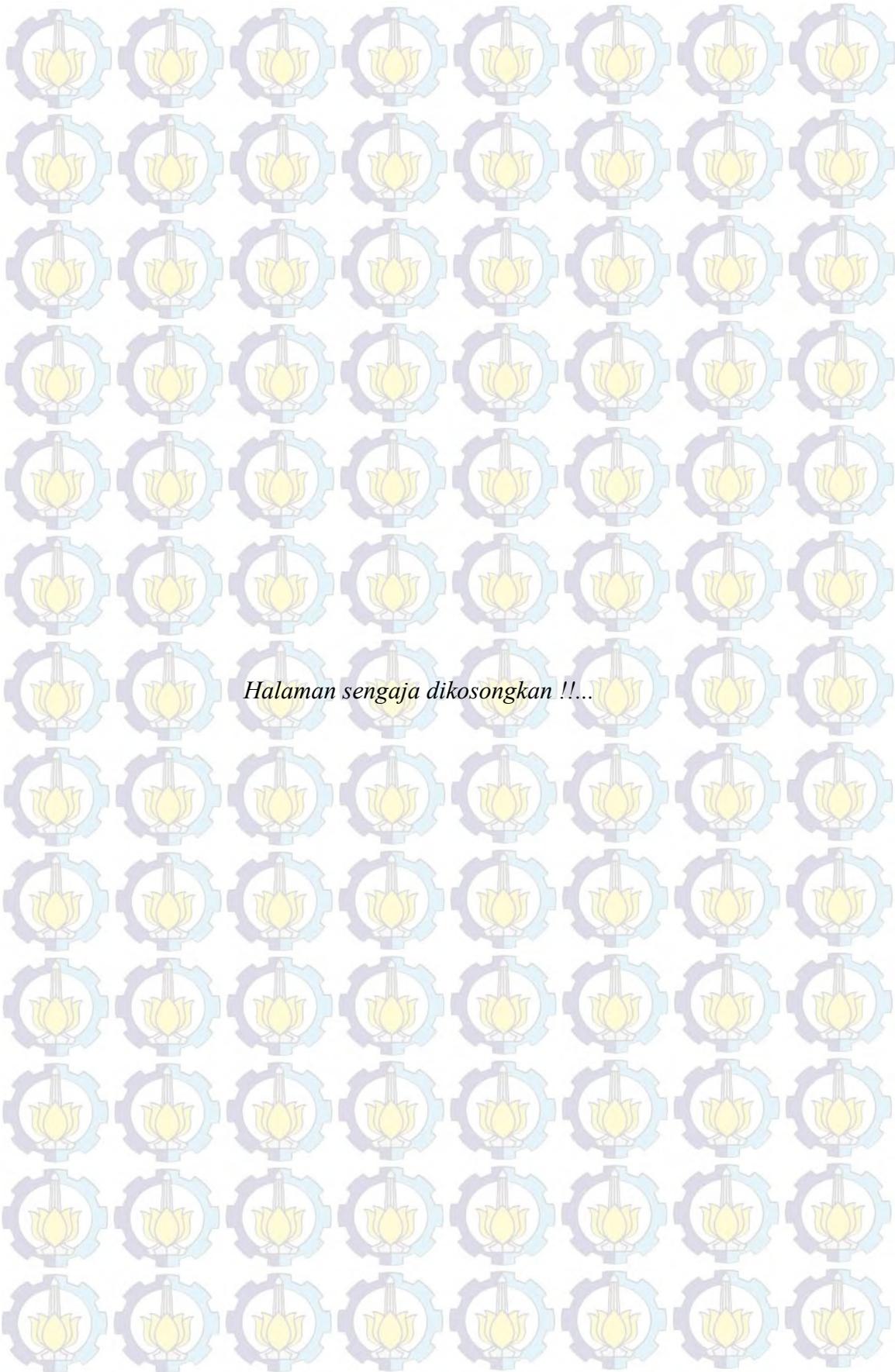
1.4 Manfaat

Dengan mendapatkan model analitis *finite elemen* diharapkan dapat merepresentasikan perilaku non-linier material beton yang terjadi dilapangan sehingga dapat dijadikan sarana dalam mengetahui perilaku struktur beton lebih detail. Diharapkan dengan simulasi ini didapatkan parameter yang baik untuk permodelan menggunakan Abaqus.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menghindari timbulnya penyimpangan permasalahan yang meluas dalam tesis ini, maka diperlukan batasan masalah dalam pembuatan diantaranya :

1. Material beton yang dimodelkan adalah spesimen beton dengan ukuran 100x100x100 mm dengan menggunakan satuan akan mengikuti satuan Standart Internasional (SI),
2. Material properties, pembebanan, dan kondisi batas untuk permodelan yang digunakan berasal dari penelitian eksperimental He Zhen-jun dan Song Yu-pu, 2009,
3. Data eksperimental yang digunakan sebagai pembanding hasil analisa dengan program bantu FEM.
4. Parameter yang digunakan merupakan pendekatan untuk permodelan, bila terjadi perbedaan dari hasil eksperimental dan hasil analisa Abaqus akan dilakukan pendekatan terhadap parameter awal.



Halaman sengaja dikosongkan !!...

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

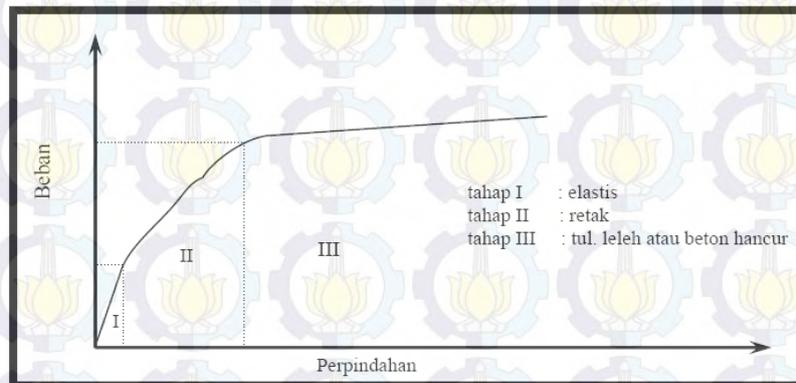
2.1 Karakteristik Elemen Beton

2.1.1. Umum

Beton terbuat dari campuran beberapa material alam seperti semen, agregat halus dan agregat kasar, adanya beberapa macam material tersebut membuat sifat beton menjadi heterogen dan propertis mekaniknya menyebar lebih luas hal tersebut menjadikan perilaku beton sukar untuk didefinisikan. Namun dalam tahap analisis dan desain beton sering dianggap sebagai material homogen dalam pengertian makroskopik. (Nawy, Edward 1985) membagi properties material beton menjadi dua bagian yaitu jangka pendek dan jangka panjang. Kuat tekan, kuat tarik, kuat geser dan modulus elastisitas beton termasuk dalam propertis material beton dalam jangka pendek, sedang rangkakan dan susut dimasukkan dalam jangka panjang. Bentuk respon struktur beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 2.1, dimana bentuk linier terjadi pada tahap awal pembebanan sampai terbentuknya retak pertama kali, setelah terjadi retak hubungan beban perpindahan menjadi *non linear*. (Chen, 1982) dan (Kwak, 1990) membagi respon struktur beton bertulang menjadi tiga tahap, yaitu : tahap elastis (*uncrack*), perambatan retak (*crack propagation*) dan tahap dimana tulangan leleh atau terjadi kehancuran beton pada daerah tekan. Perilaku non linier setelah retak juga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti :

- a. Keretakan beton didaerah tarik dan tulangan mengalami leleh atau beton pecah (*crushing*) pada daerah desak
- b. *Bond-slip* antara tulangan baja dan beton disekitarnya
- c. Ikatan antar agregat pembentuk beton
- d. *Dowel action* dari tulangan yang melintas disekitar retak.
- e. Perilaku sebagai fungsi waktu, misalnya *creep*, *shrinkage* dan variasi temperatur juga menyumbang perilaku non-linier.

- f. Hubungan konstitutif tegangan-regangan beton yang memang nonlinier dan berbeda antar kondisi tarik dan tekan.



Gambar 2. 1 Respon struktur beton bertulang (Wahjoedi 2011)

2.1.2. Kuat Tekan

Menurut SNI 03-1974-1990 yang dimaksudkan dengan kuat tekan beton adalah besarnya beban persatuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin uji tekan (Suarnita 2010). Beton yang baik adalah jika beton tersebut memiliki kuat tekan tinggi. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa mutu beton ditinjau hanya dari kuat tekannya saja (Tjokrodimulyo 1996), kuat hancur antara 20 sampai dengan 50 N/mm² pada umur 28 hari bisa diperoleh di lapangan bila pengawasan pekerjaan baik.

Kekuatan tekan beton akan bertambah dengan naiknya umur beton, dimana kekuatan tekan beton akan naik secara cepat (*linier*) sampai umur 28 hari tetapi setelah itu kenaikannya kecil. Kekuatan tekan rencana beton dihitung pada umur 28 hari. Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Kekuatan tekan beton dirumuskan sebagai berikut :

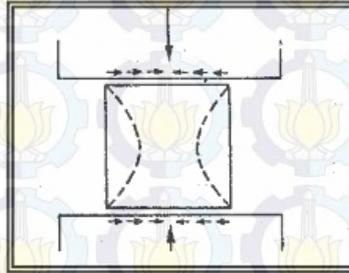
$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Dimana :

f'_c = Kekuatan tekan beton (MPa)

P = Gaya tekan (N)

A = Luas penampang beton (mm²)



Gambar 2. 2 Kuat tekan benda uji kubus di laboratorium (Roosseno 1951)

Gambar 2.2. Menunjukkan bahwa dalam percobaan uji tekan terhadap kubus, terlihat bahwa di sisi-sisi tertekan timbul tegangan geser berarah ke dalam (Roosseno, 1951). Untuk mendapatkan keadaan seperti di lapangan, maka dilakukan pengujian kuat tekan dengan menggunakan balok dengan ukuran tinggi tiga kali (3x) sisi penampang (Roosseno 1951).

Nilai-nilai kuat tekan beton seperti yang diperoleh dari hasil pengujian sangat dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk dari elemen uji dan cara pembebanannya. Di banyak Negara, spesimen uji yang digunakan adalah kubus berisi 200 mm. untuk beton-beton uji yang sama, pengujian terhadap silinder-silinder 150 mm x 300 mm menghasilkan kuat tekan yang besarnya hanya sekitar 80% dari nilai yang diperoleh dari pengujian beton uji kubus (McCromac 2003).

Perilaku hubungan tegangan-regangan beton berbeda untuk kondisi tekan dan tarik, untuk itu hubungan konstitutif tegangan-regangan dibuat secara terpisah. Hubungan tegangan-regangan pada arah utama tekan mendekati respon elastis linier sampai dengan sekitar 30 % dari kuat tekannya, setelah itu berlaku hubungan non linier sampai mencapai kuat tekan beton. Kemudian

bentuk kurva akan turun sampai dengan nol, hal ini menunjukkan berkurangnya tegangan sampai beton runtuh yang ditandai oleh pecahnya beton (Kwak dan Filippou 1990).

2.2 Finite Element Methode (FEM)

Analisa menggunakan metode elemen hingga adalah metode yang digunakan untuk menyelesaikan suatu kasus terhadap perilaku elemen dengan menggunakan perhitungan numerik. Perilaku elemen tersebut digambarkan dengan distribusi tegangan regangan berupa numerikal yang dideskripsikan dengan persamaan diferensial, integral formula dan persamaan polynomial. Elemen yang dianalisa dihubungkan dengan *nodes*, dari *nodes* tersebut terhubung sebuah garis dan membentuk sebuah bidang (*mesh*) yang nantinya akan di *assembly*. Umumnya *mesh* dibagi menjadi beberapa bentuk diantaranya segitiga dengan 3 nodes (triangular) dan segiempat dengan 4 nodes (rectangular). Dimana komponen elemen tersebut digunakan karakteristik material berupa isotropic, elemen tersebut juga dikondisikan dengan perletakkan berupa *boundary condition* yang didefinisikan dengan (u_1 , u_2 , dan u_3) yang merepresentasikan perpindahan *translation* sumbu dari (x, y, z) sedangkan (v_1 , v_2 , v_3) yang merepresentasikan *rotation* pada sumbu (x, y, z).

Permodelan. Metode analisa ini diaplikasikan untuk memodelkan masalah yang ada di lapangan kedalam sebuah simulasi. Meskipun dapat dilakukan dengan menggunakan eksperimen laboratorium, namun simulasi dapat digunakan untuk mempermudah. Simulasi berupa bentuk geometrik kedalam bentuk matematika. Perumusan matematika didasarkan oleh homogenitas elemen, isotropic, dan konstanta dari material properties. Setelah analisa lengkap, maka akan keluar hasil analisa berupa tegangan, regangan, perpindahan, dan perilaku lainnya. Meskipun terlihat simpel, kemungkinan terdapat eror dalam praktiknya saat memasukkan data awal. Dalam menggunakan FEA software umumnya memerlukan langkah-langkah seperti dibawah ini (Robert D Cook dkk, 1974).

1. *Tahap persiapan* : memasukkan data geometri, material propertis, beban, dan jenis perletakkan. Software dapat secara otomatis menyiapkan *mesh* untuk elemen hingga, tetapi data tersebut harus disesuaikan dengan perilaku yang diinginkan baik dari sumbu arah nilai positif dan negative. Semua harus dalam kondisi benar agar saat proses berlangsung tidak terdapat eror.
2. *Analisa numeric* : otomatis mengenerat matrix dari perilaku yang sudah kita deskripsikan sebelumnya. Perhitungan dilakukan dengan metode linier, nonlinier, statik dan dinamik.
3. *Hasi proses* : metode elemen hingga menghasilkan solusi dalam bentuk angka dan grafik, dari analisa tegangan dari berbagai bentuk yang telah kita modelkan.

Dalam mekanika struktur tipe dari non-linier meliputi

1. Material nonlinier, dimana material propertis adalah fungsi dari tegangan dan regangan. Contohnya meliputi nonlinier elastis, plastis, dan creep
2. Contact nonlinier, dimana bagian diantara elemen yang satu dengan yang lainnya sehingga terjadi ikatan antar elemen tersebut, sehingga nantinya kontak area akan menjadi kontak gaya pada bagian tersebut yang menyebabkan gesekan antar elemen yang berhubungan.
3. Geometric elemen, dimana deformasi adalah yang paling berpengaruh terhadap perilaku elemen pada persamaan equilibrium yang akan di proses untuk menghasilkan dformasi bentuk struktur. Beban yang di kenakan akan menghasilkan gaya sesuai dari arah dan akan meningkat sampai pada kondisi puncak atau failure atau leleh.

Dalam penerapan permodelan menggunakan nonlinier, deformasi dan gaya-gaya pada elemen bergantung pada kekakuan elemen, pada simulasi kekakuan pada elemen di buat dalam bentuk persamaan matriks $[K]$.

2.2.1. Elastisitas, Keseimbangan, dan Kompatibilitas

Untuk mendapatkan solusi yang tepat pada masalah-masalah struktur linier elastis harus memenuhi tiga kondisi, yaitu elastis, keseimbangan, dan

kompatibilitas. Ketiga kondisi ini merupakan dasar analisis yang penting dan harus benar-benar dipahami (Katili, 2008).

Kondisi elastis. Kondisi ini menyatakan bahwa pada setiap titik pada sebuah struktur, tegangan yang terjadi berbanding lurus dengan regangannya. Kondisi ini dinyatakan dalam persamaan tegangan-regangan atau dikenal dengan persamaan konstitutif yang berlaku pada material struktur. Pada kasus struktur solid 3D analisis secara linier elastis terdapat enam komponen tegangan dan sekaligus pula terdapat enam komponen regangan. Untuk kasus satu dimensi hubungan antara tegangan-regangan ditentukan dengan Modulus Elastis, sedangkan untuk tegangan dan regangan normal bergantung pada Modulus Geser. Dalam tegangan dan regangan dikenal hukum Hooke yang dituangkan dalam persamaan **Persamaan (2.2) dan (2.3)**

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (2.2)$$

$$\frac{\tau}{\gamma} = G \quad (2.3)$$

Perbandingan antara modulus geser dengan modulus elastis dihubungkan oleh suatu angka perbandingan, yaitu Poisson Ratio ν yaitu suatu perbandingan antara regangan lateral dengan regangan aksialnya.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{aksial}} \quad (2.4)$$

Sedangkan hubungan E dengan ν dirumuskan dengan persamaan Eq 2.5

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.5)$$

Kondisi keseimbangan. Kondisi ini harus terpenuhi untuk sebagian dan seluruh bagian dari struktur, yaitu keseimbangan antara gaya-gaya internal dan beban-beban, baik pada elemen ataupun pada struktur. Kondisi kesetimbangan untuk kasus dua dimensi harus memenuhi persamaan kesetimbangan **Persamaan (2.6)**.

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0 \quad \sum F_{mx} = 0 \\ \sum F_{my} = 0 \quad \sum F_{mz} = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dimana penjumlahan semua gaya F tiap arah sumbu x, y, dan z adalah sama dengan nol dan penjumlahan semua momen Fm terhadap sumbu x,y dan z sama dengan nol baik untuk setiap nodal, setiap elemen, ataupun pada sumbu tumpuan struktur (Katili , 2008).

Kondisi kompatibilitas. Kondisi ini mengisyaratkan bahwa peralihan untuk semua titik pada suatu struktur yang terbebani harus kompatibel dengan seluruh peralihan pada struktur. Peralihan tersebut harus kontinu sehingga struktur masih tetap bersatu akibat pembebanan. Interpretasi dari pernyataan ini tidak terlepas dari kondisi batas struktur yang telah ditentukan, sebagai contoh pada kasus ini ditetapkan bahwa seluruh peralihan pada tumpuan adalah kompatibel dengan peralihan pada kondisi batas struktur (Katili , 2008).

Dengan demikian, pada saat struktur dibagi-bagi menjadi elemen-elemen, kondisi kompatibilitas memerlukan beberapa persyaratan sebagai berikut

1. Peralihan nodal yang merupakan pertemuan beberapa elemen haruslah kontinu dan pergerakannya selalu bersama
2. Peralihan nodal struktur haruslah konsisten dengan perilaku nodal yang ditetapkan
3. Peralihan nodal pada tumpuan harus memenuhi kondisi batas dari peralihan yang telah ditetapkan sebelumnya.

Jadi pada prinsipnya, kondisi kompatibilitas mempunyai ketentuan-ketentuan yang harus terpenuhi pada suatu analisis struktur, yaitu sebagai berikut

1. Seluruh elemen struktur yang terangkai pada suatu nodal-nodal sebelum dan setelah pembebanan atau setelah berdeformasi akibat beban harus tetap terangkai pada nodal yang sama

- Nodal-nodal pada semua elemen yang terangkai oleh suatu nodal kaku harus mengalami peralihan translasi dan rotasi yang sama.

Kondisi batas. Untuk memenuhi suatu kondisi batas yang diminta dalam suatu analisis struktur, secara tidak langsung adalah memenuhi kondisi keseimbangan dan kompatibilitas pada nodalstruktur, pada setiap elemen dan pada perletakkan. Pada analisa struktur perlu menspesifikasikan kondisi batas yang ada sesuai dengan masalah yang akan dianalisa, penjelasan ini dapat dijabarkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2. 1 Tipe kondisi perletakkan yang umum dipakai pada balok, rangka bidang, dan portal bidang.

| Perletakan | Deskripsi | <i>dk Translasi - Rotasi</i> | <i>Reaksi Perletakan</i> |
|---|-----------|------------------------------|--------------------------|
| 1. Rebar Tidak ada gaya Tidak ada momen | | | |
| 2. Sendi | | | |
| 3. Sendi rol vertikal | | | |
| 4. Sendi rol horisontal | | | |
| 5. Jepit | | | |
| 6. Jepit rol vertikal | | | |

Sumber : (Katili , 2008)

2.3 Teori Kegagalan

Perkembangan dari evolusi pengetahuan mengenai ratak mikro dan inti nucleus beton dan perkembangan dari rongga udara dalam beton mewakili dari model kegagalan beton yang berasal dari setting variable dari perilaku plastis dan elastis beton di level makroskopik. Dalam praktiknya, model dari kegagalan sangat mirip dengan teori plastisitas. Pada semua model untuk kegagalan beton, proses beban unloading meninggalkan gaya sisa atau residu tanpa memperhatikan derajat kerusakan tanpa memperhatikan beban unloading tersebut. Ini berarti tidak ada deformasi plastis, yang mana agaknya kurang realistis (Karihaloo, 2003 dalam Richard, 2006).

Didalam model kegagalan jumlah hubungan tegangan regangan harus mengikuti bentuk persamaan **Persamaan 2.7**,

$$\sigma = D^s : \varepsilon \quad (2.7)$$

Dimana σ adalah tegangan tensor, ε adalah regangan tensor. Kekakuan elemen tensor D^s dari kegagalan material berpengaruh terhadap variable angka dari segi scalar, vector, dan tensor.

2.3.1. Model Kegagalan Isotropik

Dalam penelitian Richard, 2006 untuk kasus kegagalan isotropic, tegangan dan regangan dari persamaan (**Persamaan 2.7**) menunjukkan geser inisial modulus geser dan inisial modulus bulk diturunkan dengan memisahkan kegagalan dari variable scalar d_1 dan d_2 . Penyederhanaan dari model isotropic dapat di buat dengan mengasumsikan bahwa penurunan dari kekakuan geser $(1 - d_1)G$ dan modulus bulk $(1 - d_2)K$. Bila $d \equiv d_1 = d_2$. Ini berarti bahwa Poisson Ration dari material adalah tetap tidak berubah selama gaya yang diberikan terus meningkat dan dapat diwakilkan dengan persamaan (**Persamaan 2.8**)

$$\sigma = (1 - d)D^0 : \varepsilon \quad (2.8)$$

Dimana variable gaya d terus meningkat dari nol pada saat belum menerima beban menuju kondisi leleh. Tensor kekakuan D^0

merepresentasikan kekakuan dari material tersebut (de Borst, 2002, dalam Richard, 2006).

2.3.2. Kegagalan Dengan Teori Plastis

Kegagalan regangan pada persamaan (**Persamaan 2.8**) bukan persamaan yang permanen. Kondisi persamaan (**Persamaan 2.8**) dapat menjadi kembali pulih saat beban unloading selama masih dalam batas elastis. Seperti yang diketahui bahwa untuk beton setelah unloading dalam kondisi sebelum plastis regangan masih dalam kondisi dapat kembali seperti semula, setelah retak awal saat inisial. Karena mekanisme kegagalan dari beton saat tekan dan juga tarik untuk untuk tahap pengekanan yang rendah dihubungkan dengan degradasi kekakuan dengan deformasi inelastic, karakter model bergantung pada beban dan plastisitas yang dimiliki. (Richard, 2006).

Kondisi yang umum untuk hubungan antara kegagalan dengan plastisitas adalah skala kerusakan yang membentuk kondisi elasto plastic yang berdasarkan pada tegangan efektif yang di buat oleh (Ju ,1989 dalam Richard 2006) yang diwakili dengan persamaan (**Persamaan 2.9**)

$$\sigma = (1 - d)D^0: (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (2. 9)$$

Didasarkan pada konsep tegangan efektif pada persamaan leleh plastis diformulakan kedalam persamaan (**Persamaan 2.10**)

$$\sigma = \frac{\sigma}{1-d} \quad (2. 10)$$

2.3.3. Teori Plastisitas Untuk Tegangan Von Missess

Dalam buku *Cook*, Von mises diartikan sebagai plastisitas (F=Q) yang mana leleh adalah kondisi akhir ketika von mises terjadi, atau tegangan efektif dicapai pada saat batas nilai dimana nilainya dilambangkan sebagai σ_e pada persamaan (**Persamaan 2.11**).

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2. 11)$$

Dengan

$$F = [(\sigma - \alpha)^2]^{\frac{1}{2}} - \sigma\gamma \quad (2.12)$$

Dimana α adalah koefisien suhu, σ adalah tegangan, F adalah gaya batang per unit volume, nilai tegangan didapat dari perumusan (**Persamaan 2.13**).

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{My}{I} \quad (2.13)$$

Dimana P adalah gaya yang bekerja pada sumbu elemen dan A adalah luasan elemen yang terkena gaya P, ditambah Momen dikalikan dengan jarak kesumbu netral dibagi dengan inersia dari penampang elemen.

Dari permodelan akan dihasilkan tegangan dan regangan dimana regangan dibagi menurut arah sumbu (x,y,z), Dimana u, v, dan w adalah komponen dari perpindahan di koordinat x, y, z, semua nilai regangan dan tegangan dibuat dalam persamaan (**Persamaan 2.14s/d Persamaan 2.9**).

$$\varepsilon_x = ux + \frac{1}{2}(ux^2 + vx^2 + wx^2) \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_y = uy + \frac{1}{2}(uy^2 + vy^2 + wy^2) \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_z = uz + \frac{1}{2}(uz^2 + vz^2 + wz^2) \quad (2.16)$$

$$\gamma_{xy} = uy + vx + (ux \cdot uy + vx \cdot vy + wx \cdot wy) \quad (2.17)$$

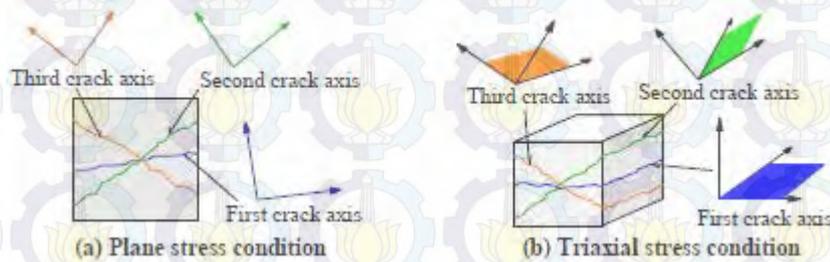
$$\gamma_{yz} = uz + wy + (uy \cdot uz + vy \cdot vz + wy \cdot wz) \quad (2.18)$$

$$\gamma_{zx} = wx + uz + (uz \cdot ux + vz \cdot vx + wz \cdot wx) \quad (2.19)$$

2.3.4. Kriteria Kegagalan Retak Untuk Elemen Non-Ortogonal

Dalam penelitian (Kazuhiro, dkk 2004), menyatakan model retak dengan konsep sudut dimana retak terbentuk pada elemen, sumbu retak pada elemen bergantung pada sumbu material yang telah di setting pada tahap awal. Satu

sumbu retak mampu mewakili dua retakan pada bidang ortogonal dalam analisis tegangan dan tiga retak bidang ortogonal dalam analisis tiga dimensi. Retak sumbu yang terjadi pada arah tertentu mencerminkan retak berikutnya yang terjadi terhadap sudut akut retak yang berakibat redistribusi tegangan atau perubahan arah pembebanan. Tiga sumbu retak yang di representasi kan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2. 3 Mode retak pada banyak arah
(Kazuhiro, dkk 2004)

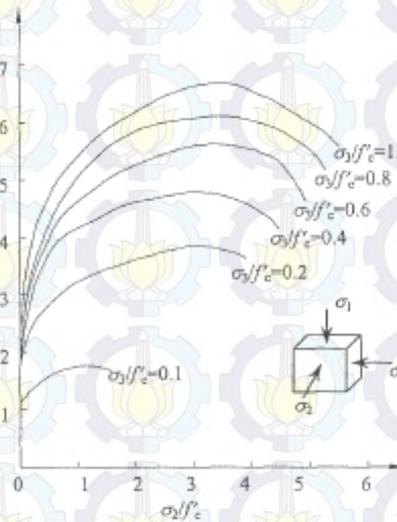
Tabel 2. 2 Parameter konstitutif untuk permodelan material beton

| Parameter (see Fig. 1) | Suggested value | Calibration method and/or reference |
|---|--|---|
| E_c (MPa) | $0.85 \cdot 21500 \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{1/3}$ | E_c that leads to 85% of E_{cs} suggested by MC90 (CEB, 1993) |
| ν | 0.2 | Adopted in MC90 (CEB, 1993) |
| f_{cs} (MPa) | $0.07 \cdot f_c^{1.56}$ | From parametric analysis based on MC90 equations (CEB, 1993) |
| f_t (MPa) | $1.4 \cdot \left(\frac{f_c - 8}{10}\right)^{1.13}$ | Adopted in MC90 (CEB, 1993) |
| $\epsilon_c^F = \epsilon_c - \epsilon_c^{el}$ | $\frac{0.7 \cdot f_c^{0.31}}{1000} - \frac{f_c}{E_c}$ | Variable value suggested by Thorenfeldt <i>et al.</i> (1987) |
| w_d (mm) | -0.5 | Suggested by Van Mier (1984) for normal concrete |
| α | 2.0 | Default value leading to intersection of plastic and fracture surfaces during hardening and softening (Cervenka Consulting, 2004) |
| e | 0.52 | Leading to biaxial strength $f_{bc} = 1.14 \cdot f_c$ (Kupfer <i>et al.</i> , 1969) |
| β | $0.7 \cdot \beta^2 + 0.9 \cdot \beta = \frac{f_c(1-2\nu)}{E_c \cdot \epsilon_c^F}$ | From parametric analysis based on hypothesis of zero volumetric strain at maximum compressive stress under uniaxial compression |
| G_F (MN/m) | $\frac{G_{F0} \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.7}}{1000}$ | Adopted in MC90 (CEB, 1993) G_{F0} is a function of the maximum aggregate size d_{max} . For usual value of $d_{max} = 16$ mm, $G_{F0} = 0.030$ Nmm/mm ² |
| FIXED | 0 | Rotating crack model adopted |

Sumber : (Papanikolaou dan Andreas, 2005)

Banyak peneliti mencurahkan perhatiannya untuk mempelajari pengaruh tegangan utama σ_2 pada kekuatan beton di tahun 1970 an dan 1980 an. Hasil dari penelitian Mills dan Zimmerman 1970 dan Launay dan Gachon 1971 dan Mechiles 1987 menunjukkan bagaimana kriteria kegagalan yang terjadi pada beton, yang meliputi variable tegangan Von Misses atau kegagalan Mohr Coulomb. Dari penelitian Launay dan Gachon 1971, menghasilkan kesimpulan bahwa kekuatan beton meningkat ketika tegangan σ_2 meningkat dari nol menjadi optimum.

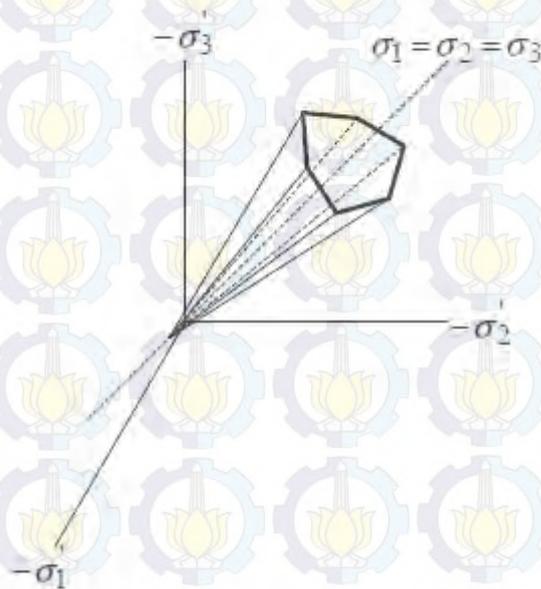
Bagaimanapun, kekuatan beton akan dicapai dan bernilai maksimum ketika σ_2 mencapai angka yang optimum. Disamping itu kekuatan beton akan berkurang dan ketika itu tegangan arah σ_2 akan meningkat. Berikut **Gambar2.5** yang menunjukkan hubungan tegangan berbanding $f'c$ beton untuk beban triaxial.



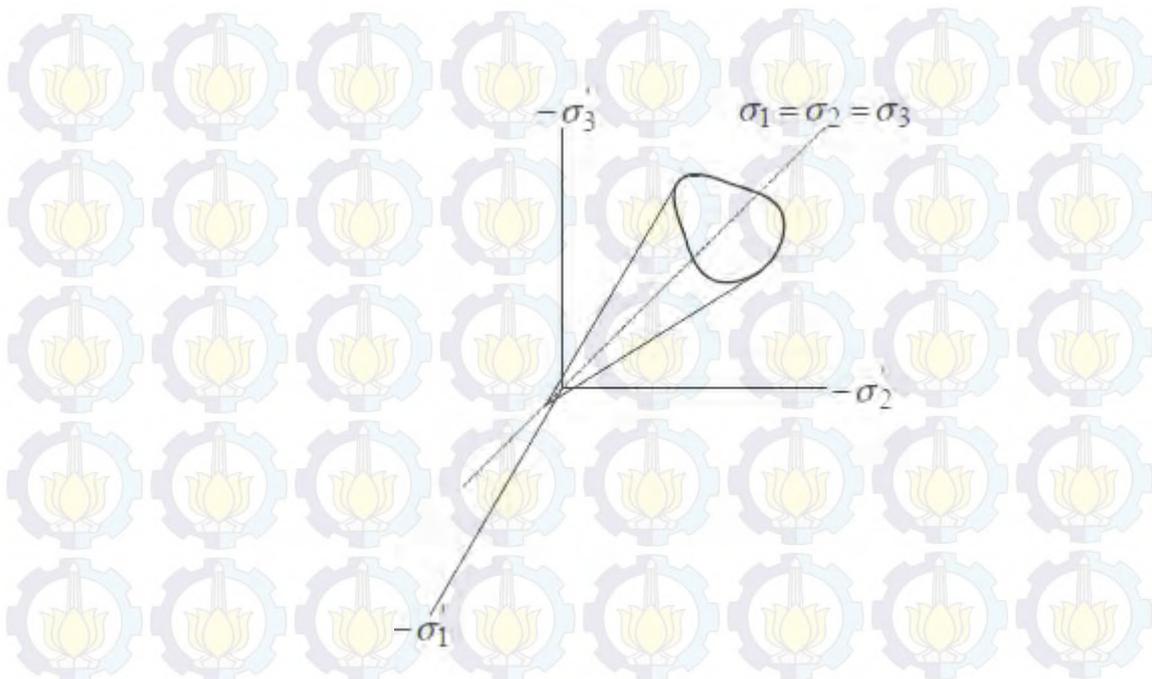
Gambar 2. 4 Hubungan tegangan dengan $f'c$ beton
(Launay dan Gachon 1971)

2.3.5. Kriteria Kegagalan Mohr Coulom untuk beton triaxial

Kegagalan permukaan dengan menggunakan Mohr dari tegangan utama ditunjukkan pada **Gambar 2.6**, dari **Gambar 2.6** tersebut dapat diamati bahwa model kriteria Mohr untuk kegagalan beton pada bagaian permukaan berbentuk krucut dnegan hexagonal teratur. Pada **Gambar 2.7** tipe kegagalan beton untuk tegangan utama berbentuk halus mendekati bentuk lingkaran teratur. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan matematika dari analisa Mohr dianggap dapat mendekati tegangan utama hasil eksperimental, dengan pengurangan sudut friksi yang didasarkan dari peerubahan bentuk yang dialami tegangan σ_1 dan σ_3 dengan tidak menghiraukan perubahan pada tegangan σ_2 untuk tekan triaxial beton, dari hal tersebut menunjukkan kelemahan bila menggunakan toeri Mohr Coulom, (Moran 2011).



Gambar 2. 5 Tipe kegagalan Mohr Coulom pada tekan permukaan triaxial beton untuk tegangan utama (Moran, 2011).



Gambar 2. 6 Tipe kegagalan Eksperimental pada tekan permukaan triaxial beton untuk tegangan utama (Moran,, 2011).

2.4 Perilaku Kegagalan Beton

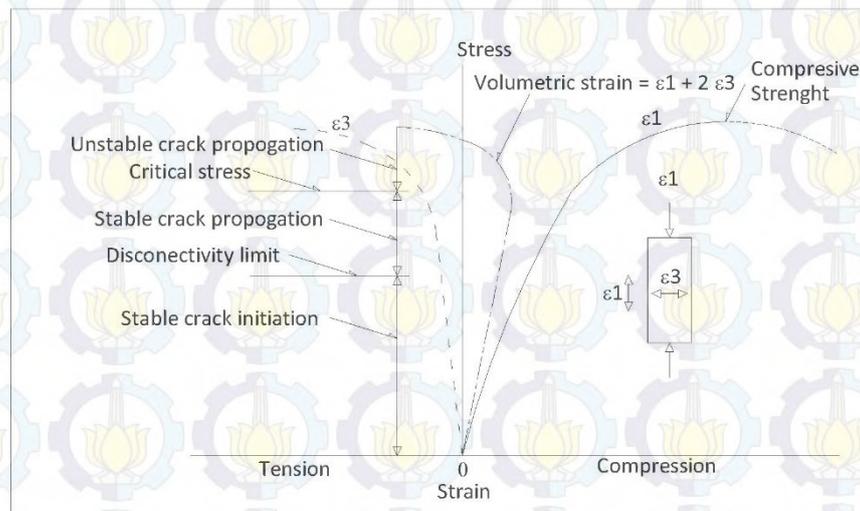
2.4.1. Perilaku Kegagalan Beton Tekan

Beton adalah gabungan dari pasta semen dan agregat, setiap material tersebut memiliki grafik hubungan tegangan dan regangan material yang linier dan getas dalam tekan. Material getas bersifat membangun kerusakan tarik yang tegak lurus arah tegangan tarik paling besar. Ketika beton dihadapkan pada beban tekan uniaksial, retak terjadi pada daerah paralel di daerah maksimum tekan. Pada tes tekan berbentuk silinder, gesekan antara kepala pada alat tes dan ekor, dimana bagian ekor menahan beban lateral yang bekerja sehingga terjadi regangan dan pemuaihan sehingga mengakibatkan retak bada sumbu vertical. Meskipun beton terbuat dari bahan yang bersifat elastic, dan material getas, kurva tegangan dan regangan berbentuk non linier dan muncul sesuatu yang disebut *ductile* . Ini dapat di jelaskan dengan proses *microcrack* secara bertingkat dari hasil distribusi

tegangan dari elemen ke elemen didalam beton tersebut [Gambar 1]. Ada 4 tingkatan yang terjadi saat *microcrack* dan kerusakan beton akibat beban *uniaxial* (James dan Macgregor, 2009).

1. Pemampatan dari pasta yang diakibatkan adanya *hydrasi*, dan mengakibatkan material tersebut saling tarik menarik dan mengakibatkan terjadinya tegangan sebelum dibebani. Hasilnya timbul sedikit retak pada beton. Dalam [Gambar 1] terjadi tegangan tarik linier sebesar 30 persen dari kemampuan tekan beton.
2. Ketika beton terjadi tegangan 30 sampai 40 persen setelah tertekan beban, akan terjadi retak yang berasal dari kerusakan yang terjadi antara hubungan antar material yang disebut *bond crack*, kerusakan tersebut terjadi pada daerah *interface* mortar beton.
3. Saat mencapai 50 sampai 60 persen dari beban ultimate, terbentuk retak pada permukaan beton ini mengartikan bahwa tegangan tekan di distribusikan pada material beton dan mengakibatkan hubungan antar elemen tertarik dan beberapa hubungan tidak dapat menahan tegangan tersebut, kondisi ini disebut dengan *discontinue limit*.
4. Sedangkan pada 70 sampai 80 persen dari beban ultimate, retak pada beton meningkat, dan membuat pola dari *microcrack*. Namun ada beberapa kerusakan yang tidak diakibatkan tersebarnya tegangan secara merata sehingga terjadi bentuk non linier pada [Gambar 1] dari grafik tersebut, kondisi ini disebut dengan *criticalstress*.

Kondisi lebih dari 75 atau 80 persen peningkatan regangan terjadi sehingga volume retak meningkat dengan cepat, hal ini ditunjukkan pada [Gambar 2.8].



Gambar 2. 7 Grafik Hubungan tegangan regangan beton akibat beban uniaxial (James dan Macgregor, 2009)

2.4.2. Hubungan Kuat Tekan dan Tarik pada Beton

Meskipun kekuatan tarik beton meningkat dengan adanya peningkatan kekuatan tekan, rasio dari kekuatan tarik terhadap kuat tekan, dimana sebaliknya bila kuat tekan meningkat maka kuat tarik akan meningkat pula. Ini berarti perlu dipisahkan antara beton mutu tinggi dengan beton mutu rendah dimana mutu tinggi cenderung getas dan memiliki kuat tekan tinggi dengan kuat tarik tinggi hal ini dapat digambarkan melalui **Gambar 2.9** dimana garis 3-11 dan 3-12 dibuat dengan persamaan (**Persamaan 2.20 dan Persamaan 2.21**) sebagai berikut (James dan Macgregor, 2009)

$$\overline{f_{ct}} = 6.4\sqrt{f'_c} \quad (2. 20)$$

$$\overline{f_r} = 8.3\sqrt{f'_c} \quad (2. 21)$$

Dimana f_{ct} merupakan nilai dari *split cylinder strength* dengan satuan psi dan f_r adalah *modulus of rupture* dengan satuan psi, dari penelitian James dan Macgregor (1962) rasio distribusi menghasilkan log distribusi normal dari *modulus of*

rupture. ACI Code Section 9.5.2.3 juga mengatur besaran nilai f_r dengan perumusan dengan memperhitungkan defleksi sebagai persamaan

Persamaan 2.22 .

$$f_r = 7.5\lambda\sqrt{f'_c} \quad (2.22)$$

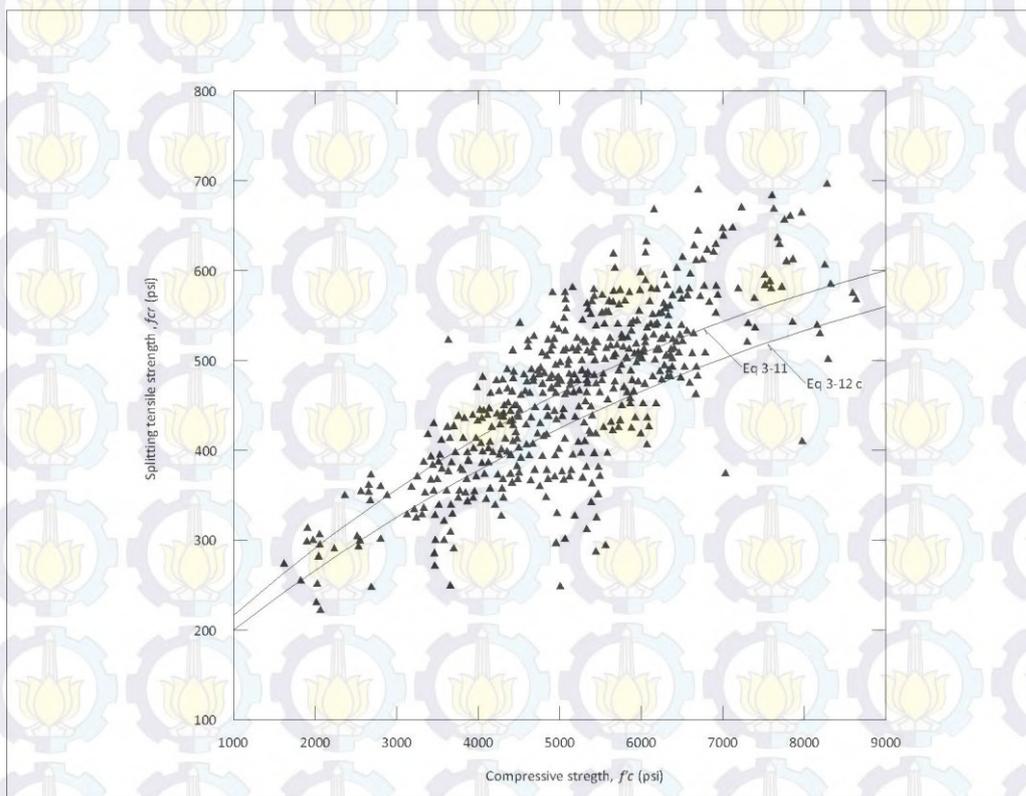
Dimana :

$\lambda = 1.0$ untuk kategori beton normal

f_r = modulus of rupture (psi)

f'_c = kuat tekan beton (psi)

Faktor yang mempengaruhi kuat tarik beton sama dengan factor yang mempengaruhi kuat tekan beton seperti yang dibahas sebelumnya.



Gambar 2. 8 Hubungan kuat tekan beton tarik dengan beton tekan
(James dan Macgregor, 2009).

2.4.3. Curva Tegangan dan Regangan Beton Normal

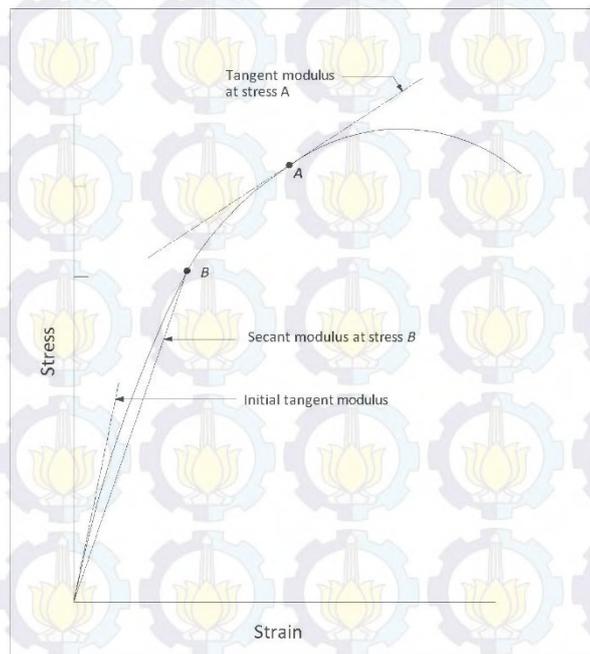
Perilaku dan kekuatan pada beton bertulang di kontrol oleh besar elemen dan bentuk elemen tersebut dan propertis dari tegangan dan regangan dari beton. Curva tegangan dan regangan untuk beton ditunjukkan pada **Gambar 2.10**, tegangan dan regangan dicapai pada kondisi maksimum dengan regangan antara 0,0015 sampai dengan 0,003. Bentuk kurva pada **Gambar 2.10** merupakan hasil dari terjadinya mode *microcrack* pada beton. Pada inisial slop (inisial tangen modulus elastis) meningkat seiring dengan peningkatan kekuatan tekan beton. Nilai E_c merupakan modulus elastis yang dibuat dalam fungsi f'_c ACI Code Section 8.5.1 memberikan perumusan **Persamaan 2.23**.

$$E_c = 33(w^{1.5})\sqrt{f'_c} \text{ psi} \quad (2.23)$$

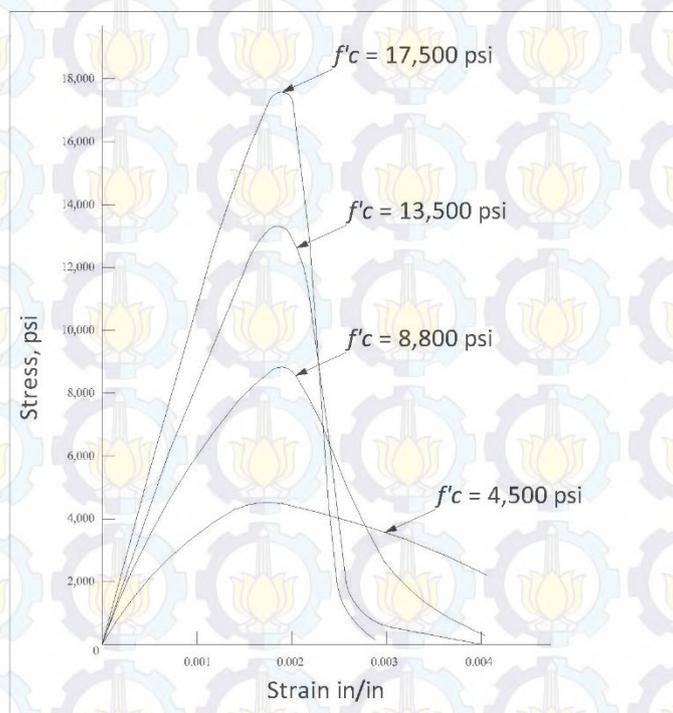
$$E_c = 5700\sqrt{f'_c} \text{ psi} \quad (2.24)$$

$$E_c = 40000\sqrt{f'_c} + 1.0 \times 10^6 \text{ psi} \quad (2.25)$$

Untuk beton normal menggunakan perumusan **Persamaan 2.24** untuk menentukan nilai dari modulus elastis, sedangkan untuk beton mutu tinggi digunakan perumusan **Persamaan 2.25**. Hal tersebut tergambar pada grafik tegangan dan regangan [**Gambar 2.11**].



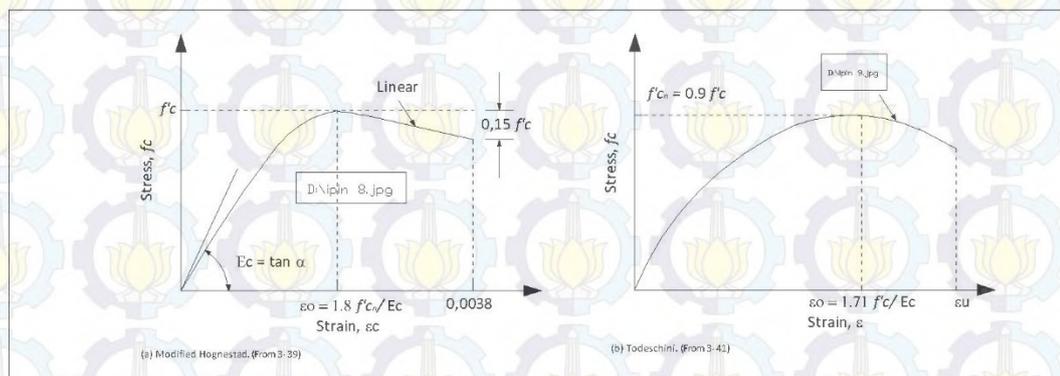
Gambar 2. 9 Tangen Modulus Elastis
(James dan Macgregor, 2009)



Gambar 2. 10 Kurva umum tegangan dan regangan akibat beban tekan.

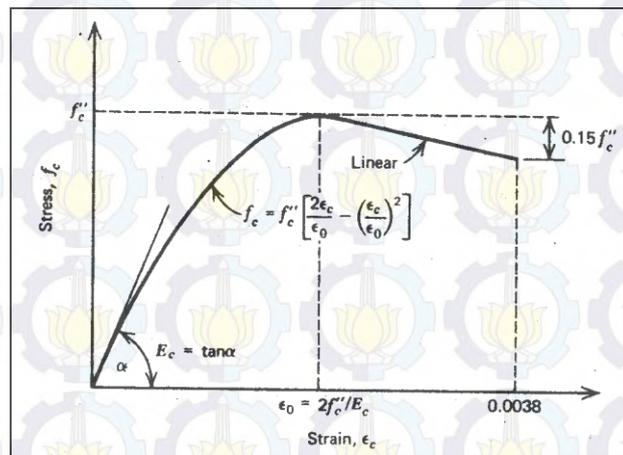
(James dan Macgregor, 2009)

Dalam buku (James dan Macgregor, 2009) dibandingkan hasil kurva tegangan dan regangan yang didapatkan *Hognested* dan *Todeschini*, dimana didapatkan untuk kondisi beton normal nilai ϵ_0 dicapai dengan persamaan **Persamaan 2.26** dan **Persamaan 2.27**. **Gambar 2.12** menjelaskan bahwa E_c merupakan tangensial dari sudut yang dibentuk kurva tegangan dan regangan dari (0,0) sampai besinggungan membentuk kurva sampai ϵ_0 . Setelah mencapai puncak pada stress mendekati $0,9f'_c$ akan terjadi penurunan tegangan tapi regangan tetap meningkat sampai dengan ultimate.



*Gambar 2. 11 Analisa tegangan dan regangan untuk beton normal
(James dan Macgregor, 2009)*

Salah satu bentuk kurva tegangan-regangan hingga batas sebelum tegangan mencapai nilai maksimumnya disampaikan oleh Hognestad yang menggunakan persamaan parabola berderajat dua. Dari grafik, f'_c adalah tegangan maksimum yang dicapai oleh beton (dalam penelitian ini menggunakan nilai f_c). Nilai f'_c ini dapat berbeda dengan nilai f_c karena perbedaan ukuran dan bentuk dari beton yang diuji tekan (Park & Paulay, 1974, hal. 12-14).



Gambar 2. 12 Kurva tegangan-regangan kuat tekan beton
(Park & Paulay, 1974)

Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0, f_c = f'_c \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2. 26)$$

$$0 \leq \varepsilon_c \leq 0,0038, f_c = f'_c \left[1 - \frac{0,15}{0,003 - \varepsilon_c} (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \right] \quad (2. 27)$$

Dimana:

f'_c = tegangan maksimum beton yang dicapai

ε_c = regangan beton di suatu titik yang ditentukan

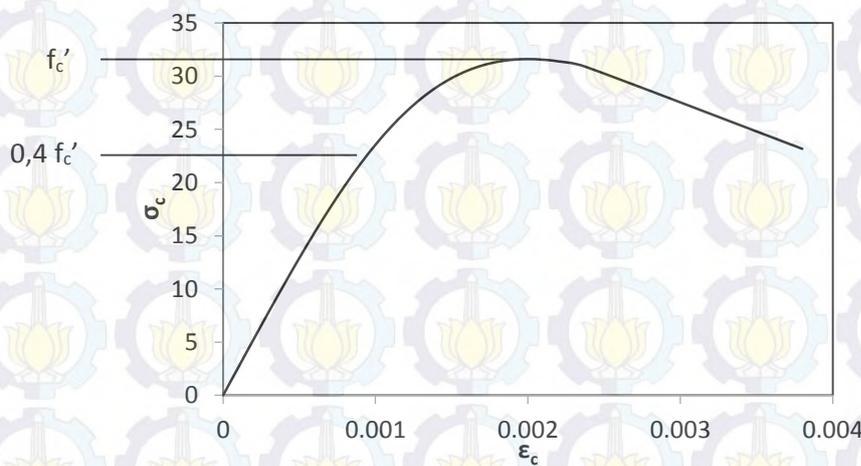
ε_0 = regangan beton pada kondisi tegangan maksimum yang didefinisikan sebagai: $\varepsilon_0 = 2 \frac{f'_c}{E_c}$

E_c = modulus elastisitas beton

Karakteristik beton dalam kondisi elastis hingga plastis dalam uji tekan beton juga digambarkan oleh D.J. Carreira dan Chu K.H pada tahun 1985 melalui kurva tegangan-regangan kuat tekan beton. Kurva ini terbentuk berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\sigma_c = \frac{f_c' \gamma (\epsilon_c / \epsilon_c')}{\gamma - 1 + (\epsilon_c / \epsilon_c')^\gamma} \quad (2.28)$$

$$\gamma = \left[\frac{f_c'}{32.4} \right]^3 + 1.55 \quad (2.29)$$



Gambar 2.13 Contoh grafik tegangan-regangan kuat tekan beton

Dimana σ_c adalah tegangan tekan dari beton, ϵ_c adalah regangan tekan dari beton dan f_c' adalah kuat tekan beton pada regangan ϵ_c' . Biasanya, puncak dari kuat tekan beton terletak pada regangan ϵ_c' sebesar 0.002 dan karakteristik dari beton diasumsikan sebagai elastik linier hingga mencapai $0.4 f_c'$ (Prakash, dkk 2011, hal. 4).

2.5 Standart Tes Beton

2.5.1. Standar Tes Tekan Beton

Standar test yang diterima untuk tes kuat tekan beton adalah material beton berbentuk silinder dengan diameter 6 inch dan tinggi 12 inch, sesuai dengan yang ditentukan dalam ASTM Standart 31 dan 39. Sama halnya dengan ASTM, ACI juga menentukan standar testekan untuk beton yaitu dengan diameter 4 inch dan tinggi 8 inch. Menurut standar beton dapat dilakukan tes tekan saat mencapai umur 28 hari, dan selama sampai dengan 28 hari perlu dilakukan *curing* untuk menjaga beton dalam kondisi normal, karena dalam prosesnya beton mengalami hidrasi yang mengakibatkan kenaikan suhu, kenaikan suhu tanpa dilakukan proses *curing* dapat menyebabkan *microcrack* seperti pada yang kita bahas sebelumnya. Untuk melakukan tes tekan kekurang-kurangannya diperlukan dua benda uji ukuran 6 dan 12, sedangkan untuk benda uji ukuran 4 dan 8 minimal menggunakan tiga benda uji. Untuk beton mutu tinggi rata-rata digunakan umur beton antara 56 sampai dengan 90 hari. Adapun kurva hubungan umur beton dengan kuat beton digambarkan pada [Gambar 2.14]. Menurut ACI code bahwa untuk menentukan kuat tekan optimum digunakan standar deviasi, standar deviasi digunakan dalam menentukan kisaran rata-rata untuk kuat beton yang ingin dicapai. Dalam ACI diatur dan dirumuskan untuk mendapatkan kuat tekan beton dari perumusan [Persamaan 2.30 dan Persamaan 2.31]

Untuk mencari nilai $f'c$ kurang dari 5000 psi ambil angka terbesar antara

$$f'cr = f'c + 1.34s \quad (2.30)$$

Dan

$$f'cr = f'c + 2.33s - 500 \quad (2.31)$$

Sedangkan untuk yang lebih besar dari 5000 psi gunakan perumusan [Persamaan 2.32 & Persamaan 2.33] dibawah dan ambil nilai terbesar

$$f'cr = f'c + 1.34s \quad (2.32)$$

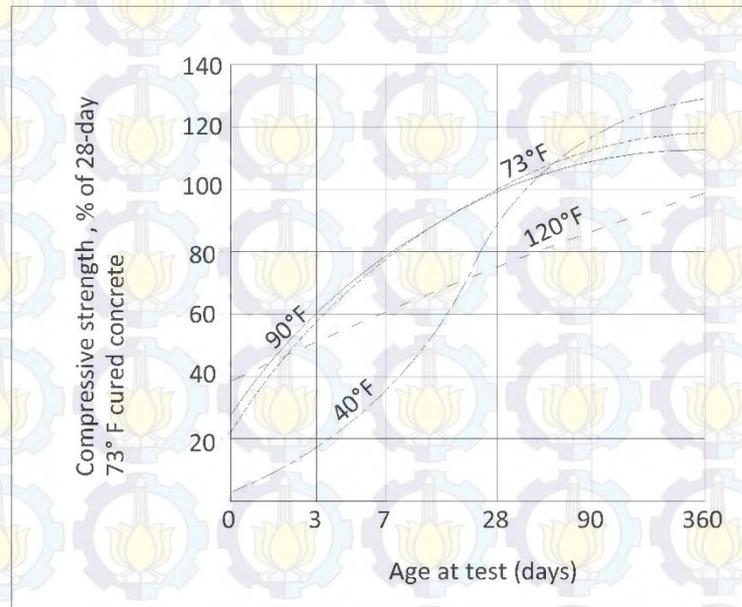
Dan

$$f'_{cr} = 0.9f'_c + 2.33s \quad (2.33)$$

s adalah standar deviasi yang telah diatur dalam ACI CODE SEC. 5.3.1 f'_{cr} adalah kuat tekan yang ingin dicapai saat uji kuat tekan beton dari beberapa sample f'_c adalah kuat tekan beton rencana Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah sebagai berikut:

1. w/c atau rasio air semen dimana pengaruhnya bila nilai w/c naik maka kuat tekan beton akan berkurang, begitu pula sebaliknya.
2. Tipe semen yang digunakan, dalam ASTM diatur ada 5 jenis tipe semen yang ada, dimana semen tersebut memiliki karakter yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhan, misal untuk semen tipe III digunakan untuk membuat beton *early high strength*
3. Pozzolan yang digunakan berupa fly ash silica dan lainnya, dapat mempengaruhi kuat tekan beton bila terlalu banyak menggunakan pozzolan maka kuat tekan beton di umur awal akan jatuh namun di akhir akan meningkat pesat.
4. Agregat yang digunakan juga menentukan kuat tekan beton, dalam peraturan ACI sudah diatur besarnya diameter agregat yang dapat digunakan untuk mendapatkan kuat tekan beton yang direncanakan.
5. Air yang digunakan, kadar kemurnian air juga berpengaruh terhadap kuat tekan beton, semakin kotor air yang digunakan maka akan membuat bahan organik bertambah dalam campuran sehingga mengakibatkan kuat tekan beton turun.
6. Kondisi *curing* yang digunakan apakah dengan direndam atau di tutupi dengan karung basah, kondisi perlu dibuat kondisi suhu kamar agar tidak terjadi *microcrack* yang dapat mengakibatkan berkurangnya kuat tekan beton benda uji
7. Umur beton, kerapatan beton dalam artian gradasi yang baik jangan sampai terjadi segregasi, kemudian yang kedua adalah besarnya pembebanan dalam satuan second, semakin cepat cara pembebanan maka

retak pada benda uji arah diagonal dan transversal semakin cepat tercapai dengan begitu bias dibilang sebagai beban kejut yang mengakibatkan berkurangnya kuat tekan beton dalam bacaan alat tes tekan beton.



Gambar 2. 14 Efek temperature dan umur beton terhadap kuat tekan beton (semen tipe I, w/c 0.41 dan rongga 4.5 persen). (James dan Macgregor, 2009)

2.5.2. Standar Tes Tarik Beton

Ada dua tipe cara untuk menentukan standar tes tarik beton yang pertama dari *modulus rupture* yang diatur dalam ASTM C78 dan C293. Dimana data yang diambil berasal dari elemen balok beton dengan dimensi penampang 6x6x30 inch dan panjang dan dibebani tiap 24 inch sepanjang bentang balok arah tegak lurus sumbu batang sehingga bersifat tes lentur. Regangan lentur hasilnya diolah dengan menggunakan notasi f_r yang diasumsikan dengan perumusan [Persamaan 2.34]

$$f_r = \frac{6M}{bh^2} \quad (2.34)$$

f_r = modulus rupture

M = momen

b = dimensi lebar balok

h = dimensi tinggi balok

Sedangkan yang kedua dihasilkan dari *split cylinder test* (ASTM C496) dimana menggunakan silinder 6 dengan tinggi 12 inch, dimana akan ditekan dari kedua sisinya. Sehingga mengakibatkan tegangan arah sumbu batang dan tegangan tegak lurus sumbu batang, tegangan tegak lurus bersifat tarik sedangkan tegangan searah sumbu tekan bersifat tegangan tekan. *Split tensile strength* dirumuskan dengan perumusan [Persamaan 2.35]

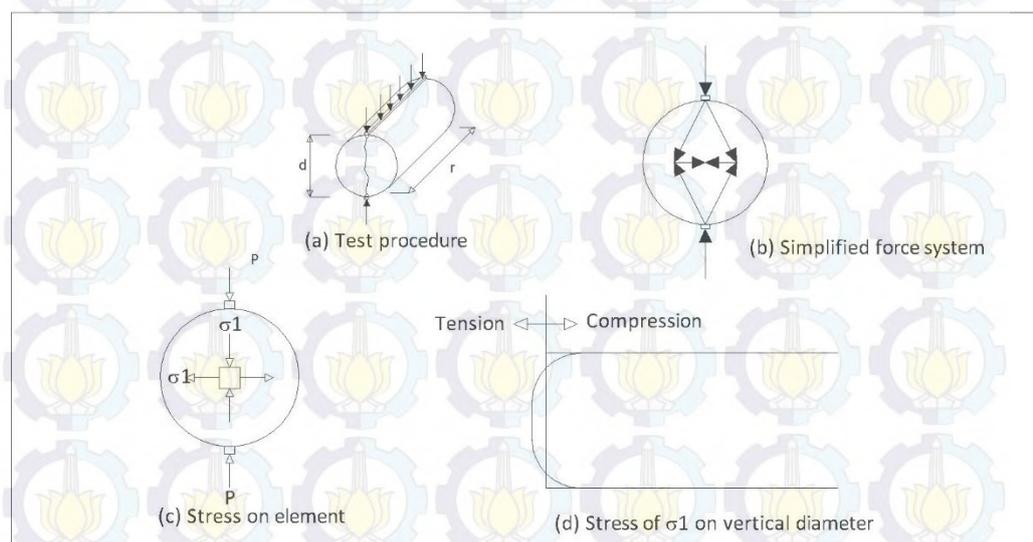
$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi \ell d} \quad (2.35)$$

f_{ct} = *split tensile strength*

P = beban maksimum pada alat tes tekan

ℓ = panjang spesimen

d = diameter spesimen



Gambar 2.15 Tes split silinder
(James dan Macgregor, 2009)

2.5.3. Core Tes Beton

Dalam ASTM diatur bagaimana melakukan *core drill* dan bagaimana mengolah data hasil *core drill*. Adapun beberapa langkah dalam melakukan dan mengolah *core drill* adalah

1. Lakukan investigasi pada elemen struktur dengan menggunakan gambar teknik dari gedung yang akan ditinjau. Tentukan lokasi pengeboran sample pada daerah yang tidak berbahaya, agar tidak mengganggu kinerja struktur tersebut.
2. Lakukan tes tekan terhadap *core drill* tersebut untuk mendapatkan hasil data atau sample tersebut.
3. Lakukan perhitungan konversi pada hasil uji tes beton sesuai standar yang ditentukan.
4. Buat grafik dan masukkan nilai terbesar dan nilai terkecil untuk mendapatkan *mean* dan *standardevisiasi* untuk beton tersebut.

Kekuatan elemen struktur beton mewakili benda uji *core* yang telah dites dan diekivalensikan, nilai terkecil tersebut mewakili beton pada elemen struktur tersebut. Namun penentuan letak dari tes *core* ini menentukan besar kecil hasil kuat tekan ekivalen. Untuk daerah yang mengalami tegangan yang besar sudah pasti kondisinya tidak dalam kondisi elastis atau kondisi normal, berbeda dengan daerah yang rendah dalam terkena tegangan maka, hasil kuat tekan akan besar seiring dengan kondisi beton yang masih belum mencapai tegangan plastis (James K Weight dan James GM, 2009).

2.6 Perilaku Beton Dengan Beban Triaksial

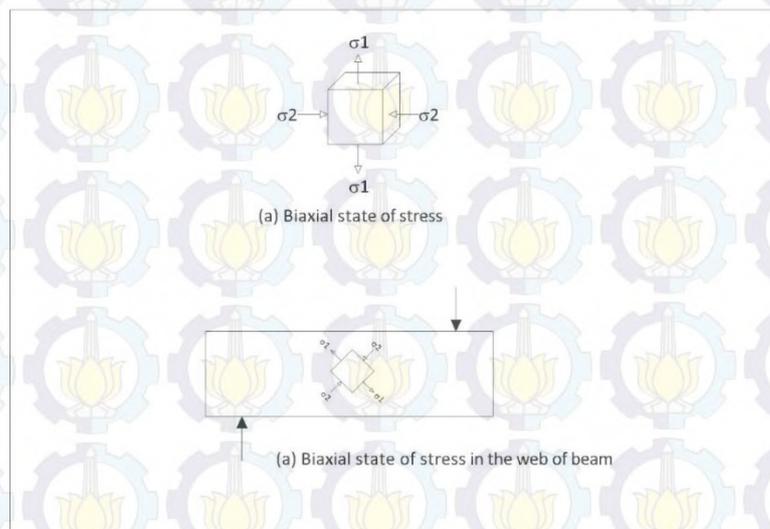
2.6.1. Kekuatan Beton dengan Beban Biaxial dan Triaxial

Pembebanan Biaxial adalah pembebanan yang dilakukan dengan dua sumbu arah tegak lurus bidang. Biaxial loading dianggap tidak memiliki tegangan dan regangan akibat deformasi arah ketiga, hal ini ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Kekuatan dan model kegagalan dari beton yang diuji dengan menggunakan metode pengetesan biaxial memiliki tegangan σ_1 dan σ_2 yang dapat mengakibatkan kegagalan pada beton yang di gambarkan

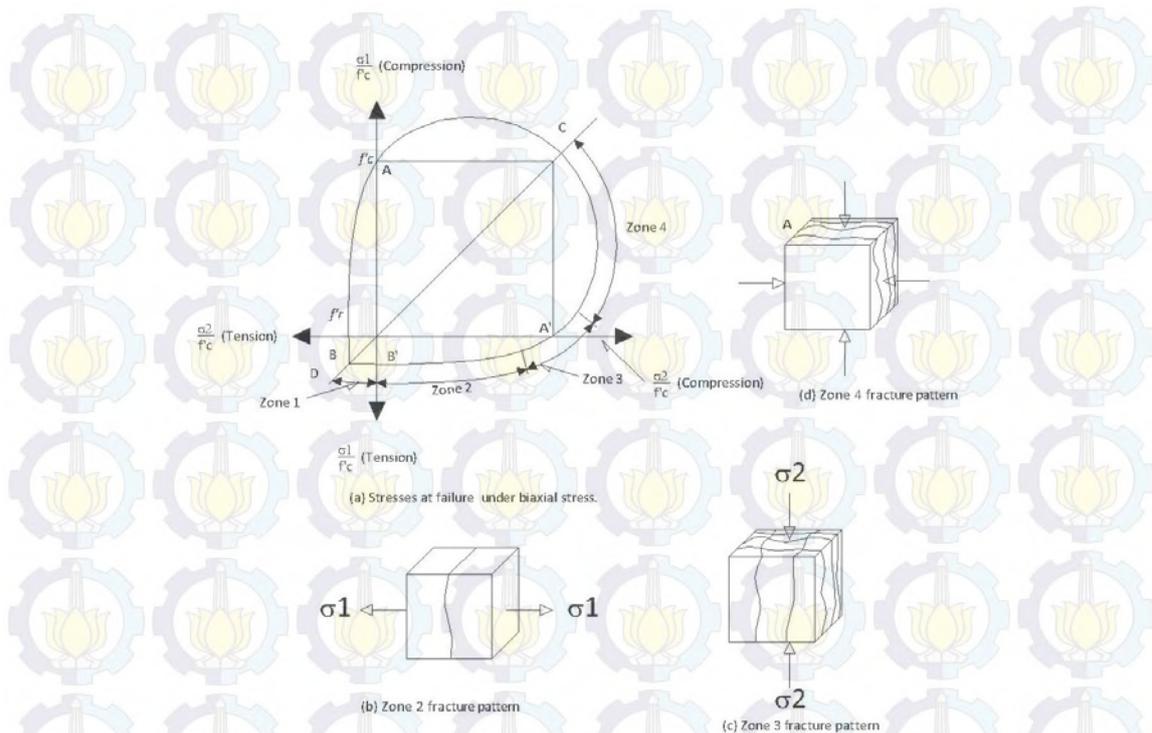
dengan garis pada **Gambar 2.16**. Garis yang menggambarkan f'_c pada A dan A' merupakan garis yang mewakili kekuatan tekan beton, sedangkan f_t pada B dan B' menggambarkan kuat tarik.

Ketika sebuah benda uji menerima beban tekan pada sisinya dan tegangan tarik pada sisi lainnya seperti pada gambar **Gambar 2.16(a)** beton mengalami retak pada tegangan yang rendah. Seperti pada **Gambar 2.17 (a)** menunjukkan kekuatan beton dengan metode biaxial lebih besar dibandingkan dengan beton yang dites menggunakan metode uniaxial. Dengan metode biaxial kekuatan beton dengan tegangan tekan mencapai 107 persen yang dapat dilihat pada titik C.

Pada **Gambar 2.17** ditunjukkan zona 1 dan zona 2 merupakan retak awal yang terjadi, sedangkan zona 3 dan 4 kegagalan beton yang menyebabkan beton hancur. Dalam beton bertulang bagian tulangan merupakan bagian yang menumpu tegangan tarik, oleh karena itu retak tidak dapat merepresentasikan kegagalan pada balok beton bertulang, karena retak terjadi saat inisial beton awal dan dianggap wajar dalam pelaksanaannya (James K Weight dan James G M, 2009).



*Gambar 2. 16 Kodisi beban biaxial
(James dan Macgregor, 2009).*



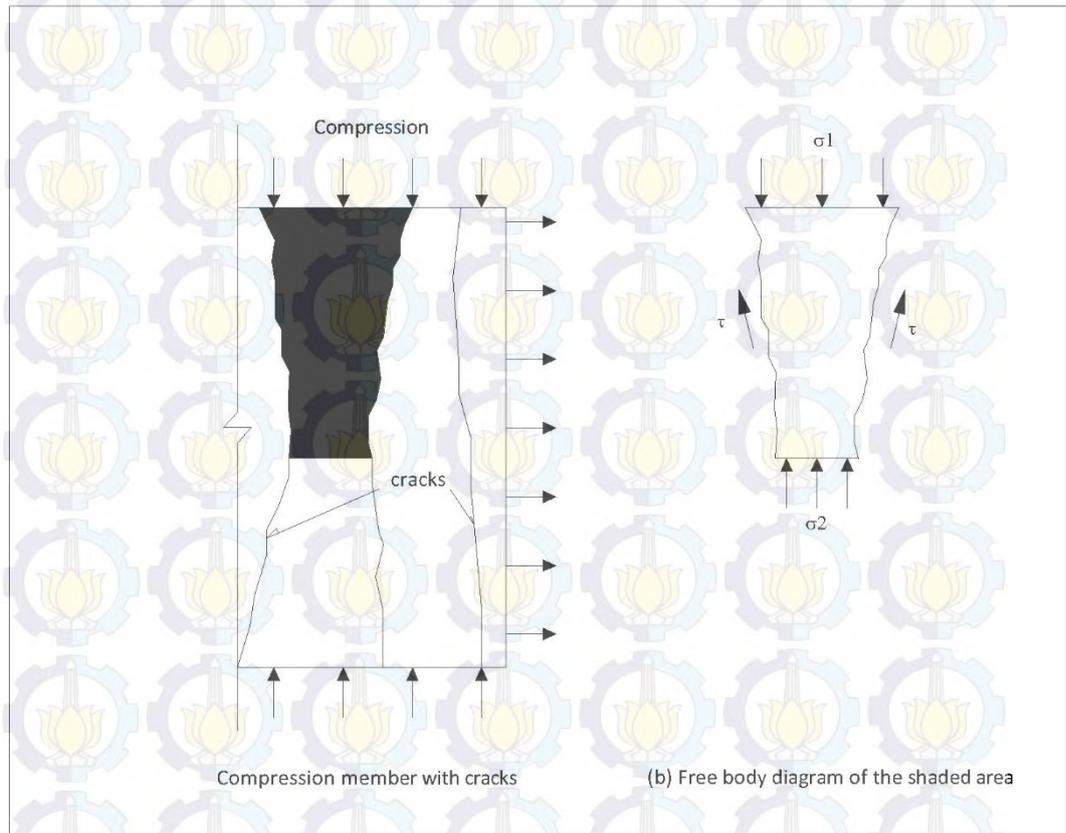
Gambar 2. 17 Kekuatan dan model kegagalan beton tidak bertulang dengan mode uji beban biaxial (James dan Macgregor, 2009).

Jika terjadi keretakan pada beton, maka akan membuat pola retak yang disebabkan oleh terjadinya tegangan tarik dan tekan pada beton uji tersebut.

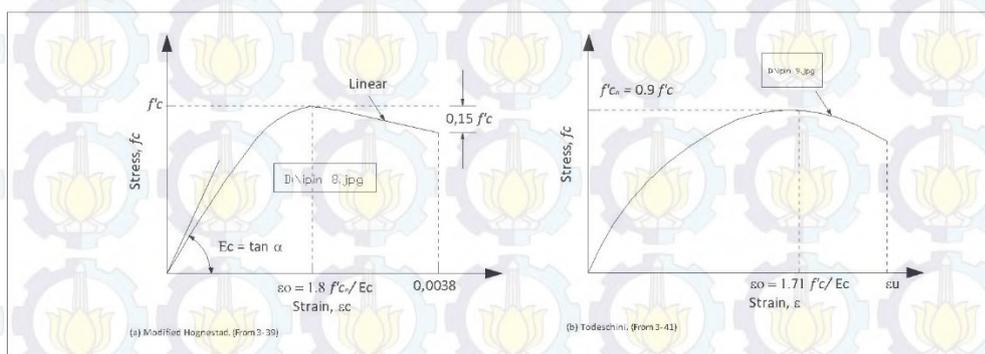
Dari **Gambar 2.18** dapat dilihat pola keretakan yang terjadi pada beton yang dibebani dengan biaxial condition. Ketika terjadi retak maka akan timbul friksi antar elemen beton, semakin besar tegangan yang terjadi maka akan semakin cepat perambatan retak tersebut. Dari penelitian James didapatkan nilai regangan ϵ_2 akibat beban uniaxial tekan sebesar 0,002. Dari regangan tersebut dapat diketahui nilai dari f_2 dengan perumusan **Persamaan 2.36** dan **Persamaan 2.37** yang berasal dari grafik pada **Gambar 2.19**.

$$\frac{f_{2max}}{f_c} = \frac{1}{0.8+170\epsilon_1} \quad (2. 36)$$

$$f_2 = f_{2max} \left[2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2.37)$$



Gambar 2. 18 Tegangan akibat beban biaxial, yang mengakibatkan retak pada beton paralel terhadap arah tegangan tekan.
(James dan Macgregor, 2009)

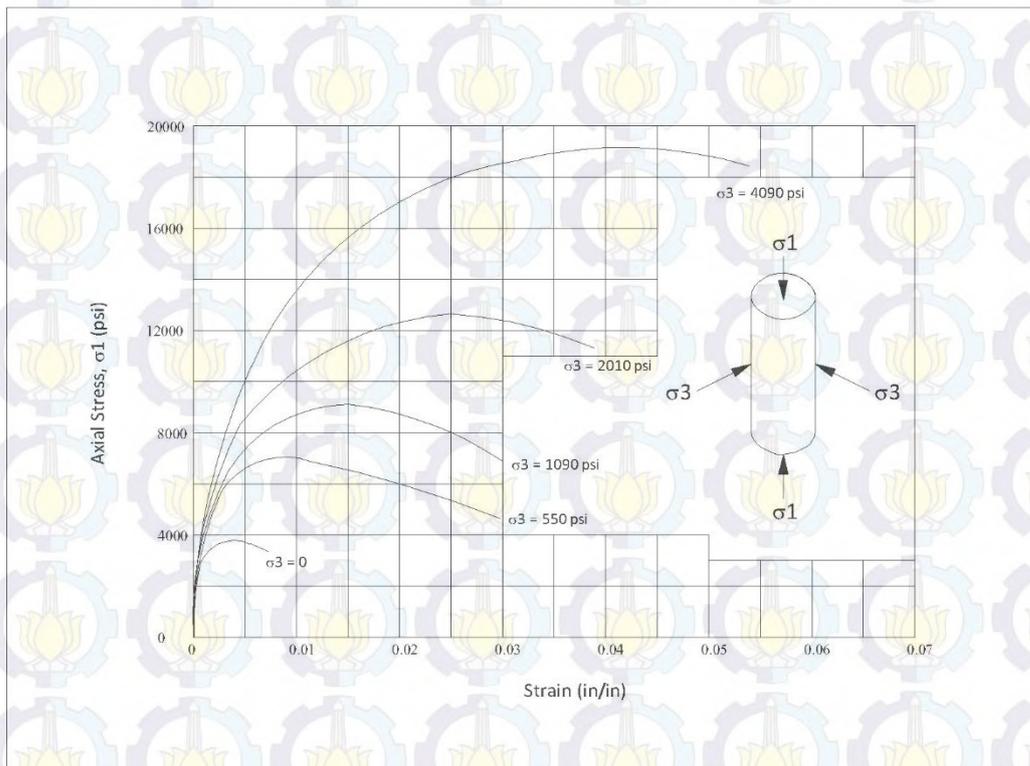


Gambar 2. 19 Efek dari penyebaran tegangan tarik terhadap kuat tekan dari retak beton yang terjadi (James dan Macgregor, 2009)

2.6.2. Pembebanan Triaksial

Dengan pembebanan tekan triaxial, kerusakan disebabkan kegagalan akibat tegangan tarik paralel terhadap tegangan tekan maksimum, atau kegagalan geser. Kekuatan dan ductilitas dari beton dengan beban triaxial ditunjukkan pada **Gambar 2.20**. Grafik tersebut merepresentasikan curva tegangan dan regangan untuk beton silinder dari setiap benda uji. Untuk kondisi $\sigma_2 = \sigma_3$ dan tegangan σ_1 meningkat sampai mencapai kegagalan, sehingga kegagalan σ_1 dengan persamaan **Persamaan 2.38**.

$$\sigma_1 = f'c + 4.1\sigma \quad (2.38)$$

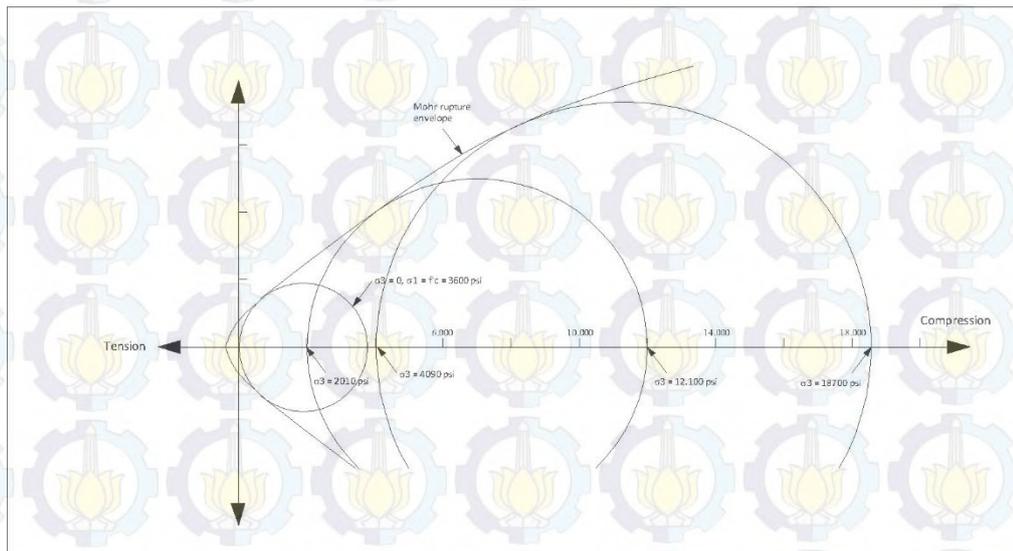


Gambar 2. 20 Kurva tegangan dan regangan dari tekanan triaxial pada beton silinder tidak terkekang dengan $f'c$ 3600 psi.

(James dan Macgregor, 2009)

Kekuatan beton dengan kombinasi tegangan dapat juga di wakikan dengan *Mohr Rupture Envelope*. Lingkaran Mohr diplotkan dari tiga kasus, lingkaran Mohr merupakan garis singgung dari perputusan Mohr envelope yang ditunjukkan dari garis luar yang diwakikan dengan **Gambar 2.20**.

Dalam kolom beton atau hubungan balok kolom, beton tekan terkadang ditentukan oleh kerapatan dari sengkang atau konektor. Ketika tinggi elemen beton bertambah dikarenakan Poisson ratio dan retak mikro, sengkang atau konektor akan mengalami tegangan tarik, yang diakibatkan oleh tegangan tekan beton. Hasil dari pembebanan triaxial tegangan pada beton terkekang oleh sengkang meningkatkan duktilitas dan kekuatan beton terkekang.



*Gambar 2. 21 Keruntuhan Mohr yang dibuat oleh beton yang di uji.
(James dan Macgregor, 2009)*

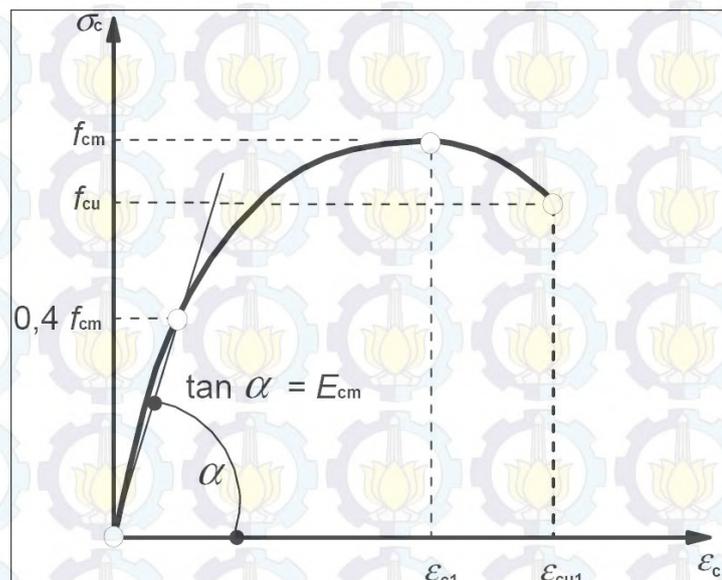
2.7 Modulus Elastis Beton

Pemodelan pengujian balok ini direncanakan menggunakan grafik tegangan-regangan kuat tarik beton yang dikeluarkan oleh Carreira dan Chu karena grafik ini diadopsi oleh penelitian yang cukup baru dari Prakash dkk (2011)

dengan asumsi regangan maksimum terjadi pada 0,0038 seperti pada grafik yang dikeluarkan oleh Park dan Pauley.

1. Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas beton merupakan ukuran kekakuan atau daya tahan bahan terhadap deformasi. Nilai modulus elastisitas ini ditentukan dari perubahan tegangan terhadap regangan dalam batas elastisnya. Telah diketahui bahwa beton pada dasarnya merupakan bahan elastoplastis dimana tegangan tidak proporsional terhadap regangannya, sehingga bentuknya menyerupai suatu garis lengkung. Modulus elastisitas ini diukur berdasarkan kemiringan dari 'secant modulus' seperti yang digambarkan dalam **Gambar 2.22** (Wahyudi & A. Rahim, 1997, hal. 26).



Gambar 2. 22 Hubungan tegangan-regangan beton dengan modulus elastisitas

Sementara itu, berdasarkan asumsi grafik tegangan-regangan kuat tekan beton yang dikeluarkan oleh Carreira dan Chu, maka besarnya modulus elastisitas beton atau modulus young merupakan ukuran perubahan tegangan terhadap regangannya dalam batas $0,4 f_c'$.

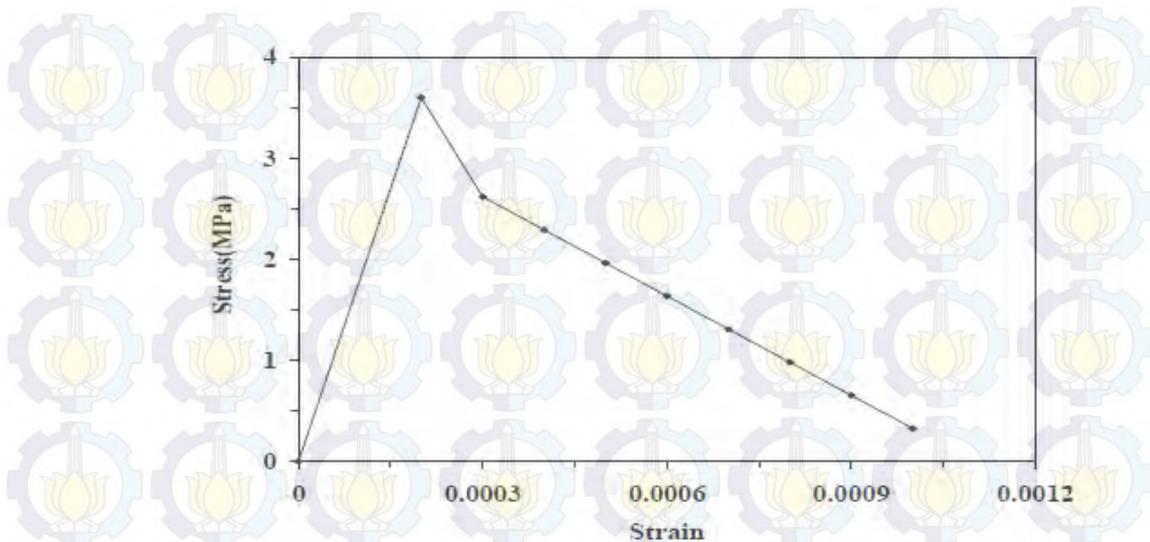
2. Nisbah poisson

Nisbah poisson merupakan perbandingan regangan beton pada arah horizontal (lateral) terhadap regangan beton arah vertikal (aksial) akibat pembebanan aksial dalam keadaan elastis. Nisbah poisson untuk baja diambil sebesar 0,3 berdasarkan SNI 03-1729-2002 mengenai Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung dan untuk beton berkisar antara 0,15 dan 0,20 (Wahyudi dan Rahim, 1997, hal. 28).

3. Kurva tegangan regangan pada kuat tarik beton

Beton merupakan bahan yang getas dan tidak mampu menahan tarik yang tinggi. Uji tarik beton secara langsung dianggap kurang realible karena sulitnya memegang spesimen dan menariknya dalam arah aksial. Untuk itu, biasanya dilakukan uji tarik tak langsung misalnya “Splitting Test”. Modulus tarik beton diperoleh berdasarkan SNI T-15-1991-03 Pasal 3.2.5 ditetapkan sebesar 0,7 kali $\sqrt{f_c'}$ (Wahyudi dan Rahim, 1997, hal. 30).

Hubungan tegangan-regangan pada beton dalam tarik diasumsikan bahwa tegangan tarik meningkat secara linier terhadap regangan tarik hingga mencapai tegangan yang menyebabkan retak pada beton. Dalam hal ini, modulus elastisitas dari kuat tarik beton dapat diasumsikan sama dengan modulus elastisitas dalam kuat tekan beton (Park & Paulay, 1974).



Gambar 2. 23 Kurva tegangan-regangan kuat tarik beton
(Prakash, dkk, 2011)

Sedangkan ACI 1992 nilai dari modulus elastis adalah

$$E_c = 33xwc^{1,15} f'_c{}^{0,5} \quad (2.39)$$

Dimana E_c adalah modulus elastis (psi) w_c adalah berat jenis beton (lb/ft^3) dan f'_c adalah kuat tekan beton (psi) ACI,1992. Dan dari penelitian Richart dkk 1929, nilai dari modulus elastis beton adalah mendekati

$$E_c = 5000\sqrt{f'_{co}} \quad (2.40)$$

Dimana f'_{co} adalah kekuatan tekan beton tidak terkekang dan E_c adalah modulus elastis beton tidak terkekang. Sedangkan dalam penelitiannya Vassil K. Papanikolaou dkk 2006, menghasilkan bahwa nilai E_c yang digunakan untuk kondisi HPC atau beton mutu tinggi adalah dengan perumusan

$$E_c = 0.9x22000x \left(\frac{f'_{co}}{10}\right)^{0,3} \quad (2.41)$$

BAB 3 METODOLOGI

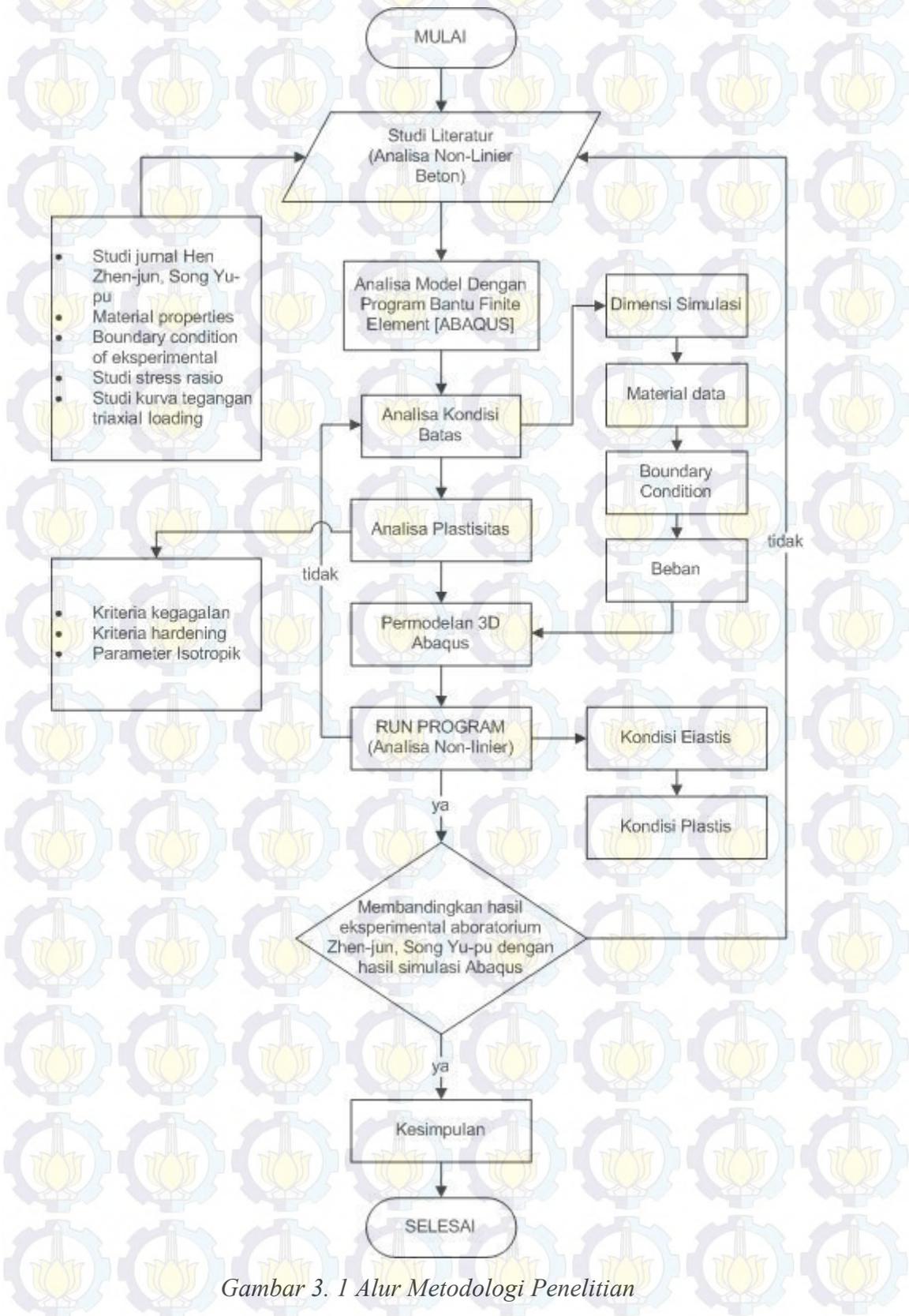
3.1. Gambaran Umum

Pada penelitian ini akan difokuskan pada parameter yang digunakan untuk mendefinisikan perilaku beton akibat beban multiaksial. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan tegangan hasil ekperimental laboratorium dengan permodelan menggunakan program bantu *Abaqus*. Untuk itu dibutuhkan data-data material dari eksperimental untuk dikomparasikan dan dimasukkan kedalam program. *Input* yang dibutuhkan berupa parameter yang nanti akan dibahas pada bab selanjutnya.

Permodelan pada program akan disesuaikan dengan kondisi pada saat eksperimental. Pada permodelan ini akan digunakan dimensi yang sama dengan eksperimental yaitu, benda uji berbentuk kubus dengan dimensi 100mmx100mmx100mm. Perletakkan yang akan digunakan berupa $U1, U3=0$ untuk sisi sumbu x dan z (pada permodelan), sedangkan $U1, U2, U3, R1, R2, R3=0$ untuk sisi sumbu y (pada permodelan). Sedangkan untuk pembebanan dilakukan berbeda dengan ekperimental, yaitu menggunakan beban *pressure area* yang nantinya nilai bebannya akan terus naik sampai mencapai kondisi plastis dan mengalami kegagalan yang di indikasikan dengan kurva tegangan regangan pada benda uji tersebut. pola pembebanan akan disesuaikan dengan rasio tegangan pada **Tabel 3.1**, untuk nilai rasio dengan tanda negatif diasumsikan sebagai tekan (berlawanan sumbu utama) sedangkan untuk tanda positif diasumsikan sebagai tarik (searah sumbu utama)

Hasil permodelan berupa perilaku tegangan beton untuk beban uniaksial, biaksial, dan triaksial yang akan dibandingkan atau dikomparasikan dengan penelitian eksperimental Zhen dan Song, 2009. Adapun untuk lebih detail dari metodologi ini akan dibahas pada bab selanjutnya sedangkan alur penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.

3.2. Bagan Alur Metodologi



Gambar 3. 1 Alur Metodologi Penelitian

3.3. Uraian Bagan Alur Metodologi

Adapun pada sub-bab ini akan diuraikan mengenai setiap langkah yang tercantum dalam bagan alir pada subbab sebelumnya, sehingga kedepannya penelitian (permodelan) yang dilakukan lebih jelas dan dimengerti secara umum tujuan dari penyusunan tesis ini.

3.3.1. Mulai

Pada alur ini dilakukan persiapan sebelum melakukan simulasi, yaitu dengan mengunduh data, mengumpulkan data-data dan informasi terkait yang menunjang baik dalam penulisan dan pelaksanaan permodelan/simulasi. Mempersiapkan program bantu yang akan digunakan untuk permodelan dan menyediakan komputer atau laptop dengan spesifikasi yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi agar berjalan lancar dan memudahkan penulisan tesis.

3.3.2. Studi Literatur

Dalam langkah ini sendiri terdapat beberapa kegiatan utama yang dilakukan untuk menunjang dan melengkapi analisa yang akan dilakukan, yaitu:

- Studi jurnal Zhen-jun Song yu-pu

Langkah ini dilakukan untuk mempelajari dan menuliskan kembali hasil penelitian yang telah dipublikasi berupa jurnal. Selain itu menganalisa hasil permodelan eksperimental yang dilakukan, serta mempelajari perilaku permodelan ekperimental.

- Material properties

Pada bagian ini perlu dilakukan pengkajian terhadap material yang digunakan, dengan membuat rekapitulasi mix proportion.

- Boundary Condition

Perlu dikaji permodelan yang dilakukan peneliti sebelumnya, mulai cara pengetesan beton, pembebanan yang dilakukan menggunakan metode *triaxial test*, dan perlakuan yang diberikan pada beton tersebut. Dari penelitian Zhen dkk, diasumsikan permodelan eksperimental dilakukan pada suhu yang sama dengan di Indonesia sehingga tidak ada perbedaan khusus antara simulasi dengan eksperimental, namun bila ada kendala hasil

yang jauh berbeda dilakukan pendekatan terhadap permodelan triaxial sebelumnya

- **Stress Strain Condition**

Dari hasil eksperimental sebelumnya didapatkan hasil berupa kurva tegangan regangan untuk tiap arah (x, y, dan z). Juga perlu dipelajari pemberian tegangan dari tiap arah sumbu, serta memahami pola kegagalan yang terjadi pada ekperimental sebelumnya untuk dibandingkan dengan simulasi yang akan dilakukan.

3.3.3. Analisa Dengan Program Bantu Finite Element (*Abaqus*)

Analisa yang dilakukan menggunakan permodelan/simulasi yang dibuat sama dengan pelaksanaan uji eksperimental oleh Zhen dan Song (2009). Pada simulasi digunakan program bantu berbasis finite elemen (*Abaqus*). Simulasi yang digunakan berupa permodelan 3 dimensi, dengan menggunakan dimensi yang sama sesuai dengan penelitian eksperimental Zhen Song (2009), serta dikonfigurasi sesuai dengan kenyataan pada saat penelitian dilakukan. Hasil dari simulasi ini akan dikontrol berupa analisa jenis elemen dalam kondisi plastis dan elastis. Simulasi akan menghasilkan tegangan dan regangan pada beton simulasi, yang nantinya akan dibandingkan dengan penelitian Zhen dan Song (2009) berupa analisa tarik dan tekan beton dengan menggunakan perbandingan tegangan (*stress ratio*).

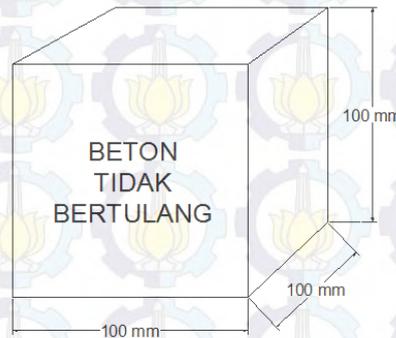
3.3.4. Analisa Kondisi Batas

Pada bagian ini akan dilakukan kajian mengenai metode simulasi yang akan digunakan agar mendapatkan hasil yang mendekati permodelan eksperimental sebelumnya. Kondisi batas ini digunakan sebagai acuan untuk meng-*input* data kedalam program bantu simulasi berbasis finite element (*Abaqus*). Dalam analisa ini juga dilakukan asumsi-asumsi untuk melakukan pendekatan antara permodelan diaboratorium dengan simulasi menggunakan *Abaqus*.

a. Dimensi Simulasi

Dalam tesis ini akan dibuat beton dengan model berbentuk persegi dengan dimensi seperti dengan permodelan dilaboratorium. Dalam

simulasi dengan program ini dibuat dengan dimensi 100x100x100mm. Dimensi dibuat tanpa mengguankan tulangan pada beton, dengan kata lain beton berbentuk polos.



Gambar 3. 2 Geometrik data untuk benda uji simulasi dengan program bantu Abaqus

Setelah itu lakukan *meshing* terhadap geometric data yang telah dibuat, tujuannya adalah untuk membagi elemen tersebut kedalam beberapa partisi dengan tujuan untuk mendapatkan perilaku yang mendekati permodelan pada eksperimental.

b. Material Data

Data yang digunakan dalam permodelan atau simulasi ini berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Zhen-jun dan Song, 2009. Tipe beton yang digunakan adalah *High Strength Concrete*. Dengan rasio air semen (0,31), sedangkan poisson untuk baja diambil sebesar 0,3 berdasarkan SNI 03-1729-2002 mengenai Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung dan untuk beton berkisar antara 0,15 dan 0,20 (Wahyudi & A. Rahim, 1997, hal. 28). Dalam penliatiannya Vassil dan Andreas 2005, menghasilkan bahwa nilai E_c yang digunakan untuk kondisi HPC atau beton mutu tinggi adalah dengan menggunakan **Persamaan 2.41**.

Compressive Strength (f'_c) : 60,16 MPa

Temperatur Ruang (T) : 20°C (diabaikan)

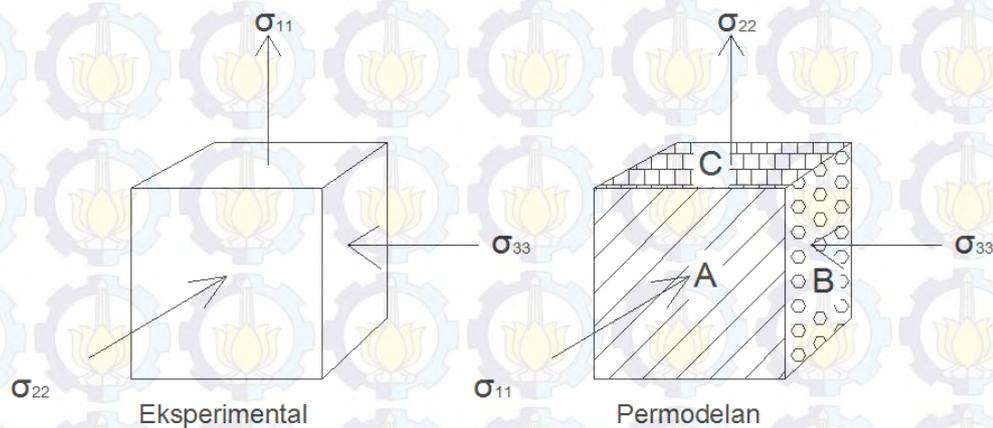
Poisson Ration (ν) : 0,17

Modulus Elastis (E) **Persamaan 2.41** : $0,9.22000.(60,16/10)^{0,3}$
= 33920,132 MPa

Density : $\frac{2456.77 \times 9.81}{10^9} = 24,1 \times 10^{-6}$

c. Boundary Condition

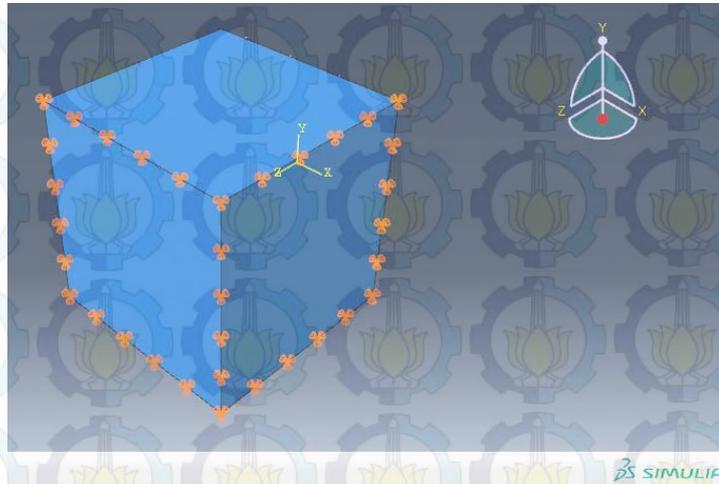
Pada tahap ini hal yang akan dilakukan adalah menentukan perletakkan pada permodelan ini. Pada permodelan dengan menggunakan software akan disamakan dengan permodelan eksperimental, yaitu diasumsikan perletakkan permodelan yang digunakan sama dengan kondisi eksperimental



Gambar 3. 3 Baoundary Condition dari permodelan yang akan dibuat dengan Abaqus

Dari **Gambar 3.3** bagian yang memiliki huruf a,b, dan c merupakan bagian yang dianggap sebagai perletakkan. Pada **Gambar 3.3** menunjukkan beberapa perbedaan sumbu, dimana untuk tegangan 11 pada beton eksperimental sama dengan tegangan 22 pada beton permodelan, sedangkan tegangan 22 pada ekperimental sama dengan tegangan 11 pada permodelan. Sedangkan penamaan A, B, dan C adalah menunjukkan beberapa jenis kondisi batas yang digunakan pada permodelan diantaranya, A ($U_1, U_3=0$), B($U_3,U_1=0$), C($U_1,U_2,U_3,R_1,R_2,R_3=0$). Adapun untuk lebih jelasnya akan dibahas pada bab pembahasan dan analisa. Adapun hasil pemberian kondisi batas pada permodelan menggunakan Abaqus dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.

Software *Abaqus* merepresentasikan perletakkan sebagai pergerakan/displacement untuk arah x, y, dan z.



Gambar 3. 4 Perletakkan BC pada sisi elemen benda uji simulasi
Abaqus

d. Beban

Beban yang digunakan dalam simulasi adalah beban yang sama yang digunakan pada permodelan eksperimental yaitu beban pressure ditiga sisi elemen yang ditinjau (x, y, dan z). Pembebanan yang diberikan berbentuk non-linier bertingkat sampai mencapai kegagalan. Simulasi yang diharapkan berasal dari kondisi elastis, plastis, dan mencapai failure.

Tabel 3. 1 Rasio tegangan pada hasil eksperimental

| Dimensi Simulasi | Stress Ratio | | | Stress Value (Mpa) | | |
|------------------|--------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
| | σ_1 | σ_2 | σ_3 | σ_1 | σ_2 | σ_3 |
| mm | 0.00 | 0.00 | -1 | 0.00 | 0.00 | -60.16 |
| | 1 | 0.00 | 0.00 | 5.08 | 0.00 | 0.00 |
| | 0.05 | 0.00 | -1 | 2.20 | 0.00 | -43.92 |
| | 0.10 | 0.00 | -1 | 3.23 | 0.00 | -32.26 |
| | 0.25 | 0.00 | -1 | 4.28 | 0.00 | -17.11 |
| | 0.50 | 0.00 | -1 | 4.73 | 0.00 | -9.45 |
| | 0.75 | 0.00 | -1 | 4.86 | 0.00 | -6.48 |
| | 1 | -1 | -1 | 2.23 | -44.64 | -44.64 |
| 100x100x100 | 0.05 | -1 | -1 | 3.02 | -30.18 | -30.18 |
| | 0.10 | -1 | -1 | 3.76 | -15.05 | -15.05 |
| | 0.25 | -1 | -1 | 4.11 | -11.73 | -11.73 |
| | 0.35 | -1 | -1 | 4.19 | -8.37 | -8.37 |
| | 0.50 | -1 | -1 | 4.22 | -5.63 | -5.63 |
| | 0.75 | -1 | -1 | 4.23 | -4.23 | -4.23 |
| | 1 | -1 | -1 | 4.23 | -4.23 | -4.23 |

Sumber : Zhen-ju dan Song yu-pu 2009

Tabel 3.1 menunjukkan ratio pembebanan dari tiap sisi elemen, untuk tegangan bernilai nol=0 maka tidak dilakukan pembebanan, sedangkan bila bernilai 1 atau angka maka terdapat gaya aksial pada arah tersebut, sedangkan untuk nilai positif dan negative adalah berpengaruh pada (tarik = positif dan tekan = negative). Dan akan dibuat tambahan permodelan untuk kondisi beton tekan dari tiga sumbu utama(-1,-1,-1) yang nantinya akan dilihat perilaku benda uji tersebut.

3.3.5. Analisa Plastisitas

a. Keriteria Kegagalan

Berdasarkan pada karakteristik kekuatan dari hasil eksperimental, dari **Tabel 3.1** dan analisis teori yang digunakan dalam membangun kegagalan pada benda uji beton HPC, penelitian ini mempersembahkan teori kriteria kegagalan yang baru. Tegangan tekan dan tarik meridians dibuat dalam persamaan berikut :

Tensile Meridians ($=0^\circ$) :

$$r_t^T = \frac{\tau_{octt}^T}{f_c^T} = a \left(c - \frac{\sigma_{oct}^T}{f_c^T} \right) \quad (3.1)$$

Compressive Meridians ($=60^\circ$) :

$$r_c^T = \frac{\tau_{octc}^T}{f_c^T} = b \left(c - \frac{\sigma_{oct}^T}{f_c^T} \right) \quad (3.2)$$

$$r^T(0) = \frac{2r_c^T((r_c^T)^2 - (r_t^T)^2) \cos 0 + r_c^T(2r_t^T - 2r_c^T) \sqrt{4((r_c^T)^2 - (r_t^T)^2) \cos^2 0 + 5(r_t^T)^2 - 4r_t^T r_c^T}}{4((r_c^T)^2 - (r_t^T)^2) \cos^2 0 + (2r_t^T - r_c^T)^2} \quad (3.3)$$

Dimana σ_{oct}^T adalah tegangan normal oktahedral; τ_{oct}^T dan τ_{oct}^T merupakan tegangan geser oktahedral dari meridian tekan dan tarik untuk temperature yang berbeda-beda. Nilai tegangan σ_{oct}^T , σ_o^T , τ_{oct}^T , r_t^T , r_c^T tersebut dapat dimasukkan kedalam persamaan (**Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.6**).

$$\sigma_{oct}^T = \frac{\sigma_{1f}^T + \sigma_{2f}^T + \sigma_{3f}^T}{3} \quad (3.4)$$

$$\tau_{oct}^T = \frac{\sqrt{(\sigma_{1f}^T - \sigma_{2f}^T)^2 + (\sigma_{2f}^T - \sigma_{3f}^T)^2 + (\sigma_{3f}^T - \sigma_{1f}^T)^2}}{3} \quad (3.5)$$

$$\sigma_o^T = \frac{\sigma_{oct}^T}{f_c^T}, r_t^T = \frac{\tau_{oct}^T}{f_c^T}, r_c^T = \frac{\tau_{oct}^T}{f_c^T} \quad (3.6)$$

Dengan a dan b merupakan factor regresi parameter dari meridian tekan dan tarik benda uji beton, adapun nilai dari a, b, dan c merupakan hasil regresi linier dari pembebanan uniaksial dan triaksial. Dari penelitian Zhen dan Song, 2009 didapatkan nilai dari a, b, dan c seperti pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3. 2 Nilai konstnta untuk mendapatkan nilai factor regresi linier a, b, dan c

| Temperature levels (°C) | a | b | c |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| 20 | 0.6489 | 1.1328 | 0.0828 |
| 200 | 0.6388 | 1.1542 | 0.0751 |
| 300 | 0.6360 | 1.1784 | 0.0667 |
| 400 | 0.6276 | 1.2019 | 0.0589 |
| 500 | 0.6247 | 1.2320 | 0.0493 |
| 600 | 0.6219 | 1.2681 | 0.0384 |

Sumber : Zhen dan Song 2009

Tabel 3.2 memberikan kemudahan user dalam menentukan nilai dari factor regresi dari a, b, dan c. Zhen dkk memberikan perumusan regresi linier yang dapat digunakan dalam menganalisa nilai a, b, dan

c dengan variasi suhu yang ada sesuai dengan Persamaan 3.12, dengan T adalah pengaruh suhu dengan variasi ($20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600^{\circ}\text{C}$).

$$a = 0.0203 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0.0605 \left(\frac{T}{1000}\right) + 0.6503; \quad (R^2 = 0.9850) \quad (3.7)$$

$$b = 0.2548 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0.0760 \left(\frac{T}{1000}\right) + 1.1308; \quad (R^2 = 0.9994) \quad (3.8)$$

$$c = -0.0702 \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0.0337 \left(\frac{T}{1000}\right) + 0.0837; \quad (R^2 = 0.9999) \quad (3.9)$$

3.3.6. RUN PROGRAM (Analisa Non-Linier)

a. Parameter Concrete Damage Plasticity (CDP)

Dalam pendekatan kegagalan plastis, degradasi kekakuan ada dalam model plastisitas, (Simo dan Ju, 1987, dalam Jehoo dan Gregory, 1998). Keunggulan dari model CDP ini adalah pada degradasi kekakuan, dimana kondisi sebenarnya terpengaruh pada hubungan kegagalan CDP dari deformasi plastis yang dihasilkan dengan perumusan yang berkembang secara linier (Jehoo dan Gregory, 1998).

Dalam desain CDP dapat juga menggunakan material isotropic, dimana suatu fungsi dari hasil tes tekan uniaxial merupakan factor yang mempengaruhi tegangan efektif dan degradasi kekakuan elastis. Fungsi kekuatan untuk tegangan efektif digunakan untuk mengontrol perkembangan dari permukaan yang mengalami kelelahan, sehingga kalibrasi dengan hasil eksperimental akan sejalan (convinent). Pendekatan yang dilakukan pada suatu material isotropic dengan metode CDP, setelah melewati fase elastis akan beralih pada fase plastis dimana kondisi ini beton dianggap memiliki hardening sehingga nantinya akan ada dua factor yang akan berpengaruh diantaranya tegangan tarik dan tekan yang akan menghasilkan kegagalan yang diindikasikan dengan regangan plastis secara directional.

Menurut Hsuan-The dkk, 2004 bahwa dalam ACI Committee 318 nilai dari regangan untuk tegangan puncak atau peak stress digunakan nilai antara 0,002 s/d 0,003.

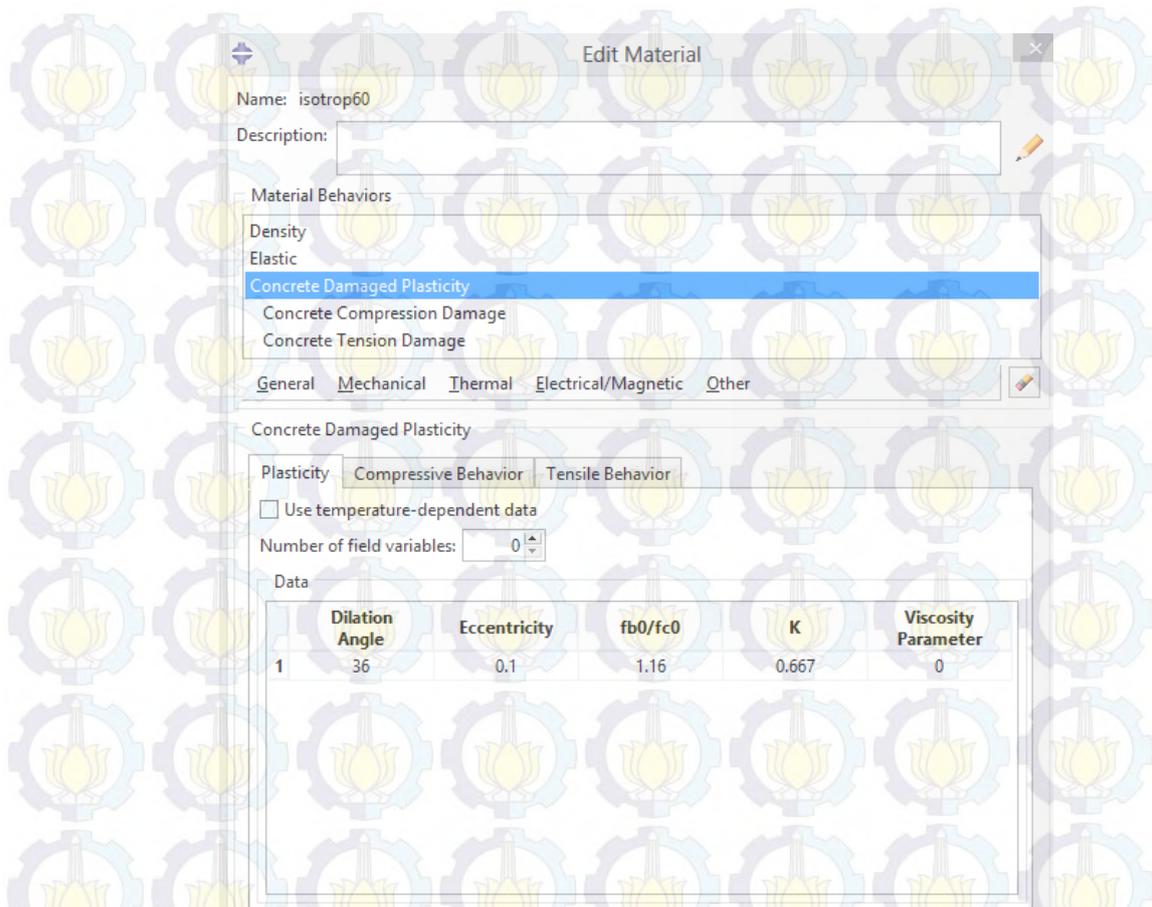
Adapun satuan yang digunakan dalam program Abaqus adalah bergantung pada penggunaan satuan dari awal permodelan, satuan yang dapat digunakan dalam Abaqus dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3 Tabel penggunaan satuan pada Abaqus

| Quantity | SI | SI (mm) | SI | US Unit (ft) | US Unit (inch) |
|----------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Length | m | mm | m | ft | in |
| Force | N | NN | kN | lbf | lbf |
| Mass | kg | tonne | tonne | slug | lbf s ² /in |
| Time | s | s | s | s | s |
| Stress | Pa (N/m ²) | Mpa (N/m ²) | kPa | lbf/ft ² | psi |
| Energy | J | mJ | KJ | ft lbf | in lbf |
| Density | kg/m ³ | tonne/mm ³ | tonne/m ³ | slug/ft ³ | lbf s ² /in ⁴ |

Sumber : Britto, 2005

Dalam melakukan simulasi a tau permodelan dengan menggunakan metode CDP (*Concrete Damage Plasticity*), dibutuhkan parameter-parameter untuk analisa perilaku non-linier benda uji yang akan dibuat simulasi. Adapun parameter yang akan dibutuhkan dapat dilihat pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3. 5 Parameter pada Abaqus untuk permodelasn CDP
(Concrete Damage Plasticity)

Pada jurnal Jankowiak dan Lodygowski, 2005 terdapat beberapa parameter CDP yang dapat digunakan untuk permodelan ini. Diantaranya terdapat notasi f_{b0} yang merupakan notasi dari kekuatan tekan dari uji beban biaxial sedangkan f_c adalah notasi dari nilai kuat tekan uniaksial.

$$\alpha = \frac{(f_{b0}/f_c)-1}{2(f_{b0}/f_c)-1} \quad (3.10)$$

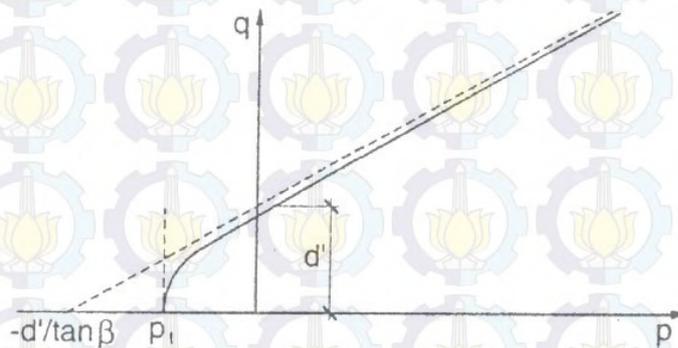
$$\gamma = \frac{3(1-\rho)}{2\rho+3} \quad (3.11)$$

Dimana α merupakan rasio dari kekuatan tekan biaxial dengan kuat tekan uniaksial pada beton tek terkekang. Sedangkan γ merupakan hasil perhitungan dari **Persamaan 3.11**, ρ adalah nilai yang didapat dari **Persamaa 3.12** . Dalam

analisa CDP γ merupakan notasi K pada Abaqus. Untuk mendapatkan nilai ρ dibutuhkan parameter J_2 sebagai parameter tegangan invariant kedua dari deviatori untuk tensil meridian dan compression meridian atau nilai dapat diasumsikan dengan nilai 0,64 -0,8.

$$\rho = \frac{(\sqrt{J_2})_{TM}}{(\sqrt{J_2})_{CM}} \quad (3.12)$$

Bentuk dari penelitian atau simulasi yang akan dilakukan akan berdampak pada perbedaan parameter yang digunakan, namun terdapat beberapa default pada parameter yang terdapat di Abaqus, diantaranya untuk eccentricity dari plastic model dapat direkomendasikan dan diasumsikan dengan nilai 0,1, dimana ketika nilai eksintrisiti adalah nol permukaan dari bidang meridian menjadi garis yang lurus, hal ini dapat dijelaskan melalui **Gambar 3.6** dibawah ini, (Kmiecik dan Kaminski,2001)



Gambar 3. 6 Permukaan Hyperbolic dari potensial plastis meridian pada bidang dengan eksentricity 0 (Kmiecik dan Kaminski,2001)

Dalam jurnalnya Kmiecik dan Kaminski, 2001 juga menyebutkan bentuk parameter default atau bawaan pada analisa Abaqus menggunakan metode CDP.

Tabel 3. 4 Default parameter untuk model CDP

| Parameter Name | Value |
|---------------------|-------|
| Dilatation Angel | 36 |
| Eccentricity | 0.1 |
| fbo/fco | 1.16 |
| K | 0.667 |
| Viscosity Parameter | 0 |

Sumber : (Kmiecik dan Kaminski, 2001)

Salah satu bentuk kurva tegangan-regangan hingga batas sebelum tegangan mencapai nilai maksimumnya disampaikan oleh Hognestad yang menggunakan persamaan parabola berderajat dua. Dari **Gambar 2.12**, f_c'' adalah tegangan maksimum yang dicapai oleh beton (dalam penelitian ini menggunakan nilai f_c'). Nilai f_c'' ini dapat berbeda dengan nilai f_c' karena perbedaan ukuran dan bentuk dari beton yang diuji tekan (Park & Paulay, 1974, hal. 12-14). Sedangkan untuk mendapatkan **Gambar 2.12** dapat digunakan **Persamaan 2.26 dan 2.27**

Karakteristik beton dalam kondisi elastis hingga plastis dalam uji tekan beton juga digambarkan oleh D.J. Carreira dan Chu K.H pada tahun 1985 melalui kurva tegangan-regangan kuat tekan beton pada Gambar 2.14. Kurva ini terbentuk berdasarkan **Persamaan 2.28 dan 2.29**.

Dimana σ_c adalah tegangan tekan dari beton, ϵ_c adalah regangan tekan dari beton dan f_c' adalah kuat tekan beton pada regangan ϵ_c' . Biasanya, puncak dari kuat tekan beton terletak pada regangan ϵ_c' sebesar 0.002 dan karakteristik dari beton diasumsikan sebagai elastik linier hingga mencapai $0.4 f_c'$ (Prakash, Anandavalli, Madheswaran, Rajasankar, & Lakshmanan, 2011, hal. 4).

Ada dua tipe cara untuk menentukan standar tes tarik beton yang pertama dari *modulus rupture* yang diatur dalam ASTM C78 dan C293. Dimana data yang diambil berasal dari elemen balok beton dengan dimensi penampang 6x6x30 inch dan panjang dan dibebani tiap 24 inch sepanjang bentang balok arah tegak lurus sumbu batang sehingga bersifat tes lentur. Regangan lentur hasilnya diolah dengan menggunakan notasi f_r yang diasumsikan dengan **Persamaan 2.34**

Sedangkan yang kedua dihasilkan dari *split cylinder test* (ASTM C496) dimana menggunakan silinder 6 dengan tinggi 12 inch, dimana akan ditekan dari kedua sisinya. Sehingga mengakibatkan tegangan arah sumbu batang dan tegangan tegak lurus sumbu batang, tegangan tegak lurus bersifat tarik sedangkan tegangan searah sumbu tekan bersifat tegangan tekan. *Split tensile strength* dirumuskan dengan **Persamaan 2.35**.

Beton merupakan bahan yang getas dan tidak mampu menahan tarik yang tinggi. Uji tarik beton secara langsung dianggap kurang realible karena sulitnya memegang spesimen dan menariknya dalam arah aksial. Untuk itu, biasanya dilakukan uji tarik tak langsung misalnya “Splitting Test”. Modulus tarik beton diperoleh berdasarkan SNI T-15-1991-03 Pasal 3.2.5 ditetapkan sebesar 0,7 kali $\sqrt{f'_c}$ (Wahyudi & A. Rahim, 1997, hal. 30).

Hubungan tegangan-regangan pada beton dalam tarik diasumsikan bahwa tegangan tarik meningkat secara linier terhadap regangan tarik hingga mencapai tegangan yang menyebabkan retak pada beton. Dalam hal ini, modulus elastisitas dari kuat tarik beton dapat diasumsikan sama dengan modulus elastisitas dalam kuat tekan beton, hal ini dijelaskan pada **Gambar 2.26**. (Park & Paulay, 1974).

b. Parameter Drucker Prager Analysis

Penelitian dengan menggunakan DPA untuk mengetahui perilaku model beton plastis bergantung pada tegangan dan regangan. Bagaimanapun ketepatan permodelan untuk mendapatkan perilaku kelelahan dan kegagalan

bergantung pada parameter yang digunakan, mulai dari kriteria leleh, hardening/ softening rule, dan flow rule. Dalam permodelan hardening dan softening dipengaruhi oleh regangan plastis dan rasio kekakuan pada model, sedangkan friction angel dipengaruhi oleh deformasi plastis, dan dilatation angel adalah fungsi dari regangan plastis aksial dan rasio kekakuan. (Jia- Fei dan Yu-Fei, 2011)

Dengan menggunakan permodelan dengan DruckerPrager ada beberapa material yang tidak dapat diprediksi seperti friction angel (β) dilatation angel (Ψ), konstanta a dan b, namun nilai a dapat didekatkan sebagai nilai 0,001-0,03 offset (Pin, 1998)

Menurut manual **Abaqus 6.10, 2010** Tujuan menggunakan analisa Drucker-Prager adalah sebagaiberikut :

1. Modifikasi Drucker-Prager dimaksudkan untuk model dengan bahan kohesif yang yang bergantung pada hasil tes tekan, seperti tanah, beton, dan batu;
2. Analisa ini bertujuan untuk menambah perilaku inelastis material model uji sehingga menyediakan mekanisme pengerasan inelastis untuk rekening untuk pemadatan plastik dan membantu untuk mengontrol volume dilatancy untuk hasil geser material;
3. Dalam analisa menggunakan Abaqus dapat digunakan untuk mensimulasi benda uji sehingga dapat menunjukkan inelastis deformasi jangka panjang melalui mekanisme kohesi di wilayah kegagalan geser dan konsolidasi pada mekanisme di wilayah tutup;
4. Dapat digunakan sinergi dengan analisa elastis linier, namun tidak dapat digunakan untuk analisa suatu benda uji yang berpori

Dalam penelitiannya Van Gool Bronwy, 2007 mendapatkan tabel untuk merumuskan parameter yang dapat digunakan sesuai dengan perbandingan jumlah agregat dengan jumlah semen dalam prosentase total 100% seperti pada **Tabel 1.1**. Parameter tersebut nantinya akan dijadikan panduan dalam

menginput parameter drucker-prager pada simlasi menggunakan benda uji 100mmx100mmx100mm.

Tabel 3. 5 Material Propertis untuk bahan campuran beton dalam analisa Drucker-Prager

| Paste Fill Mix | Elastic Parameter | | | Drucker-Prager Model Parameter | | | | Damping | |
|----------------|--------------------------------|---------------|-------|--------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|------------|----------|
| | ρ (kg/m ³) | E Mpa | ν | $\tan \beta$ | K | Ψ (deg) | σ_c (kPa) | ϵ | α |
| 74%S 2%C | 2056 | 4 | 0.2 | 1.066 | 0.778 | 0 | 81.2 | 0 | 0.000567 |
| 74%S 4%C | 2021 | 23 | 0.2 | 1.001 | 0.778 | 0 | 396.3 | 0 | 0.000567 |
| 74%S 6%C | 2021 | 81 | 0.2 | 0.9185 | 0.778 | 0 | 621.6 | 0 | 0.000567 |
| 76%S 2%C | 2130 | 23 | 0.2 | 0.9963 | 0.778 | 0 | 204.6 | 0 | 0.000567 |
| 76%S 4%C | 2003 | 56 | 0.2 | 0.9614 | 0.778 | 0 | 692.5 | 0 | 0.000567 |
| 76%S 6%C | 2003 | 98 | 0.2 | 0.9225 | 0.778 | 0 | 1176 | 0 | 0.000567 |
| 78%S 2%C | 2182 | 17 | 0.2 | 0.9054 | 0.778 | 0 | 252.1 | 0 | 0.000567 |
| 78%S 4%C | 2008 | 74 | 0.2 | 0.916 | 0.778 | 0 | 929.4 | 0 | 0.000567 |
| 78%S 6%C | 2088 | 140 | 0.2 | 0.9264 | 0.778 | 0 | 1747 | 0 | 0.000567 |
| 80%S 2%C | 2057 | 25 | 0.2 | 0.9054 | 0.778 | 0 | 358.6 | 0 | 0.000567 |
| 80%S 4%C | 2057 | 121 | 0.2 | 0.915 | 0.778 | 0 | 1272 | 0 | 0.000567 |
| 80%S 6%C | 2057 | 233 | 0.2 | 0.9224 | 0.778 | 0 | 2290 | 0 | 0.000567 |
| | S = | Solid Content | | C = | Cement Content | | | | |

Sumber : Van Gool Bronwy, 2007

Tegangan leleh untuk permukaan terbagi menjadi dua invariant, yang didefinisikan sebagai $p = -1/3 \text{trace } \sigma$, Pada manual **abaqus 6.10, 2010** Parameter untuk mendapatkan grafik kriteria tegangan untuk Drucker prager dirumuskan sebagai berikut

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (3.13)$$

$$t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (3.14)$$

$$t = \frac{q}{K} = \frac{1}{K} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3.15)$$

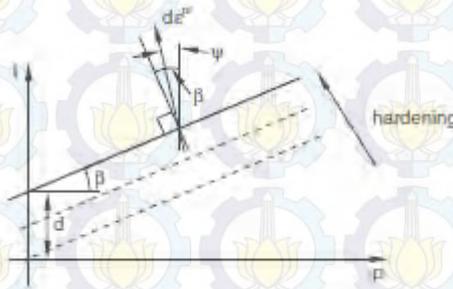
Dimana d adalah nilai kohesi dari material yang didapatkan menggunakan rumus dibawah ini, dengan kondisi untuk rumus yang menggunakan σ_c bila

hardening dari material dengan leleh uji tes tekan, sedangkan untuk rumus yang menggunakan σ_t bila hardening dari material dengan leleh uji tes tarik, dan untuk τ bila hardening material didefinisikan sebagai kohesi material tersebut.

$$d = \left(1 - \frac{1}{3} \tan \beta\right) \sigma_c \quad (3.16)$$

$$d = \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{3} \tan \beta\right) \sigma_t \quad (3.17)$$

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau \left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (3.18)$$

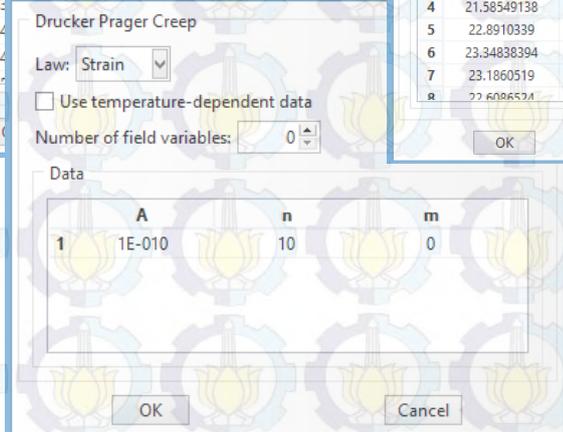
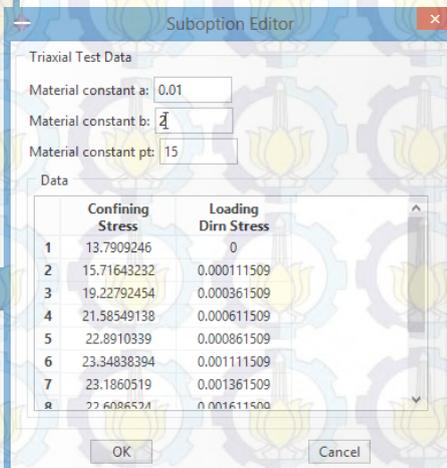
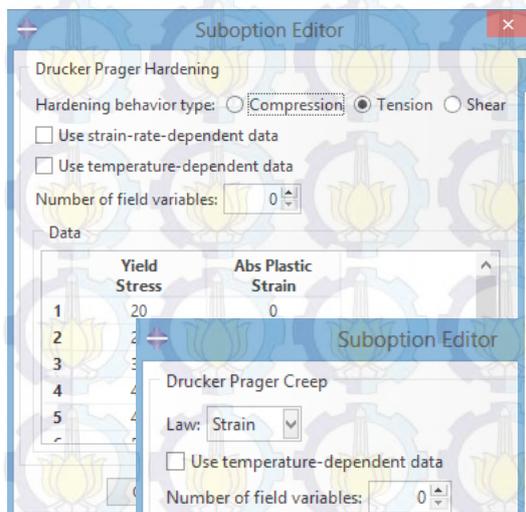
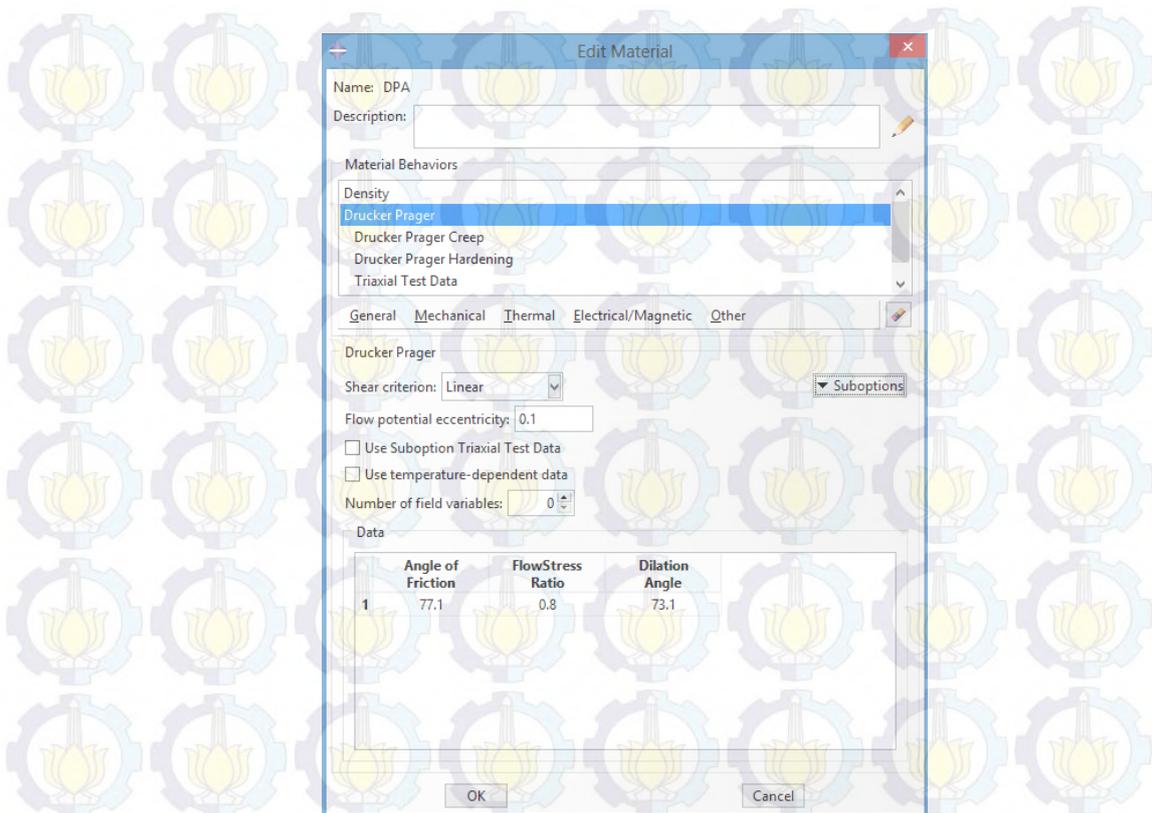


Gambar 3. 7 Model Drucker Prager dengan permukaan leleh bidang p-t

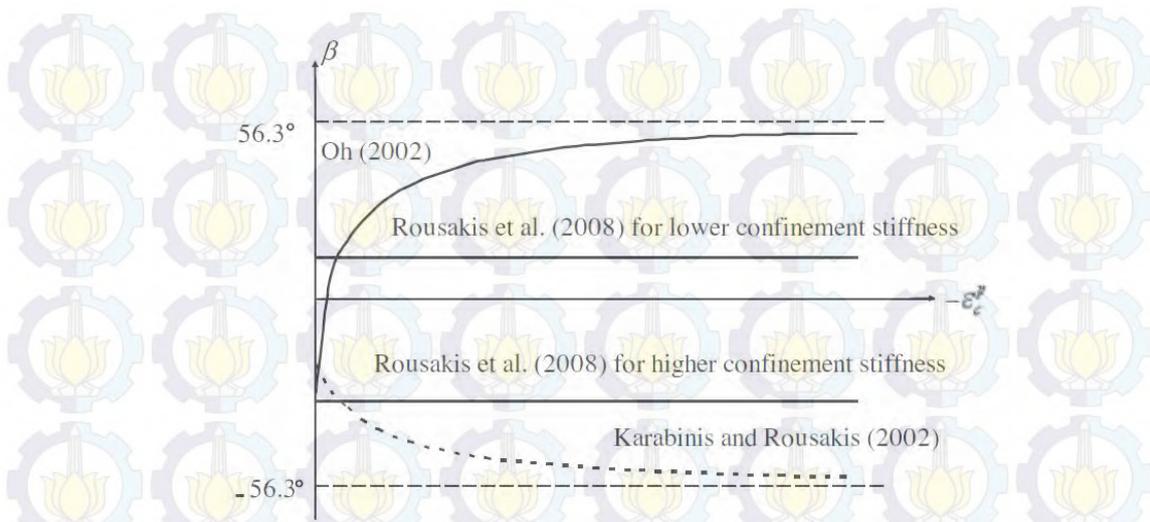
Gambar 3.7, menunjukkan model Drucker Prager dengan leleh permukaan pada arah bidang p-t. Untuk analisa Drucker-Prager dengan model linier dapat diasumsikan dengan **Persamaan (3.19) dan (3.20)**

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (3.19)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.20)$$



Gambar 3. 8 Parameter Drucker Prager Material pada menu Abaqus



Gambar 3. 9 Grafik nilai perbandingan dilatasi angel untuk permodelan (Jia dan Yu, 2011)

Gambar 3.9 menunjukkan nilai perbandingan dilatation angel β untuk permodelan yang dapat mengkonvert dilatation rate α , (Jia dan Yu, 2011)

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha \quad (3. 21)$$

Menurut Jia- Fei dan Yu-Fei, 2011 Pada permodelan DPA flow rule sangat berpengaruh terhadap hasil atau keakuratan permodelan yang akan dilakukan.

Nilai dari **flow stress ratio** bergantung pada factor-faktor berikut :

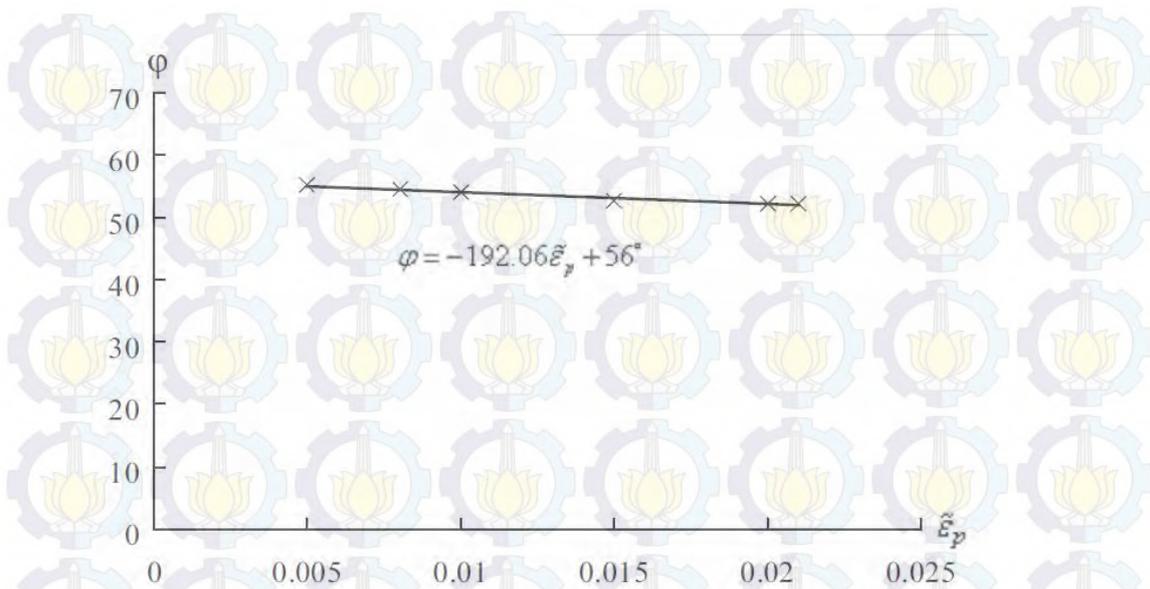
$$G = t - \tan\beta p - constanta \quad (3. 22)$$

$$p = \frac{-1(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (3. 23)$$

$$t = f(K) \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3. 24)$$

$$f(K) = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[1 + \frac{1}{K} - \frac{3\sqrt{3}}{2} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{\sqrt[3]{J_2}}{\sqrt{J_2}} \right)^3 \right] \quad (3. 25)$$

Dimana nilai dari K adalah antara 0,778 – 1 umumnya digunakan $\sqrt{3}$, dengan persyaratan untuk kegagalan dengan tekan bernilai negative dan untuk tarik bernilai positif.



Gambar 3. 10 Grafik variasi friction angel (Jia dan Yu., 2011)

Pada Jia- Fei dan Yu-Fei, 2011 untuk mendapatkan nilai dari fiction angel dapat menggunakan **Persamaan 3.26**

$$\varphi = 36.65^\circ - 1.1^\circ \left(\frac{f'c}{1000} \right) \quad (3. 26)$$

Menurut T.Yu, Teng, Y.L. Wong dan Dong, 2008, untuk mendapatkan nilai regangan plastis akibat beban aksial menggunakan perumusan dibawah ini :

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E_c} \quad (3. 27)$$

Untuk mendapatkan nilai dari tegangan dan regangan sebenarnya digunakan perumusan berikut :

$$\sigma_{true} = \sigma_{norm}(1 + \varepsilon_{norm}) \quad (3. 28)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \ln(1 + \varepsilon_{norm}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (3. 29)$$

Menurut NPL Manual 2007, Pada permodelan drucker –prager terdapat beberapa konstanta seperti , a yang merupakan tegangan hidrostatis yang merupakan factor

dari drucker prager, b merupakan eksponen dari eksponen drucker prager. Untuk mendapatkan konstanta a , b , dan p_t digunakan **Persamaan (3.30 s/d (3.32)**

$$aq^2 = p + p_1 \quad (3.30)$$

$$a = \frac{1}{3\sigma_T(\lambda-1)} \quad (3.31)$$

$$p_1 = a\lambda\sigma_T^2 \quad (3.32)$$

$$\lambda = \frac{3\sigma_s^2}{\sigma^2} \quad (3.33)$$

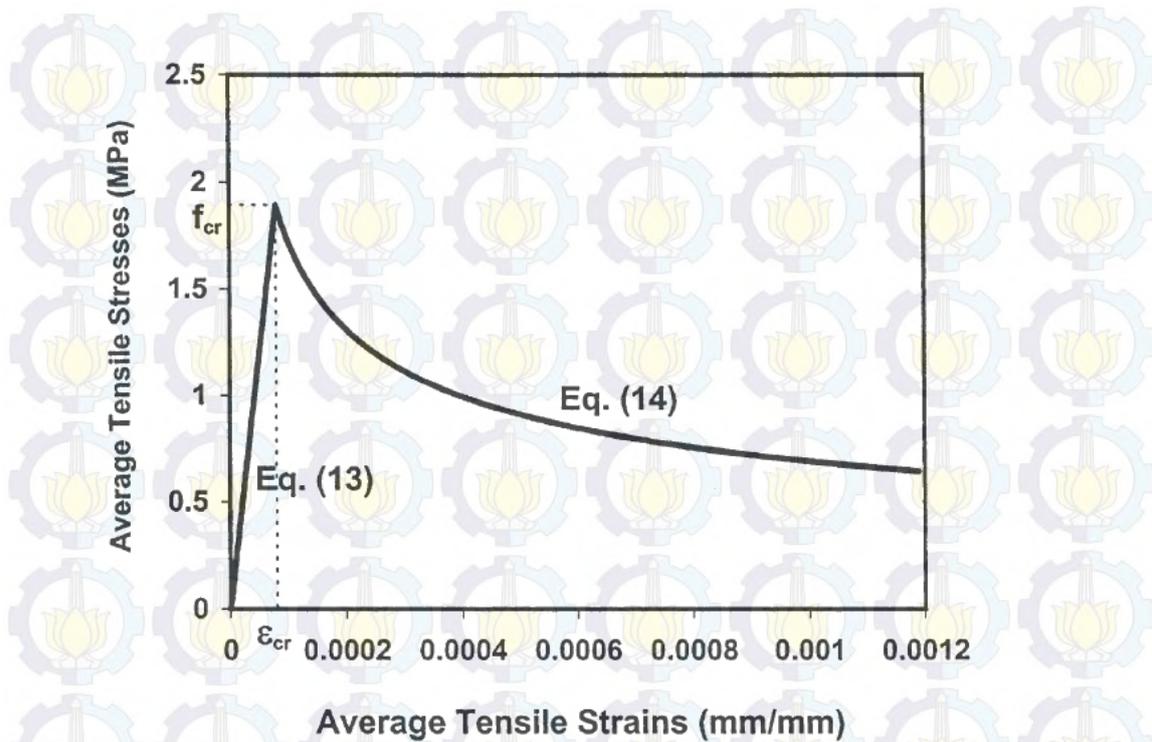
Sedangkan untuk mendapatkan plasytik strain dan tegangan plastis digunakan **Tabel 3.6**

Tabel 3. 6 Perumusan untuk tegangan dan regangan plastis

| | |
|---------------------------------|--|
| True Compressive Stress (MPa) | $\sigma_c = \frac{\sigma_c'}{(1 - \nu'\epsilon_c')^2}$ |
| True Compressive Strain | $\epsilon_c = \ln(1 + \epsilon_c')$ |
| True Compressive Plastic Strain | $\epsilon_c^p = \epsilon_c' - \frac{\sigma_c}{E}$ |

σ_c' , ϵ_c' , ν' , E ' nilai nominal untuk tegangan tekan dan tegangan tarik, poison rasio, modulus young. Nilai dari tegangan tekan dan tarik bisa bernilai negative

σ_c , ϵ_c , ϵ_c^p nilai tegangan tekan dan tegangan tarik serta regangan plastis. Tegangan tekan dan tarik bernilai negative



Gambar 3. 11 Grafik tegangan dan regangan untuk model konstitutif (Taijun dan Thomas, 2001)

Untuk mendapatkan grafik tersebut digunakan **Persamaan**

$$\sigma_1 = E_c \varepsilon_1 \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr} \quad (3.34)$$

$$\sigma_1 = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} \quad \varepsilon_1 > \varepsilon_{cr} \quad (3.35)$$

Pada drucker prager creep digunakan nilai A , n , dan m . Nilai A menurut Salvador dkk 2010,

$$\sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.36)$$

Atau dengan menggunakan parameter dari tegangan tekan σ_c

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_c = A - B \sigma_c \quad (3.37)$$

Untuk mendapatkan parameter A dan B digunakan **Persamaan 3.38**, c (kohesi), φ friction angel

$$A = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)} \quad (3.38)$$

$$B = \frac{2 \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)} \quad (3.39)$$

A, n, dan m merupakan nilai konstanta dari material parameter untuk retak yang secara spesifik sebagai fungsi dari temperature dan variable. Nilai m diambil antara $0.00 < m \leq 1.0$ stress eksponen untuk parameter retak. Sedangkan n adalah tegangan eksponen untuk parameter retak kedua

Tabel 3. 7 Pengambilan nilai untuk parameter n,

| Material Constant | Leighton Buzzard | Munich Sand | McCormick Ranch Sand |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Elastic Constants | E 11500 (psi) (79328 kPa) | 16500 psi (113685 kPa) | 90000 psi (620100 kPa) |
| | v 0.29 | 0.36 | 0.30 |
| Ultimate State Parameter | γ 0.1021 | 0.1051 | 0.0519 |
| | β 0.36242 | 0.747 | 0.36 |
| Phase Change Parameter | n 2.5 | 3.2 | 4.0 |
| Hardening Constants | b1 0.135 | 0.1258 | 4.88×10^{-7} |
| | b2 450.0 | 1355.0 | 714.0 |
| | b3 0.0047 | 0.001 | 0.004 |
| | b4 1.02 | 1.11 | 1.04 |
| Nonassociative Constant | κ 0.29 | 0.35 | |

Sumber : (Desai, 2012)

p_t merupakan nilai yang diambil dari perumusan dibawah ini, p_t merupakan factor hidrostatis triaksial tes.

bila hardening didefinisikan sebagai tegangan leleh uniaksial tekan

$$p_t = a\sigma_c^b - \frac{\sigma_c}{3} \quad (3.40)$$

bila hardening didefinisikan sebagai tegangan leleh uniaksial tarik

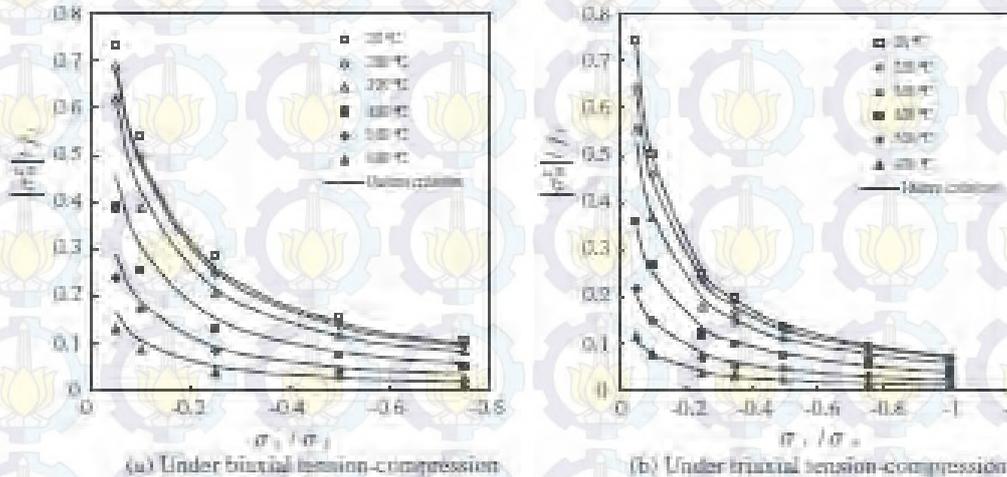
$$p_t = a\sigma_t^b - \frac{\sigma_t}{3} \quad (3.41)$$

bila hardening didefinisikan sebagai kohesi, d.

$$p_t = ad^b \quad (3.42)$$

3.3.7. Kesimpulan Simulasi

Dari hasil analisa diatas maka akan didapatkan tegangan dari arah x, y, dan z, dimana besarnya tegangan tergantung dari besarnya stress ratio yang digunakan dalam permodelan atau simulasi pada pembebanan triaxial dengan menggunakan program bantu berbasis finite elemen *Abaqus*. Nilai hasil analisa dengan menggunakan simulasi *Abaqus* dengan permodelan eksperimental akan dibandingkan hasilnya dan dibuatkan dalam sebuah **Tabel 3.1**. Kemudian akan dibuat grafik hubungan tegangan dan regangan, grafik tegangan σ_1 / σ_3 dengan $|\sigma_3^T / f_c|$, seperti pada Gambar 3.7 (a) dan Gambar 3.7 (b).



Gambar 3. 12 Grafik hubungan tegangan terhadap variasi temperature suhu ekstrem

Gambar 3.12 (a) dan **Gambar 3.12 (b)** dapat memperlihatkan pengaruh tegangan principal dari HPC (*High Performance Concrete*) setelah terkena perbedaan perilaku lingkungan (suhu yang ditentukan). **Gambar 3.7** terbentuk berupa bentuk grafik curve dengan lengkung kedalam sumbunya, perilaku dari grafik hasil uji eksperimental ini nantinya akan dibandingkan dengan grafik hasil pengujian dengan menggunakan simulasi *Abaqus*. Dari hasil uji ekeperimental Zhen-jun dan Yu-pu dapat disimpulkan bahwa pada beton HPC perilaku tegangan tekan ataupun tarik tidak berpengaruh , namun

hanya berpengaruh terhadap nilai dari tegangan tersebut, dimana tegangan compression (σ_c) dari beton lebih besar dari pada tegangan tarik beton (σ_t).

$$\sigma_T \leq \sigma_c E q \quad (3.43)$$

3.4. Studi Eksperimental Zhen-jun dan Song yu-pu

Dengan mendapatkan model analitis *finite elemen* diharapkan dapat merepresentasikan perilaku non-linier material beton yang terjadi dilapangan sehingga dapat dijadikan sarana dalam mengetahui perilaku struktur beton lebih detail. Diharapkan dengan adanya tesis ini praktisi dapat memodelkan perilaku beton secara triaxial tanpa melakukan uji laboratorium.

3.4.1. Review Penelitian

Penelitian Zhen dan Song, 2009 merupakan penelitian yang dilakukan untuk melihat bagaimana perilaku beton tidak terkekang dalam pengaruhnya terhadap suhu ekstrem. Penelitian dilakukan dalam laboratorium dengan material berupa :

- Cementititus
- Agregat kasar
- Agregat halus
- Superplastisizer
- Air
- Fly ash

Dimana dari material tersebut nantinya akan dibuat beton dengan factor air semen w/c 0,31 dengan kuat tekan pada umur 28 hari 60,16 MPa. Benda uji beton yang digunakan berupa segi empat dengan dimensi 100 mm x100mm x100mm, seperti yang terlihat dari **Gambar 3.13** contoh benda uji hasil eksperimental Zhen dan Song, 2009.



Fig. 4. Failure modes of plain HPC under multiaxial stress states at different temperatures.

Gambar 3. 13 Pola keretakan pada benda uji 100mm x100mm x100mm (Zhen dan Song, 2009).

Kemudian benda uji yang sudah jadi dan terbuat diberikan perlakuan khusus yaitu di curing untuk menghindari retak mikro yang dapat mengurangi kemampuan beton tersebut. Curing di lakukan pada kolam air dengan skala laboratorium, penelitian yang dilakukan Yu-pu dan Zhen-ju dilakukan pada *Laboratorium State Key of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology*.

Tabel 3. 8 Hasil analisa eksperimental penelitian

The triaxial strength index of plain HPC under various stress states and stress ratios after high temperatures.

| Temperature (°C) | Stress ratio $\alpha = \sigma_1/\sigma_2/\sigma_3$ | σ_{1f} (MPa) | σ_{2f} (MPa) | σ_{3f} (MPa) | Temperature (°C) | Stress ratio $\alpha = \sigma_1/\sigma_2/\sigma_3$ | σ_{1f} (MPa) | σ_{2f} (MPa) | σ_{3f} (MPa) |
|------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| 20 | 0.00:0.00:-1 | 0.00 | 0.00 | -60.16 | 400 | 0.00:0.00:-1 | 0.00 | 0.00 | -49.70 |
| | 1:0.00:0.00 | 5.08 | 0.00 | 0.00 | | 1:0.00:0.00 | 2.99 | 0.00 | 0.00 |
| | 0.05:0.00:-1 | 2.20 | 0.00 | -43.92 | | 0.05:0.00:-1 | 1.59 | 0.00 | -31.80 |
| | 0.10:0.00:-1 | 3.23 | 0.00 | -32.26 | | 0.10:0.00:-1 | 2.08 | 0.00 | -20.79 |
| | 0.25:0.00:-1 | 4.28 | 0.00 | -17.11 | | 0.25:0.00:-1 | 2.19 | 0.00 | -8.75 |
| | 0.50:0.00:-1 | 4.73 | 0.00 | -9.45 | | 0.50:0.00:-1 | 2.26 | 0.00 | -4.52 |
| | 0.75:0.00:-1 | 4.86 | 0.00 | -6.48 | | 0.75:0.00:-1 | 2.50 | 0.00 | -3.33 |
| | 0.05:-1:-1 | 2.23 | -44.64 | -44.64 | | 0.05:-1:-1 | 1.07 | -21.48 | -21.48 |
| | 0.10:-1:-1 | 3.02 | -30.18 | -30.18 | | 0.10:-1:-1 | 1.59 | -15.91 | -15.91 |
| | 0.25:-1:-1 | 3.76 | -15.05 | -15.05 | | 0.25:-1:-1 | 1.84 | -7.34 | -7.34 |
| | 0.35:-1:-1 | 4.11 | -11.73 | -11.73 | | 0.35:-1:-1 | 2.09 | -5.98 | -5.98 |
| | 0.50:-1:-1 | 4.19 | -8.37 | -8.37 | | 0.50:-1:-1 | 2.22 | -4.44 | -4.44 |
| 0.75:-1:-1 | 4.22 | -5.63 | -5.63 | 0.75:-1:-1 | 2.48 | -3.30 | -3.30 | | |
| 1:-1:-1 | 4.23 | -4.23 | -4.23 | 1:-1:-1 | 2.52 | -2.52 | -2.52 | | |
| 200 | 0.00:0.00:-1 | 0.00 | 0.00 | -63.96 | 500 | 0.00:0.00:-1 | 0.00 | 0.00 | -35.72 |
| | 1:0.00:0.00 | 4.81 | 0.00 | 0.00 | | 1:0.00:0.00 | 1.82 | 0.00 | 0.00 |
| | 0.05:0.00:-1 | 2.07 | 0.00 | -41.33 | | 0.05:0.00:-1 | 0.72 | 0.00 | -14.30 |
| | 0.10:0.00:-1 | 2.98 | 0.00 | -29.75 | | 0.10:0.00:-1 | 1.05 | 0.00 | -10.49 |
| | 0.25:0.00:-1 | 3.70 | 0.00 | -14.81 | | 0.25:0.00:-1 | 1.26 | 0.00 | -5.04 |
| | 0.50:0.00:-1 | 4.27 | 0.00 | -8.54 | | 0.50:0.00:-1 | 1.33 | 0.00 | -2.65 |
| | 0.75:0.00:-1 | 4.57 | 0.00 | -6.09 | | 0.75:0.00:-1 | 1.02 | 0.00 | -1.36 |
| | 0.05:-1:-1 | 1.94 | -38.71 | -38.71 | | 0.05:-1:-1 | 0.66 | -13.11 | -13.11 |
| | 0.10:-1:-1 | 2.75 | -27.52 | -27.52 | | 0.10:-1:-1 | 0.90 | -9.04 | -9.04 |
| | 0.25:-1:-1 | 3.53 | -14.12 | -14.12 | | 0.25:-1:-1 | 1.06 | -4.22 | -4.22 |
| | 0.35:-1:-1 | 3.55 | -10.15 | -10.15 | | 0.35:-1:-1 | 1.17 | -3.34 | -3.34 |
| | 0.50:-1:-1 | 3.98 | -7.96 | -7.96 | | 0.50:-1:-1 | 1.43 | -2.86 | -2.86 |
| 0.75:-1:-1 | 3.94 | -5.25 | -5.25 | 0.75:-1:-1 | 1.49 | -1.98 | -1.98 | | |
| 1:-1:-1 | 4.19 | -4.19 | -4.19 | 1:-1:-1 | 1.52 | -1.52 | -1.52 | | |
| 300 | 0.00:0.00:-1 | 0.00 | 0.00 | -61.64 | 600 | 0.00:0.00:-1 | 0.00 | 0.00 | -24.90 |
| | 1:0.00:0.00 | 4.14 | 0.00 | 0.00 | | 1:0.00:0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 0.05:0.00:-1 | 1.86 | 0.00 | -37.22 | | 0.05:0.00:-1 | 0.39 | 0.00 | -7.82 |
| | 0.10:0.00:-1 | 2.34 | 0.00 | -23.41 | | 0.10:0.00:-1 | 0.52 | 0.00 | -5.20 |
| | 0.25:0.00:-1 | 3.11 | 0.00 | -12.43 | | 0.25:0.00:-1 | 0.58 | 0.00 | -2.33 |
| | 0.50:0.00:-1 | 3.48 | 0.00 | -6.97 | | 0.50:0.00:-1 | 0.99 | 0.00 | -1.98 |
| | 0.75:0.00:-1 | 3.81 | 0.00 | -5.08 | | 0.75:0.00:-1 | 0.76 | 0.00 | -1.01 |
| | 0.05:-1:-1 | 1.68 | -33.51 | -33.51 | | 0.05:-1:-1 | 0.33 | -7.80 | -7.00 |
| | 0.10:-1:-1 | 2.22 | -22.22 | -22.22 | | 0.10:-1:-1 | 0.46 | -4.65 | -4.65 |
| | 0.25:-1:-1 | 2.70 | -10.80 | -10.80 | | 0.25:-1:-1 | 0.61 | -2.42 | -2.42 |
| | 0.35:-1:-1 | 3.15 | -9.00 | -9.00 | | 0.35:-1:-1 | 0.68 | -1.93 | -1.93 |
| | 0.50:-1:-1 | 3.42 | -6.85 | -6.85 | | 0.50:-1:-1 | 0.73 | -1.46 | -1.46 |
| 0.75:-1:-1 | 3.56 | -4.74 | -4.74 | 0.75:-1:-1 | 0.77 | -1.02 | -1.02 | | |
| 1:-1:-1 | 3.47 | -3.47 | -3.47 | 1:-1:-1 | 0.81 | -0.81 | -0.81 | | |

Note: σ_{1f} , σ_{2f} and σ_{3f} are the triaxial strengths in the three principal directions respectively.

Sumber : Zhen dan Song 2009

Benda uji tersebut nantinya akan diberi beban dengan perbandingan rasio tegangan seperti pada **Tabel 3.8**. pembebanan dilakukan dari tiga sumbu arah yaitu x, y, dan z. Rasio tegangan pada masing-masing sumbu dan perlakuan tekan atau tarik pada benda uji dapat menunjukkan perilaku dari beton tidak terkekang terhadap variasi suhu atau temperature ekstrem.

3.4.2. Penyelidikan Eksperimental

Dari hasil uji tekan dan tarik pada laboratorium, maka akan didapatkan tegangan dan regangan dari masing-masing sumbu terhadap masing-masing suhu yang diberikan pada beton benda uji tersebut. Kemudian dibuat grafik guna membandingkan perilaku beton terhadap perbedaan factor suhu ekstrem.

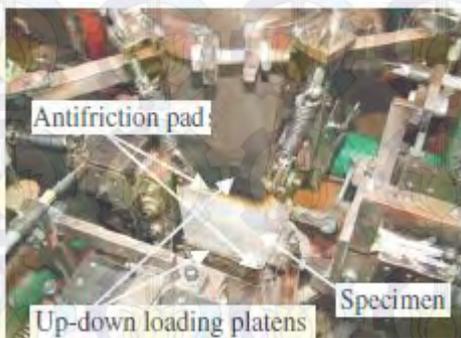
Dari **Gambar 3.7** dapat kita lihat perbedaan antara benda uji yang diberikan suhu normal dengan suhu ekstrem ($20^{\circ}\text{C} < T < 600^{\circ}\text{C}$). Dari grafik tersebut maka dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya suhu maka kemampuan benda uji terhadap tegangan yang terjadi akan semakin kecil dan berkurang. Dari hasil penelitian Zhen-ju dan Song yu-pu didapatkan 4 kesimpulan diantaranya :

1. Tidak terdapat perbedaan yang sangat jauh dan sangat besar dari observasi yang dilakukan terhadap benda uji 100 mm dengan spesimen HPC pada temperatur $20^{\circ}\text{C} < T < 600^{\circ}\text{C}$.
2. Efek dari perbedaan suhu tidak mempengaruhi terhadap kriteria kegagalan benda uji beton. Pembebanan uniaxial, biaxial dan triaxial pada benda uji beton yang paling mempengaruhi terhadap tegangan tekan dan tarik benda uji. Dalam kasus ini principal tensile stress merupakan kunci dari faktor kegagalan pada beton.
3. Beban ultimate dari tegangan 1 dan tegangan 3 (σ_{1f} dan σ_{3f}) dari elemen HPC terhadap beban multiaksial atau triaksial memiliki hasil tegangan tarik dan tekan yang lebih besar dibandingkan dengan benda uji dari elemen yang sama namun diberikan beban tes tekan uniaksial pada temperatur yang sama dengan benda uji dengan uji tekan dan tarik triaksial.

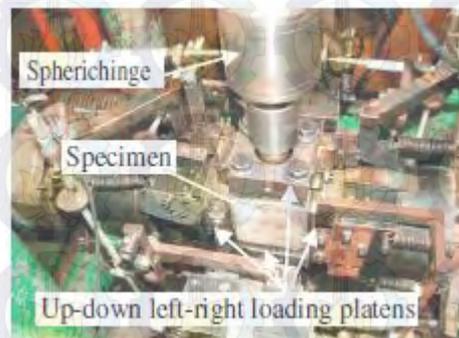
4. Formula dari kriteria kegagalan terhadap variasi temperatur dengan beban multiaksial tekan dan tarik untuk benda uji 100 mm dengan material HPC. Penelitian ini sangat berguna sebagai acuan dan dasar dalam melakukan assesment terhadap bangunan struktural yang telah terkena api (kebakaran).

3.4.3. Peralatan Pembebanan

Dalam melakukan uji eksperimental diperlukan alat pendukung yang memungkinkan untuk melakukan uji tekan dan uji tarik pada beton dari tiga arah sumbu utama. Namun alat tersebut masih terbatas untuk di negara Indonesia, adapun peneliti yang pernah melakukan penellitian beton triaxial loading salah satunya adalah Hen Zhen-jun dan Song Yu-pu, 2009. Peralatan pembebanan di lakukan pada *Laboratorium State Key of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology*.



(a) Pembebanan dengan beban tekan



(b) Pembebanan dengan beban tarik

*Gambar 3. 14 Simulasi percobaan eksperimental
(Zhen dan Song, 2009).*



Fig 1. The box-type electric furnace.

Gambar 3. 15 Alat untuk uji pembebanan triaksial pada beton kubus 100x100x100mm (Zhen dan Song , 2009).



Fig 2. The triaxial testing machine.

Gambar 3. 16 Proses pengujian benda uji beton 100x100x100mm (Zhen dan Song , 2009).

Gambar 3.15 dan **Gambar 3.16** menunjukkan alat yang digunakan dalam melakukan pembebanan triaksial terhadap benda uji kubus dengan dimensi 100x100x100mm dengan material untuk *High Performance*

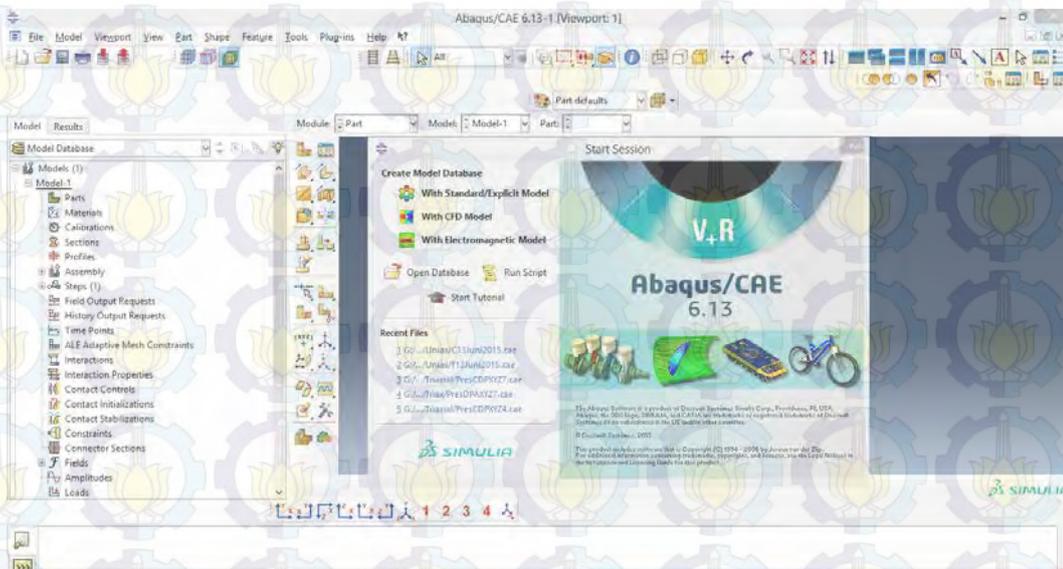
Concrete. Untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada beton benda uji tersebut juga dipasang alat didalam benda uji untuk mendapatkan data regangan yang terjadi pada tiap ratio pembebanan yang dilakukan hingga benda uji mengalami kegagalan dalam kondisi plastis.

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Abaqus merupakan perangkat lunak yang mampu mendefinisikan suatu penelitian eksperimental sebagai sebuah permodelan yang sederhana dan mempersingkat waktu. Secara analisa program bantu ini memiliki dua jenis produk, yaitu Abaqus Standart dan Abaqus Explicit. Dimana keduanya memiliki keunggulan masing-masing, Abaqus Standart merupakan perangkat analisa yang digunakan untuk memudahkan pengguna dalam mengaplikasikan penelitian eksperimental kedalam sebuah permodelan, dengan kata lain pengguna dimudahkan dalam memasukkan data parameter yang dibutuhkan dan untuk selanjutnya Abaqus akan mengolah permodelan dengan parameter yang sudah dimasukkan secara default. Sedangkan Abaqus Eksplisit dapat digunakan dengan memasukkan bahasa pemrograman kedalam Abaqus, dengan kata lain parameter dibuat dalam bentuk manuscript kemudian dimasukkan kedalam Abaqus, sehingga bagi pengguna yang masih awam dengan Abaqus akan kesulitan dalam memasukkan parameter yang dibutuhkan (lihat **Gambar 4.1**).



Gambar 4. 1 Dekstop layar pada Abaqus 6.13

Namun dari kedua jenis analisa tersebut terdapat juga kekurangan dari Abaqus Standart diantaranya, bila kondisi parameter tidak dalam kondisi yang

cocok (match) maka hasil dari permodelan tidak akan dapat berjalan (Abaorted) sehingga perlu adanya sinkronisasi antara parameter dengan analisa default dari program Abaqus. Lain halnya dengan Abaqus Eksplisit kita dapat menginput sesuai kebutuhan kita dengan bahasa manuscript dan dapat mengatur pengolahan analisa permodelan dengan bahasa yang diinginkan.

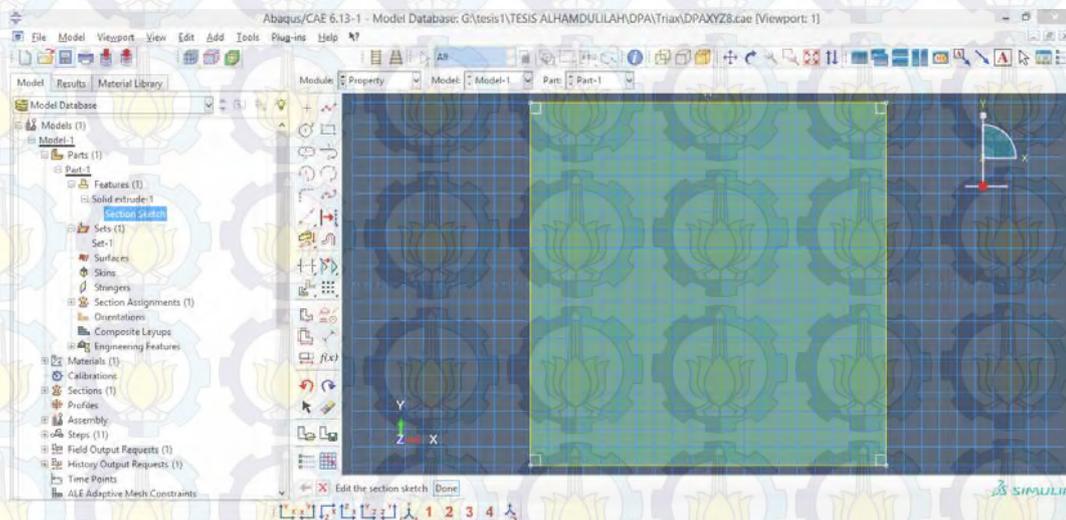
Penelitian ini menggunakan analisa Abaqus Standart dengan parameter Drucker Prager dan Concrete Damage Plasticity, dimana keduanya merupakan parameter plastis untuk benda uji yang akan dimodelkan. Untuk boundary condition yang digunakan pada benda uji yaitu, $U_3=0$ digunakan sebagai perletakkan pada uji uniaksial tekan, $U_1, U_2, U_3, R_1, R_2, R_3=0$ digunakan sebagai perletakkan uji uniaksial tarik, sedangkan untuk uji biaxial digunakan BC sumbu x $U_1, U_3=0$, BC sumbu y $U_1, U_2, U_3, R_1, R_2, R_3=0$, untuk uji triaxial digunakan BC sumbu x dan z $U_1, U_2, U_3, R_1, R_2, R_3=0$. Ini dengan asumsi menyamakan permodelan yang dilakukan secara eksperimental dengan permodelan pada Abaqus. Pembebanan dilakukan untuk permodelan dengan menggunakan beban pressure area, hal ini dimaksudkan agar dapat memberikan ratio pembebanan sesuai dengan eksperimental yang dilakukan. Sedangkan untuk kontrol hasil dilakukan dengan memprosentasekan selisih tegangan yang terjadi pada Abaqus dengan hasil eksperimental. Untuk memodelkan benda uji pada Abaqus Standart akan dibahas pada subbab selanjutnya. Adapun macam dan banyak benda yang dimodelkan perhatikan **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Tabel Penamaan pada tiap permodelan pada Abaqus

| No. | Analisa | Stress Ratio | | | Nama Notasi | Analisa | Nama Notasi |
|-----|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------|----------------------------|-------------|
| | | (Y) σ_1 | (Z) σ_2 | (X) σ_3 | | | |
| 1 | Drucker-Pager | 0.00 | 0.00 | -1 | DPAX | Concrete Damage-Plasticity | CDPX |
| 2 | | 1 | 0.00 | 0.00 | DPAY | | CDPY |
| 3 | | 0.05 | 0.00 | -1 | DPAXY1 | | CDPXY1 |
| 4 | | 0.10 | 0.00 | -1 | DPAXY2 | | CDPXY2 |
| 5 | | 0.25 | 0.00 | -1 | DPAXY3 | | CDPXY3 |
| 6 | | 0.50 | 0.00 | -1 | DPAXY4 | | CDPXY4 |
| 7 | | 0.75 | 0.00 | -1 | DPAXY5 | | CDPXY5 |
| 8 | | 0.05 | -1 | -1 | DPAXYZ1 | | CDPXYZ1 |
| 9 | | 0.10 | -1 | -1 | DPAXYZ2 | | CDPXYZ2 |
| 10 | | 0.25 | -1 | -1 | DPAXYZ3 | | CDPXYZ3 |
| 11 | | 0.35 | -1 | -1 | DPAXYZ4 | | CDPXYZ4 |
| 12 | | 0.50 | -1 | -1 | DPAXYZ5 | | CDPXYZ5 |
| 13 | | 0.75 | -1 | -1 | DPAXYZ6 | | CDPXYZ6 |
| 14 | | 1 | -1 | -1 | DPAXYZ7 | | CDPXYZ7 |
| 15 | | -1 | -1 | -1 | DPAXYZ8 | | CDPXYZ8 |

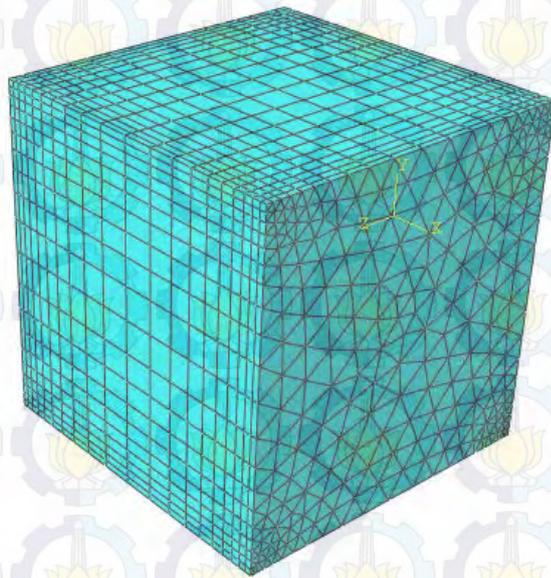
4.2. Tahap Persiapan

Persiapan yang perlu dilakukan adalah membuat permodelan dengan bentuk kubus berdimensi 100x100x100 mm dengan jenis solid part. Kemudian setelah terbentuk sebuah kubus dengan dimensi 100mm kemudian buat *mesh* pada objek tersebut dengan menggunakan pilihan seperti pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.4**. Untuk mengatur besar kecil dan ukuran dimensi dari *meshing* dapat dilakukan dengan mengubah nilai *Global Seeds* dengan asumsi bila nilainya 10 adalah ukuran dari satu panjang untuk masing-masing arah akan dibagi menjadi 10 partisi.

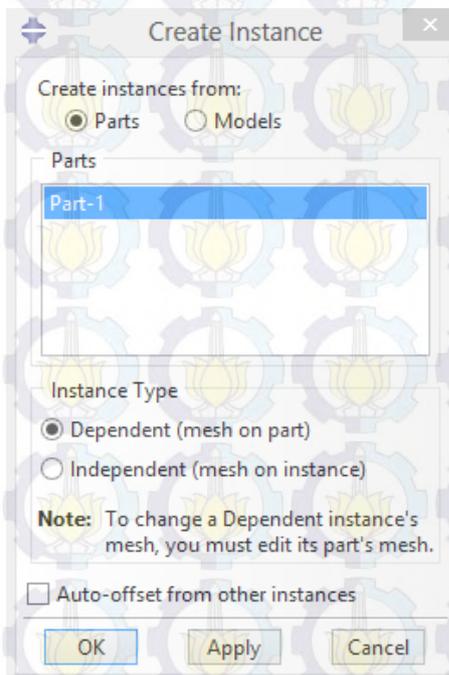


Gambar 4. 2 Bentuk persegi pada permodelan Abaqus Part Solid Extrusion dengan Ukuran 100

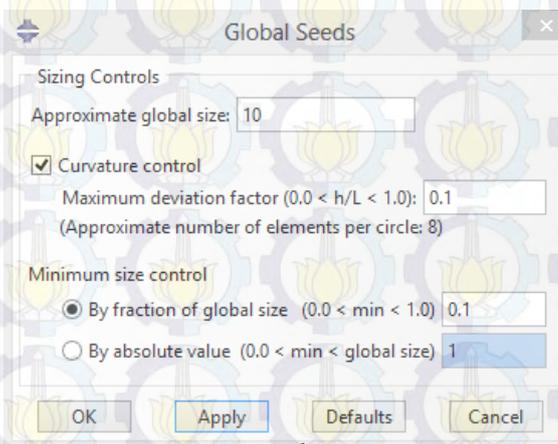
Selain itu bentuk *meshing* juga dapat diubah sesuai kebutuhan, bila membutuhkan tingkat akurasi yang tinggi maka perlu diperkecil *meshing* yang digunakan. Pada **Gambar 4.3** menunjukkan bahwa bentuk *meshing* dapat disesuaikan baik berbentuk kotak ataupun segitiga, selain itu dapat pula *meshing* dibuat lebih kecil pada bagian-bagian khusus yang kemungkinan menjadi lokasi kegagalan (*failure*).



Gambar 4. 3 Hasil Meshing pada permodelan benda uji dengan berbagai bentuk meshing



a.

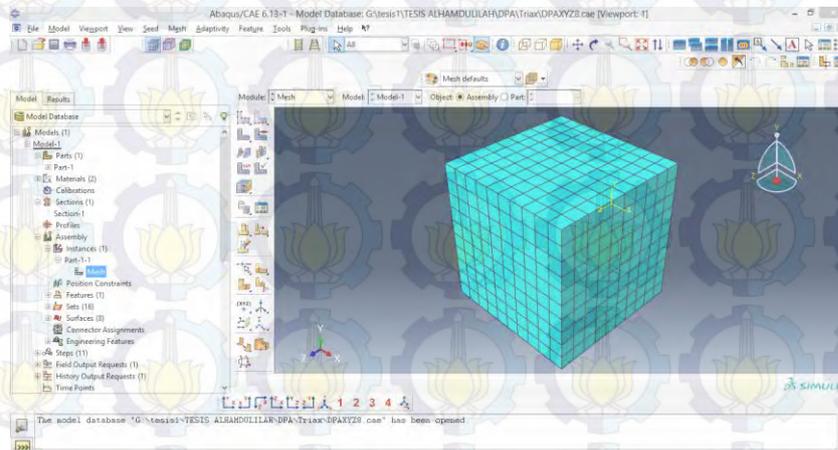


b.

Gambar 4. 4 (a) Submenu pada meshing untuk permodelan (b) Pengaturan untuk pebagian partisi pada Abaqus

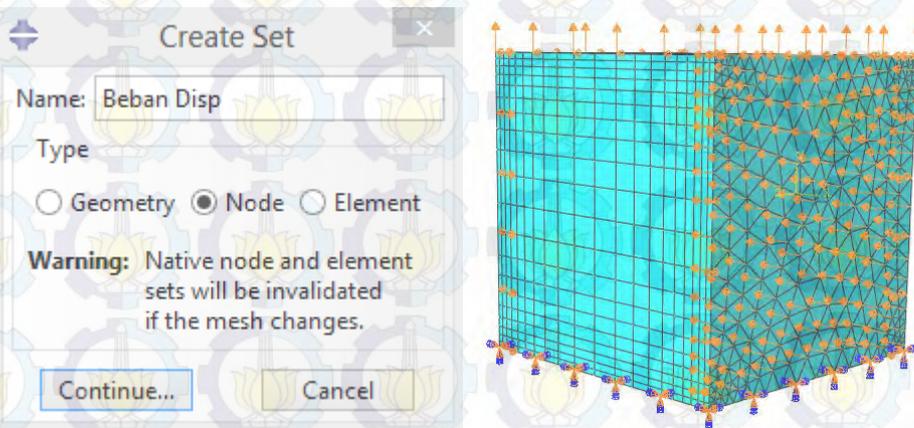
Pada penelitian ini digunakan satu jenis bentuk *meshing* yaitu bentuk persegi, ini ditujukan untuk kemudahan iterasi yang dilakukan Abaqus pada saat mengolah

data yang telah dimasukkan kedalam software. **Gambar 4.5** menunjukkan permodelan yang telah dibentuk sesuai dengan dimensi eksperimental dan telah di *meshing* dan kemudian akan dimasukkan parameter CDP dan DPA dengan *section solid homogenous*.



Gambar 4. 5 Hasil meshing menggunakan pembagian persegi pada benda uji yang dimodelkan

Dalam praktiknya untuk membuat pembebanan displacement dilakukan dengan submenu *boundary condition* dimana bila dalam satu permukaan yang sama akan terjadi kelebihan DOF yang akan membuat Abaqus *error* atau *aborted*. Untuk itu perlu dilakukan sedikit tambahan yaitu dengan membuat permukaan baru pada benda uji sebagai lokasi untuk memberikan beban displacement, sehingga Abaqus dapat bekerja mengolah data.

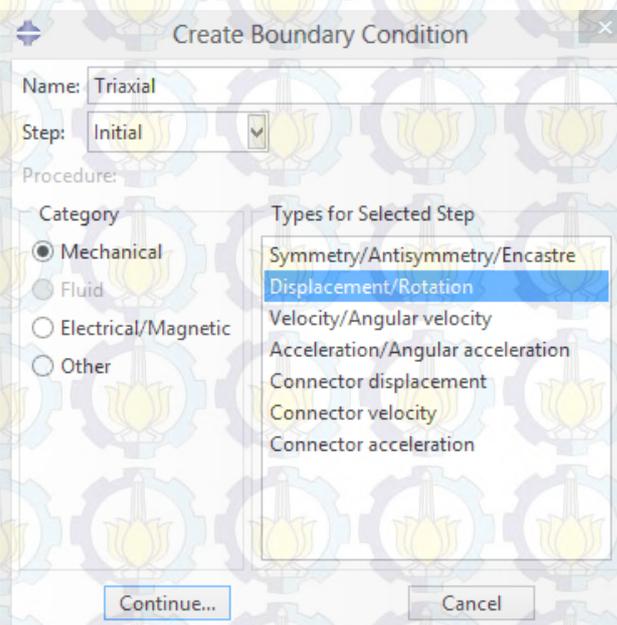


Gambar 4. 6 Pembuatan set-surface baru untuk pembebanan displacement

Gambar 4.6 menunjukkan pembebanan displacement yang naik satu tingkat *meshing* untuk menghindari penumpukan *boundary condition* pada satu titik (node) pada arah yang sama. Jadi kesimpulannya hanya boleh ada translasi dan rotasi pada satu titik (node) pada satu arah saja, sehingga bila satu titik terdapat $U_1, U_2, U_3, R_1, R_2, R_3 = 0$ dan $U_2 = 0.02$ maka akan terjadi *error* pada pekerjaan Abaqus, dan kemungkinan untuk dapat diiterasi oleh Abaqus sangat kecil.

4.2.1. Boundary Condition And Pressure Load

Boundary condition dilakukan dengan maksud untuk memberi batasan terhadap area, permukaan/bidang, dan node/titik. Bentuk batasan dapat berupa translasi ataupun rotasi, sedangkan nilainya bisa disesuaikan. **Gambar 4.7** menunjukkan menu yang terdapat pada *boundary condition* dimana digunakan *Displacement/Rotation* kemudian masukkan nilai nol pada U (translasi) atau R (rotasi) sehingga dapat tercipta suatu perletakkan pada benda yang dimodelkan. Sedangkan untuk beban dibuat dengan beban force tekan pada area (*pressure*). Adapun besarnya beban akan disesuaikan dengan *stress ratio* pada **Tabel 3.1** baik untuk arah sumbu tekan dan sumbu tarik.



Gambar 4. 7 Boundary Condition pada menu Abaqus

4.2.3.1. Perletakkan

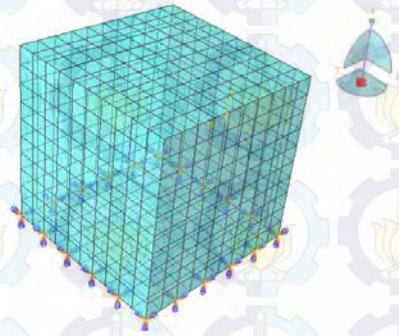
Perletakkan dibuat berdasarkan kesesuaian dengan pelaksanaan dilapangan sehingga batasan perletakkan dapat berbeda-beda untuk tiap kondisi multiaksial. Sebagai gambaran dapat dilihat pada **Tabel 4.2** dimana perletakkan untuk tension ataupun compression berbeda. Lihat **Gambar 4.8** dimana ditunjukkan bahwa untuk mendapatkan kuat tarik, beton di bonding pada pelat baja kemudian dibuatkan angkur pada baja tersebut sehingga beton dapat ditarik.

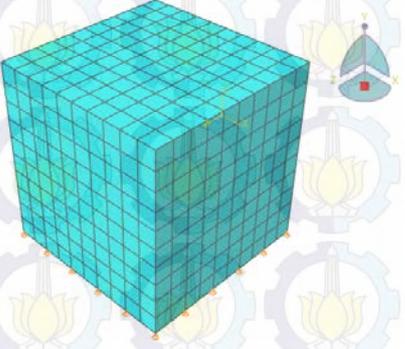
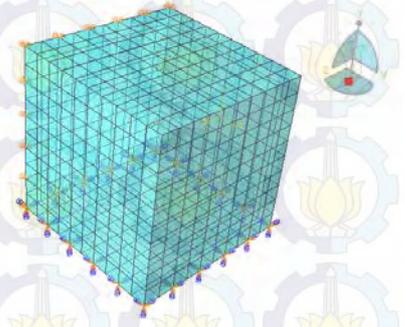
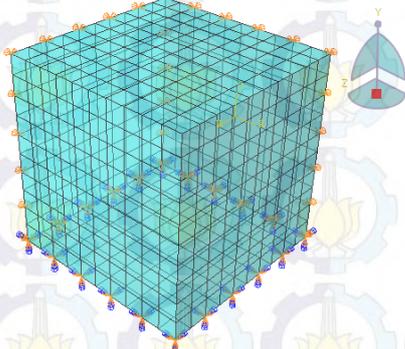


Gambar 4. 8 Permodelan pada eksperimental

(Zhen-ju dan Song yu-pu 2009)

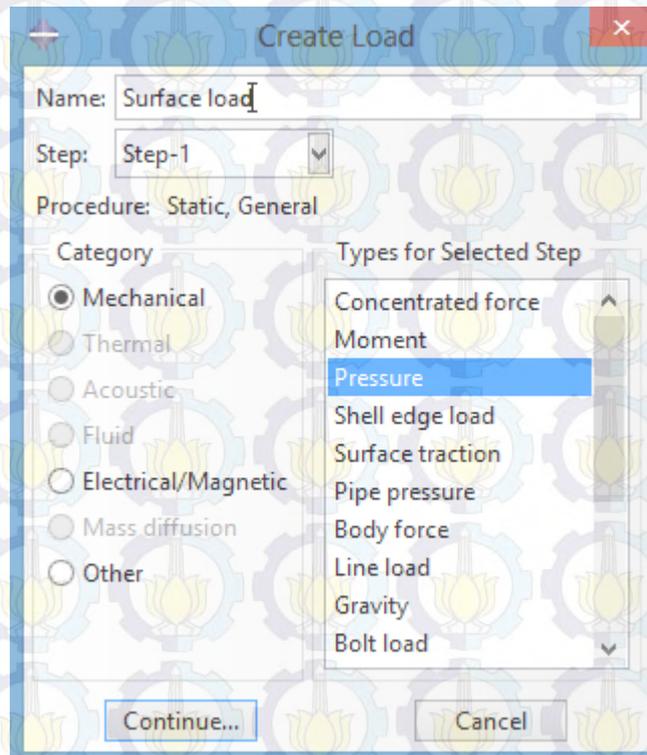
Tabel 4. 2 Permodelan Perletakkan untuk benda uji 100x100x100mm terhadap sumbu x,y, dan z

| | Y Axis | X Axis | Z Axis |
|---|--------|--------|--------|
|  | U1 = 0 | | |
| | U2 = 0 | - | - |
| | U3 = 0 | | |
| | R1 = 0 | | |
| | R2 = 0 | | |
| | R3 = 0 | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
|  | <p>UNIAXIAL COMPRESSION MODEL</p> | <p>Y Axis $U_2 = 0$</p> | <p>X Axis -</p> | <p>Z Axis -</p> |
|  | <p>BIAXIAL MODEL</p> | <p>Y Axis $U_1 = 0$ $U_2 = 0$ $U_3 = 0$ $R_1 = 0$ $R_2 = 0$ $R_3 = 0$</p> | <p>X Axis $U_1 = 0$ $U_3 = 0$</p> | <p>Z Axis -</p> |
|  | <p>TRIAXIAL MODEL</p> | <p>Y Axis $U_1 = 0$ $U_2 = 0$ $U_3 = 0$ $R_1 = 0$ $R_2 = 0$ $R_3 = 0$</p> | <p>X Axis $U_1 = 0$ $U_3 = 0$</p> | <p>Z Axis $U_1 = 0$ $U_3 = 0$</p> |

4.2.3.2. Pembebanan

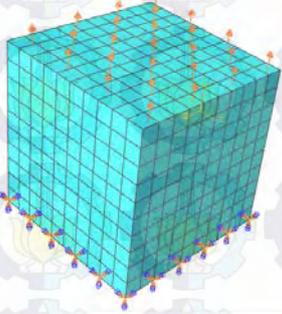
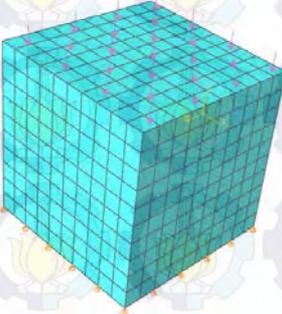
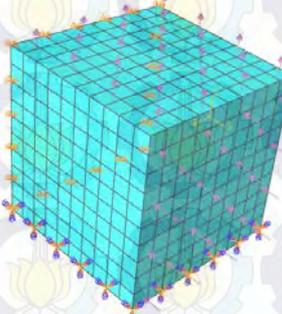
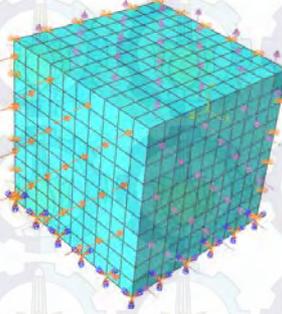
Pembebanan dilakukan menggunakan *pressure loading* , **Tabel 4.3** menunjukkan pola pembebanan untuk tiap bentuk permodelan pembebanan multiaksial. Adapun menu pada Abaqus yang dapat digunakan adalah pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4. 9 Cara membuat pembebanan dengan (pressure load)

Adapun untuk pola pembebanan pada tiap *stress ratio* dengan menggunakan **Tabel 4.3** , dimana beban puncak untuk kondisi tekan adalah 70 MPa sedangkan rasio digunakan untuk sebagai pengali pada beban puncak. Untuk *Step* dibuat dari *Step-1* sampai dengan *Step-10*.

Tabel 4. 3 Permodelan untuk pembebanan multiaksial pada permodelan

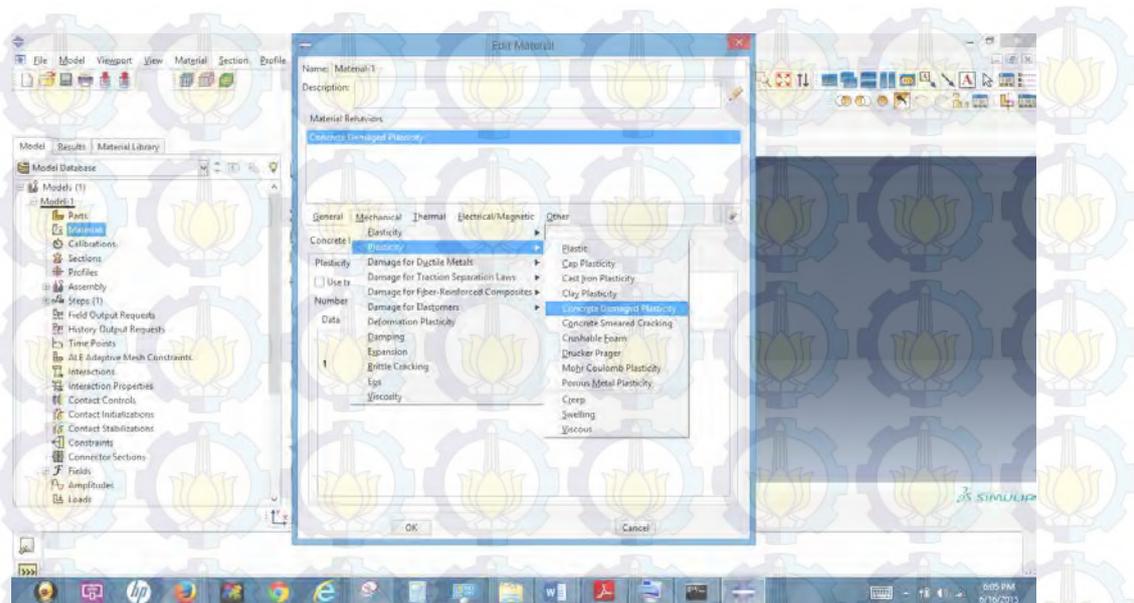
| | | | | |
|---|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|  | <p>UNIAXIAL TENSION MODEL</p> | <p>Y Axis Pressure (+)</p> | <p>X Axis -</p> | <p>Z Axis -</p> |
|  | <p>UNIAXIAL COMPRESSION MODEL</p> | <p>Y Axis Pressure (-)</p> | <p>X Axis -</p> | <p>Z Axis -</p> |
|  | <p>BIAXIAL MODEL</p> | <p>Y Axis Pressure (-)</p> | <p>X Axis Pressure (+)</p> | <p>Z Axis -</p> |
|  | <p>TRIAXIAL MODEL</p> | <p>Y Axis Pressure (-)</p> | <p>X Axis Pressure (+)</p> | <p>Z Axis Pressure (+)</p> |

Tabel 4. 4 Nilai pembebanan untuk analisa CDP dan DPA terhadap factor stress ratio

| Dimensi Simulasi | Stress Ratio | | | Pressure For CDP And DPA | | |
|---------------------|--------------|------------|------------|--------------------------|----------|----------|
| | σ_1 | σ_2 | σ_3 | P1 (Mpa) | P2 (Mpa) | P3 (Mpa) |
| 100x100x100 | 0.00 | 0.00 | -1 | - | - | -70 |
| | 1 | 0.00 | 0.00 | - | - | -70 |
| | 0.05 | 0.00 | -1 | 3.5 | - | -70 |
| | 0.10 | 0.00 | -1 | 7 | - | -70 |
| | 0.25 | 0.00 | -1 | 17.5 | - | -70 |
| | 0.50 | 0.00 | -1 | 35 | - | -70 |
| | 0.75 | 0.00 | -1 | 52.5 | - | -70 |
| | 0.05 | -1 | -1 | 3.5 | -70 | -70 |
| | 0.10 | -1 | -1 | 7 | -70 | -70 |
| | 0.25 | -1 | -1 | 17.5 | -70 | -70 |
| | 0.35 | -1 | -1 | 24.5 | -70 | -70 |
| | 0.50 | -1 | -1 | 35 | -70 | -70 |
| | 0.75 | -1 | -1 | 52.5 | -70 | -70 |
| | 1 | -1 | -1 | 70 | -70 | -70 |

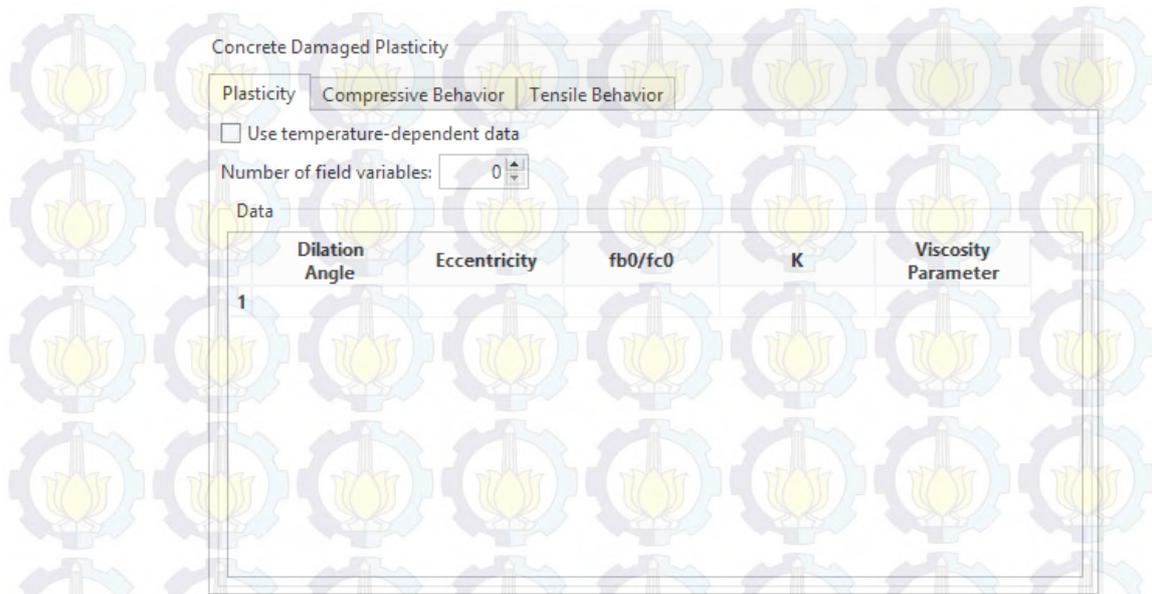
4.3. Permodelan Concrete Damage Plasticity (CDP)

Dalam pendekatan kegagalan plastis, degradasi kekakuan ada dalam model plastisitas, (Simo dan Ju, 1987, dalam Jehoo dan Gregory, 1998). Keunggulan dari model CDP ini adalah pada degradasi kekakuan, dimana kondisi sebenarnya terpengaruh pada hubungan kegagalan CDP dari deformasi plastis yang dihasilkan dengan perumusan yang berkembang secara linier (Jehoo dan Gregory, 1998).



Gambar 4. 10 Menu material untuk karakteristik plastis

Dalam desain CDP dapat juga menggunakan material isotropic, dimana suatu fungsi dari hasil tes tekan uniaxial merupakan factor yang mempengaruhi tegangan efektif dan degradasi kekakuan elastis. Fungsi kekuatan untuk tegangan efektif digunakan untuk mengontrol perkembangan dari permukaan yang mengalami kelelahan, sehingga kalibrasi dengan hasil eksperimental akan sejalan (convinent). Pendekatan yang dilakukan pada suatu material isotropic dengan metode CDP, setelah melewati fase elastis akan beralih pada fase plastis dimana kondisi ini beton dianggap memiliki hardening sehingga nantinya akan ada dua factor yang akan berpengaruh diantaranya tegangan tarik dan tekan yang akan menghasilkan kegagalan yang diindikasikan dengan regangan plastis secara directional.



Gambar 4. 11 Tampak menu pada concrete damage plasticity

4.3.1. Pendekatan Parameter Material

Parameter yang digunakan untuk pendekatan Concrete Damage Plasticity adalah Tabel 4.5 . Dimana nantinya akan ada sedikit pengesuaian untuk mendekati hasil eksperimental diantaranya parameter ψ menjadi 28° - 29° yang didapatkan dari Tabel 4.23 . Sedangkan nilai K merupakan perbandingan antara kurva meridian tension dengan meridian compression (lihat Gambar 12 dan Tabel 4.6).

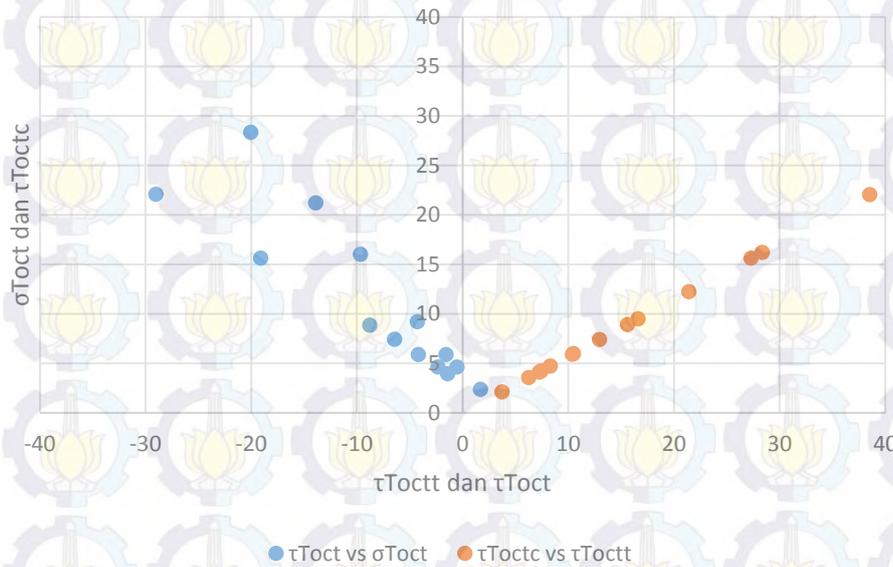
Tabel 4. 5 Tabel Parameter pendekatan untuk CDP

| Parameter Name | Value |
|---------------------|-------|
| Dlatation Angel | 36 |
| Eccentricity | 0.1 |
| fb0/fc0 | 1.16 |
| K | 0.667 |
| Viscosity Parameter | 0 |

Sumber : (Kmiecik dan Kaminski, 2001)

Data yang digunakan secara umum ada seperti dibawah ini, sedangkan untuk perhitungan meridian pada Tabel 4.6 digunakan Persamaan 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6. Kemudian dari hasil perhitungan tersebut diplotkan kedalam Gambar 4.12

Compressive Strength (f_c) : 60,16 MPa
 Temperatur Ruangan (T) : 20°C (diabaikan)
 Poisson Ration (ν) : 0,17
 Modulus Elastis (E) **Persamaan 2.41** : $0,9.22000.(60,16/10)^{0,3}$
 $= 33920,132$ MPa
 Density : $\frac{2456.77 \times 9.81}{10^9} = 24,1 \times 10^{-6}$



Gambar 4. 12 Grafik bidang meridian untuk oktahedra dan tensil

Tabel 4. 6 Hasil perhitungan tegangan untuk bidang meridian

| Oktaherda normal stress | | | Tensile Stress | | | |
|-------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|
| σ_{oct}^T | τ_{oct}^T | σ_o^T | Γ_t^T | Γ_c^T | τ_{octt}^T | τ_{octc}^T |
| -20.05333 | 28.359696 | -0.333333 | 0.2700289 | 0.4713958 | 16.24494 | 28.359174 |
| 1.6933333 | 2.394735 | 0.0281472 | 0.0354642 | 0.0619107 | 2.1335278 | 3.7245497 |
| -13.90667 | 21.241628 | -0.231161 | 0.2037295 | 0.3556554 | 12.256368 | 21.39623 |
| -9.676667 | 16.02318 | -0.160849 | 0.1581037 | 0.2760054 | 9.5115208 | 16.604486 |
| -4.276667 | 9.2412277 | -0.071088 | 0.0998581 | 0.1743246 | 6.0074608 | 10.487366 |
| -1.573333 | 5.8948923 | -0.026152 | 0.0706993 | 0.1234214 | 4.2532678 | 7.4250297 |
| -0.54 | 4.6452556 | -0.008976 | 0.0595535 | 0.1039639 | 3.5827378 | 6.2544697 |
| -29.01667 | 22.09473 | -0.482325 | 0.3667096 | 0.6401735 | 22.061247 | 38.512838 |
| -19.11333 | 15.65063 | -0.317708 | 0.2598899 | 0.4536958 | 15.634974 | 27.294342 |
| -8.78 | 8.867119 | -0.145944 | 0.1484321 | 0.2591214 | 8.9296738 | 15.588742 |
| -6.45 | 7.4670476 | -0.107214 | 0.1233001 | 0.215248 | 7.4177368 | 12.949318 |
| -4.183333 | 5.9208408 | -0.069537 | 0.0988513 | 0.1725671 | 5.9468968 | 10.381638 |
| -2.346667 | 4.6433345 | -0.039007 | 0.0790406 | 0.1379831 | 4.7550838 | 8.3010617 |
| -1.41 | 3.9880822 | -0.023438 | 0.0689375 | 0.1203458 | 4.1472808 | 7.2400057 |

Untuk mendapatkan grafik pada Gambar 4.14 digunakan persamaan 4.1 dan 4.2

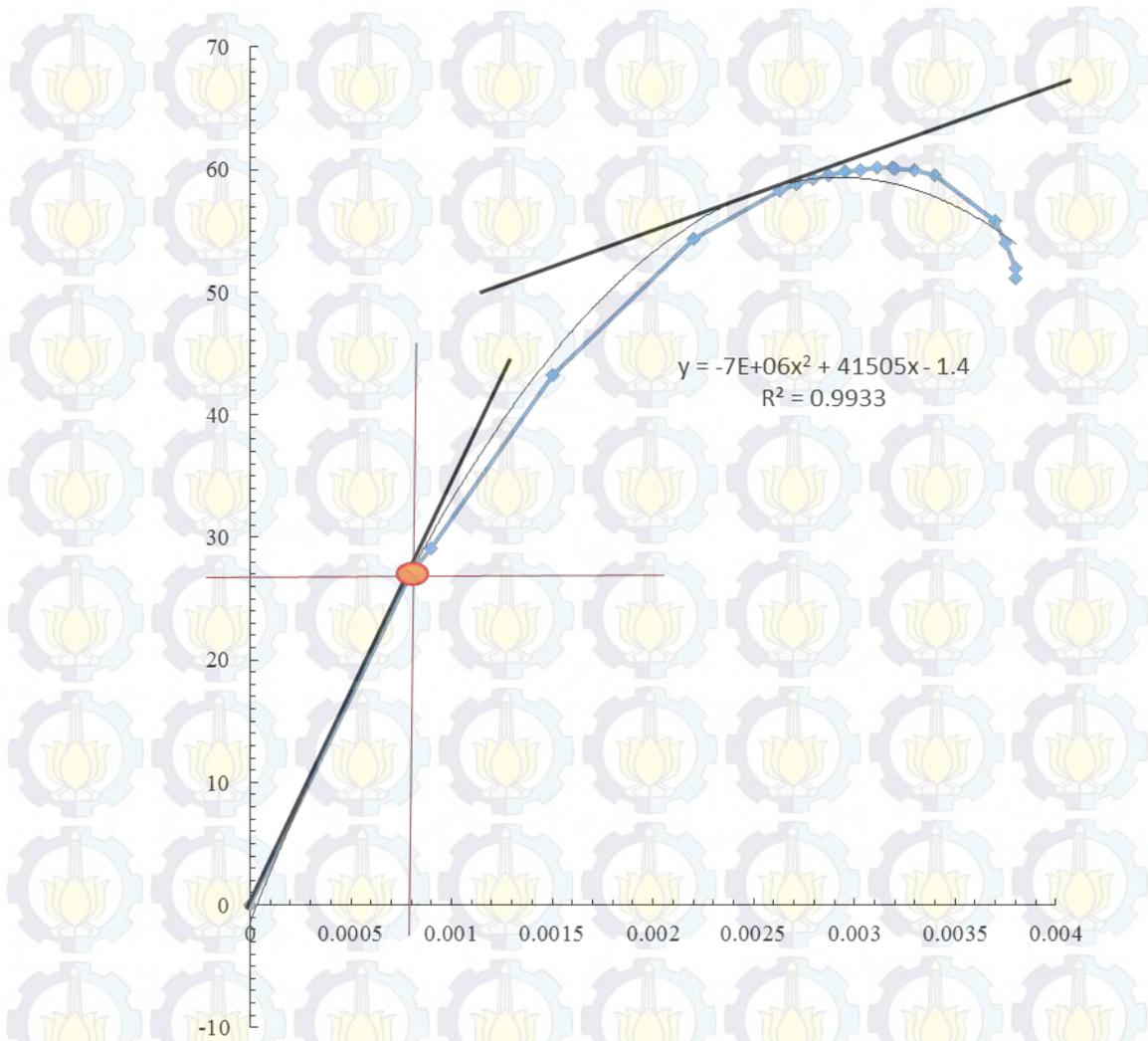
$$\sigma_1 = E_c \varepsilon_1 \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr} \quad (4.1)$$

$$\sigma_1 = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} \quad \varepsilon_1 > \varepsilon_{cr} \quad (4.2)$$

Tabel 4. 7 Hasil perhitungan pendekatan tegangan regangan untuk kondisi tension dan compression

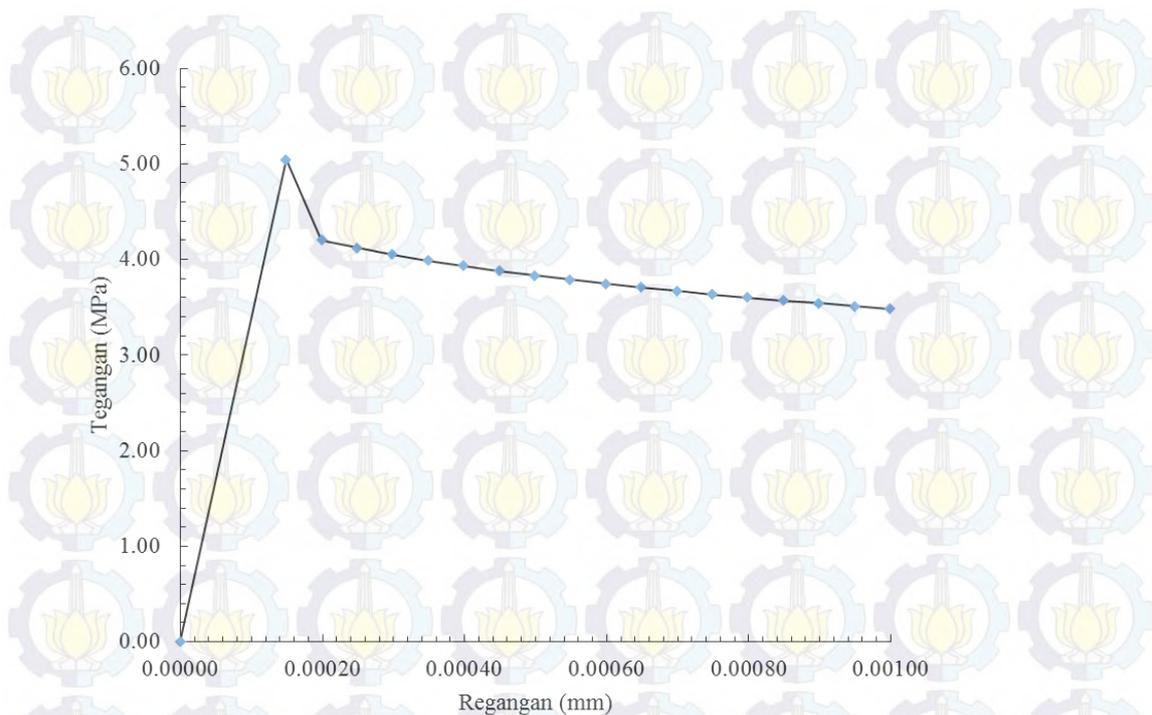
| Tension | | Compression | |
|---------|---------|-------------|----------|
| fc | εc | fc | εc |
| 5.04 | 0 | 27.072 | 0 |
| 4.20 | 0.00005 | 29.13882 | 4.1E-05 |
| 4.12 | 0.0001 | 43.25212 | 0.000225 |
| 4.05 | 0.00015 | 54.34605 | 0.000598 |
| 3.99 | 0.0002 | 58.30886 | 0.000913 |
| 3.93 | 0.00025 | 58.79998 | 0.000979 |
| 3.88 | 0.0003 | 59.21554 | 0.001047 |
| 3.83 | 0.00035 | 59.55555 | 0.001117 |
| 3.79 | 0.0004 | 59.82 | 0.001189 |
| 3.75 | 0.00045 | 60.00889 | 0.001263 |
| 3.71 | 0.0005 | 60.12222 | 0.00134 |
| 3.67 | 0.00055 | 60.16 | 0.001419 |
| 3.64 | 0.0006 | 60.05 | 0.00143 |
| 3.60 | 0.00065 | 59.98 | 0.001532 |
| 3.57 | 0.0007 | 59.5 | 0.001646 |
| 3.54 | 0.00075 | 55.8 | 0.002055 |
| 3.51 | 0.0008 | 54 | 0.002158 |
| 3.48 | 0.00085 | 52 | 0.002267 |
| 3.46 | 0.0009 | 51.136 | 0.002292 |

Sedangkan untuk pendekatan terhadap parameter tegangan-regangan tekan dan tarik dapat dihitung dengan menggunakan **persamaan 2.26** dan **2.27** untuk tegangan-regangan tekan, serta **persamaan 4.1** dan **4.2** untuk pendekatan tegangan-regangan tarik. Untuk grafik hasil perhitungan dapat dilihat pada **Gambar 4.13** dan **Gambar 4.14**.



Gambar 4. 13 Grafik hubungan tegangan regangan untuk kondisi compression

Pada **Gambar 4.13** dapat diperhatikan diasumsikan untuk beton uji mengalami tegangan yang masih linier pada tegangan nol sampai dengan 27.072 MPa. Sehingga diasumsikan bahwa pada kondisi linier gradient kurva akan sejajar pada bidang $E = \sigma/\epsilon$.



Gambar 4. 14 Grafik hubungan tegangan regangan untuk kondisi tension

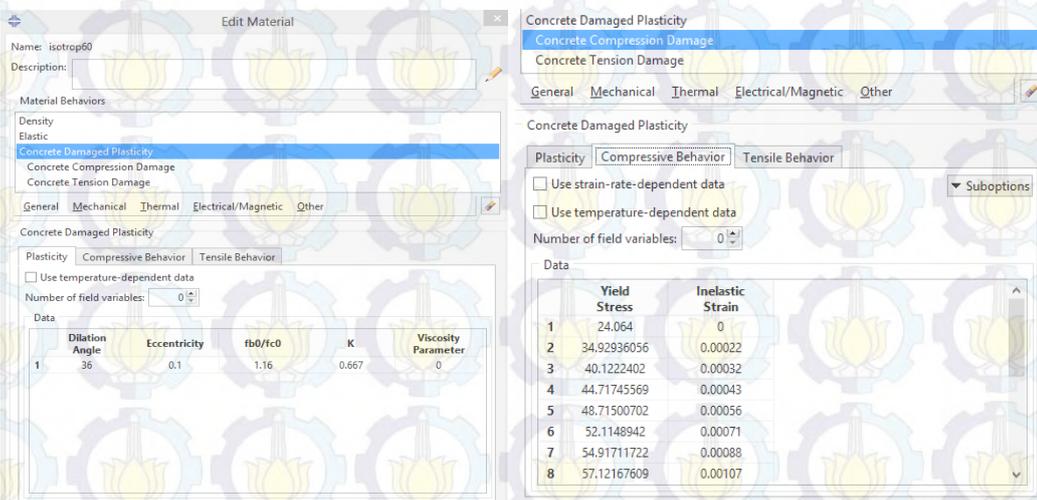
Pada subbab sebelumnya telah dibahas sedikit mengenai sudut dilatasi dan juga sudut friksi. Dimana pada permodelan ini digunakan pendekatan melalui **Gambar 4.25** pada pembahasan Drucker Prager kemudian dilakukan perhitungan dengan **Perumusan 4.7** dan **4.8**, dimana rumus tersebut mengasumsikan hubungan nilai sudut friksi dan sudut dilatasi (lihat **Tabel 4.9**).

Sudut yang dibentuk dari bidang p-q pada subbab Drucker Prager merupakan nilai sudut friksi dari benda uji eksperimental. Sehingga dari beberapa percobaan didapatkan parameter benda uji untuk Concrete Damage Plasticity menggunakan **Tabel 4.8**.

Untuk proses memasukkan data dapat dilihat pada **Gambar 4.15** dimana dapat diperhatikan bahwa dalam parameter plastis CDP terdapat suboption Compression Behavior dan Tensile Behavior dimana keduanya merupakan data dari **Tabel 4.7**. Setelah permodelan siap maka dibuat *Step* untuk analisa pada Abaqus. Pembuatan *Step-1* merupakan nilai dari 70 MPa dikalikan dengan ratio dibagi dengan 10 *Step*, nantinya hasilnya akan berupa *Step-1* sampai dengan *Step-10*.

Tabel 4. 8 Data parameter pendekatan untuk permodelan CDP pada pengujian permodelan pada Abaqus

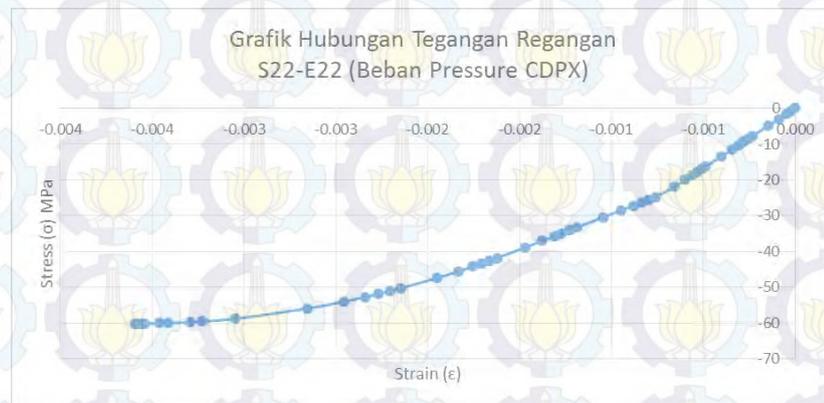
| Parameter Name | Value |
|---------------------|-------|
| Dilatation Angel | 29 |
| Eccentricity | 0.1 |
| f_{b0}/f_{c0} | 1.16 |
| K | 0.778 |
| Viscosity Parameter | 0 |



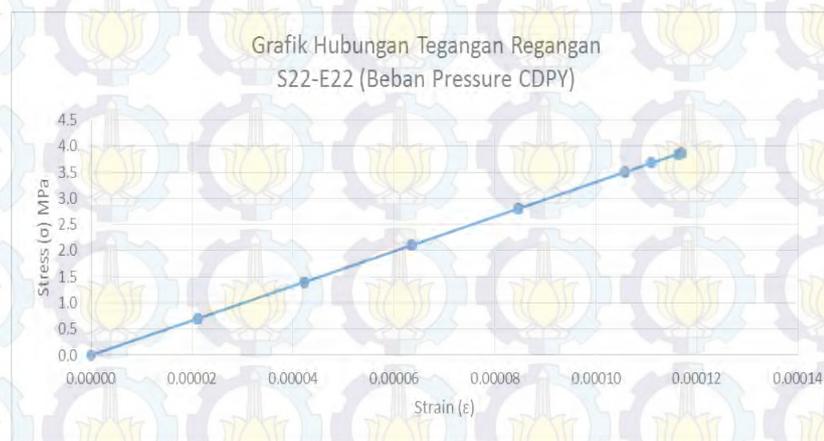
Gambar 4. 15 Submenu pada Abaqus (Submenu pada Perilaku Beton Tekan)

4.3.2. Analisa Dan Hasil CDP

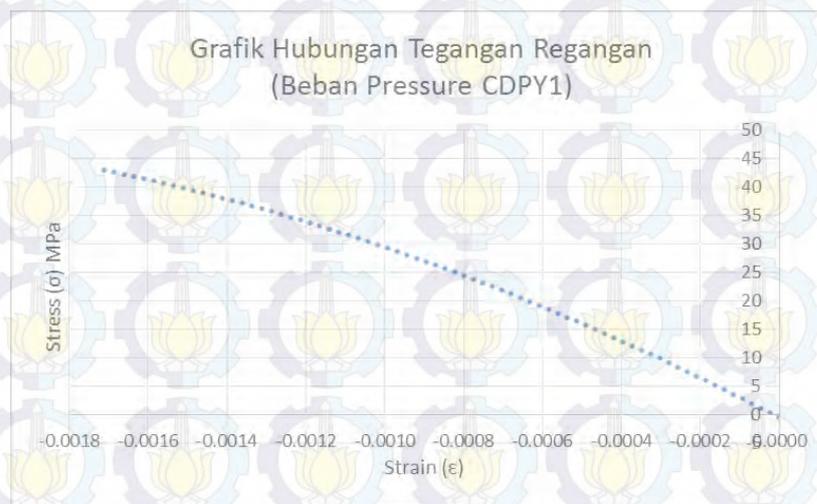
Hasil dari permodelan *concrete damage plasticity* diperoleh data tegangan regangan dengan menggunakan beban *pressure*. **Gambar 4.16** menunjukkan grafik hubungan tegangan dan regangan dari benda uji uniaksial tekan. Dari grafik tersebut dapat diketahui tegangan ultimate terjadi pada tegangan 60.16 MPa dengan nilai regangan 0.0038. sedangkan untuk **Gambar 4.17** menunjukkan hubungan tegangan dan regangan tarik benda uji dimana kegagalan dicapai pada beban 4.86 MPa pada regangan 0.000118. Karena digunakan beban *pressure* maka ekor plastis tidak dapat muncul untuk mendapatkannya diperlukan *pembebanan displacement*.



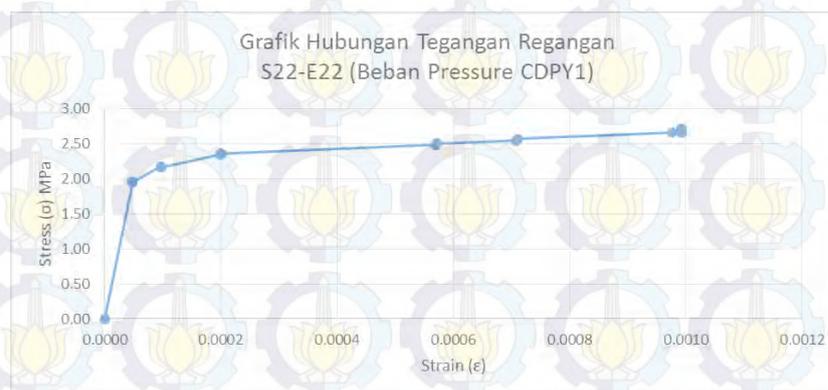
Gambar 4. 16 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan CDP
Compression (CDPX)



Gambar 4. 17 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan CDP
Tension (CDPY)



Gambar 4. 18 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu xx pada permodelan biaxial CDP dengan ratio (0.05 ,0 ,-1)



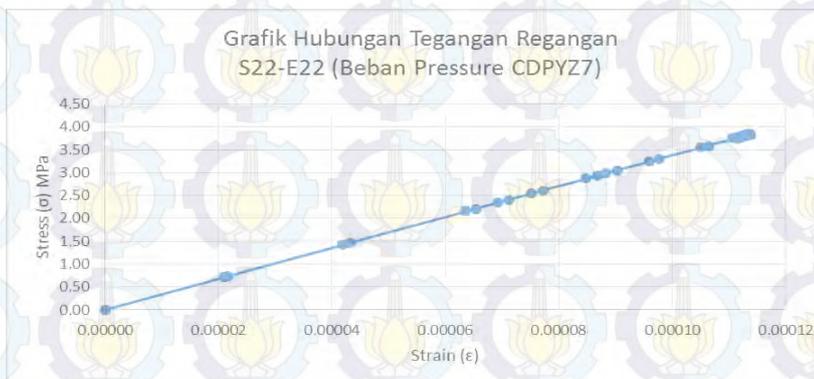
Gambar 4. 19 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu yy pada permodelan biaxial CDP dengan ratio (0.05 ,0 ,-1)

Pada permodelan menggunakan beban biaxial didapatkan tegangan tarik 0.98MPa dan tekan 30.08MPa, jika dibandingkan prosentase selisih dari permodelan dengan eksperimental mencapai 28.49% lihat **Gambar 4.18 dan 4.19**. Sedangkan untuk permodelan pada **Gambar 4.20 dan 4.21** dengan menggunakan beban triaksial dengan parameter CDP didapatkan hasil untuk tegangan $\sigma_{xx}=\sigma_{zz}$, namun karena ada perbedaan bidang sumbu yang dianut oleh peneliti sebelumnya namun bentuk permodelan serta tampaknya dibuat sama sehingga didapatkan tegangan $\sigma_1=3.91$ MPa sedangkan untuk tegangan $\sigma_2=\sigma_3=4.72$ Mpa. Bila dibandingkan dengan data eksperimental didapatkan prosentase 1.65%. Dengan

demikian dapat diambil sebuah kesimpulan bahwa pendekatan yang dilakukan akan mendekati akurat bila kondisi rasio tegangan mendekati 1 atau -1 sedangkan semakin kecil perbandingan rasionya maka semakin besar prosentase selisih yang didapatkan dan semakin kecil akurasi yang dihasilkan dengan menggunakan permodelan parameter *concrete damage plasticity*. Sedangkan hasil untuk simulasi lainnya dapat dilihat pada **Lampiran(b)**.



Gambar 4. 20 Grafik hubungan tegangan regangan sumub $xx=zz$ pada permodelan triaxial CDP dengan ratio (1 , -1 ,-1)



Gambar 4. 21 Grafik hubungan tegangan regangan sumub yy pada permodelan triaxial CDP dengan ratio (1 , -1 ,-1)

4.4. Permodelan Drucker Prager Analysis

Penelitian dengan menggunakan DPA untuk mengetahui perilaku model beton plastis bergantung pada tegangan dan regangan. Bagaimanapun ketepatan permodelan untuk mendapatkan perilaku kelelahan dan kegagalan

bergantung pada parameter yang digunakan, mulai dari kriteria leleh, hardening/ softening rule, dan flow rule. Dalam permodelan hardening dan softening dipengaruhi oleh regangan plastis dan rasio kekakuan pada model, sedangkan friction angel dipengaruhi oleh deformasi plastis, dan dilatation angel adalah fungsi dari regangan plastis aksial dan rasio kekakuan. (Jia- Fei dan Yu-Fei, 2011)

Dengan menggunakan permodelan dengan DruckerPrager ada beberapa material yang tidak dapat diprediksi seperti friction angel (β) dilatation angel (Ψ), konstanta a dan b, namun nilai a dapat didekatkan sebagai nilai 0,001-0,03 offset (Pin, 1998)

Menurut manual **Abaqus 6.10, 2010** Tujuan menggunakan analisa Drucker-Prager adalah sebagaiberikut :

1. Modifikasi Drucker-Prager dimaksudkan untuk model dengan bahan kohesif yang yang bergantung pada hasil tes tekan, seperti tanah, beton, dan batu;
2. Analisa ini bertujuan untuk menambah perilaku inelastis material model uji sehingga menyediakan mekanisme pengerasan inelastis untuk rekening untuk pemadatan plastik dan membantu untuk mengontrol volume dilatancy untuk hasil geser material;
3. Dalam analisa menggunakan Abaqus dapat digunakan untuk mensimulasi benda uji sehingga dapat menunjukkan inelastis deformasi jangka panjang melalui mekanisme kohesi di wilayah kegagalan geser dan konsolidasi pada mekanisme di wilayah tutup;
4. Dapat digunakan sinergi dengan analisa elastis linier, namun tidak dapat digunakan untuk analisa suatu benda uji yang berpori

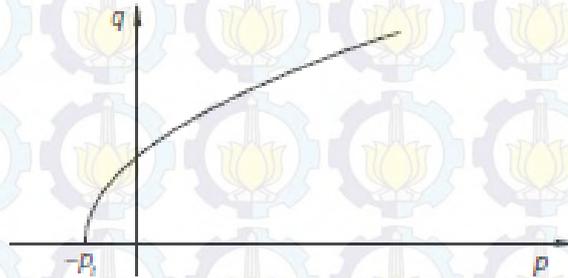
4.4.1. Pendekatan Parameter Material

Untuk melakukan pendekatan DPA diperlukan **Gambar 4.24** yang didapat dari data pelaksanaan dilapangan. Dalam grafik tersebut terdapat parameter p_t yang mana merupakan nilai dari factor hidrostatis triaksial

test. Untuk nilai p_t yang dihasilkan dari hardening tegangan tarik digunakan **Persamaan 4.4** sedangkan untuk nilai p_t yang dihasilkan dari tegangan tekan digunakan **Persamaan 4.3**

$$p_t = a\sigma_c^b - \frac{\sigma_c}{3} \quad (4.3)$$

$$p_t = a\sigma_t^b - \frac{\sigma_t}{3} \quad (4.4)$$



Gambar 4. 22 Grafik parameter eksponen dan hidrostatis dari bidang p - q
(6:10 Abaqus User Manual Vol. III)

$$\text{stress ratio } \eta = \frac{p}{q} \quad (4.5)$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai dari stress ratio untuk input Abaqus digunakan **Persamaan 4.5** kemudian diplotkan kedalam **Gambar 4.24** dimana nantinya nilai batasannya adalah $0 < p_t < \sigma_t$.

$$F = aq^b - p - p_t \quad (4.6)$$

Dari **Gambar 4.22** dapat dibuat grafik serupa berdasarkan data eksperimental yang ada dengan menggunakan **Persamaan 4.3** dan **4.4**.

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \Psi}{3 - \sin \Psi} \quad (4.7)$$

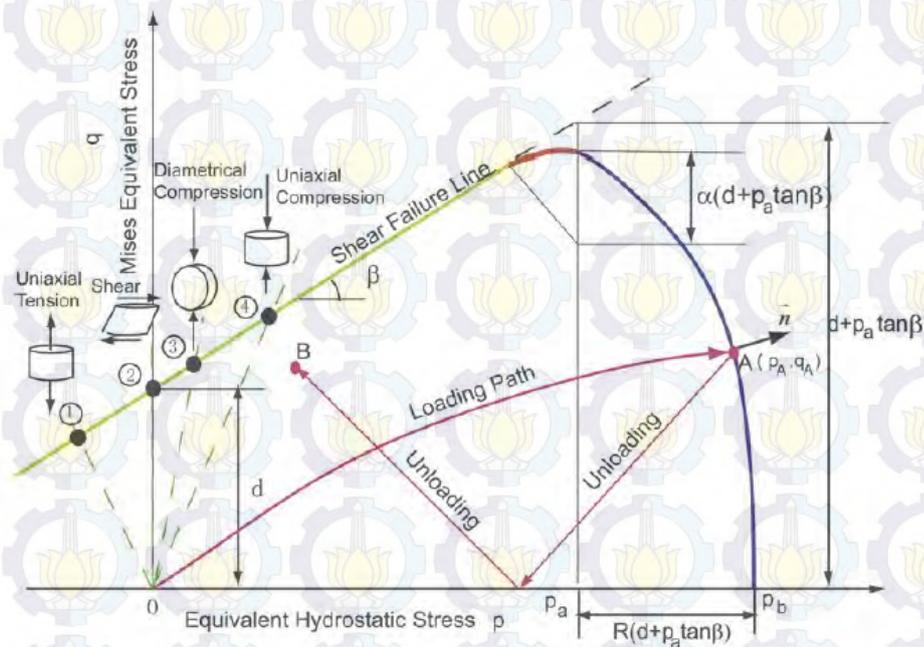
Source: ABAQUS, Inc., 2003.

$$\varepsilon_c^p = \frac{0.7 f_c^{0.31}}{1000} - \frac{f_c}{E_c} \quad (4.8)$$

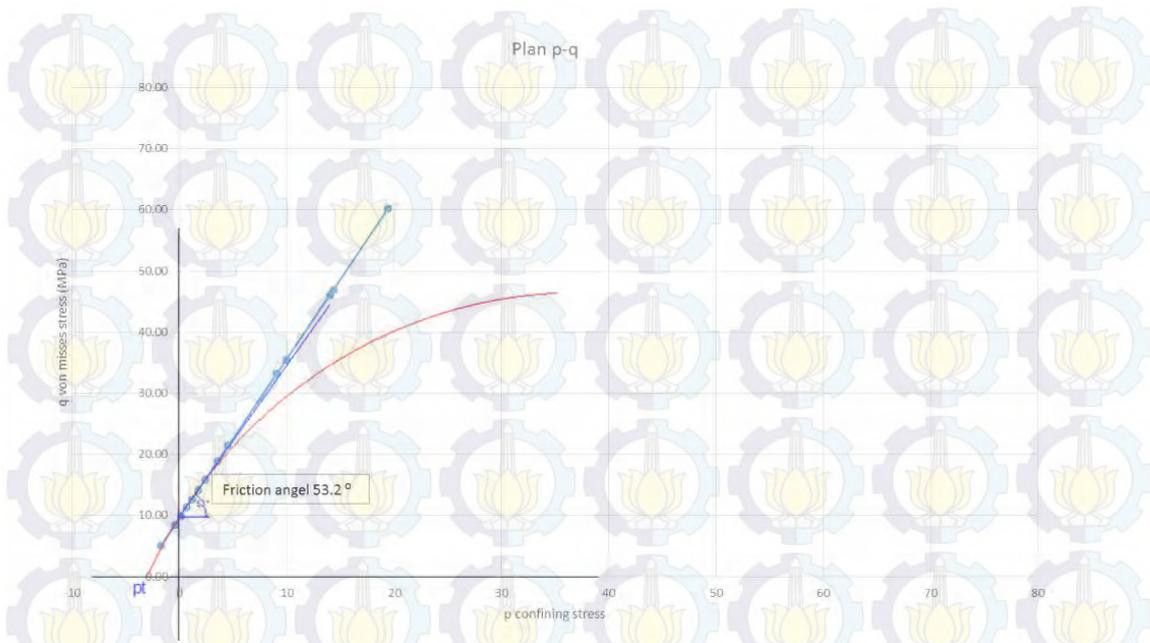
Source: Papanikolaou dan Andreas, 2005

Tabel 4. 9 Merupakan grafik dimana didalamnya terdapat faktor tegangan tarik tekan dan kondisi triaksial.

| Ψ Dilatation Angel | β Friction Angel |
|-------------------------|------------------------|
| 25 | 50.454093 |
| 26 | 51.379737 |
| 27 | 52.251427 |
| 28 | 53.072472 |
| 29 | 53.845968 |
| 30 | 54.574812 |



Gambar 4. 23 Determinasi dari kegagalan geser
(LH Han et al, 2008)



Gambar 4. 24 Grafik bidang p-q untuk pendefinisian tension dan compression

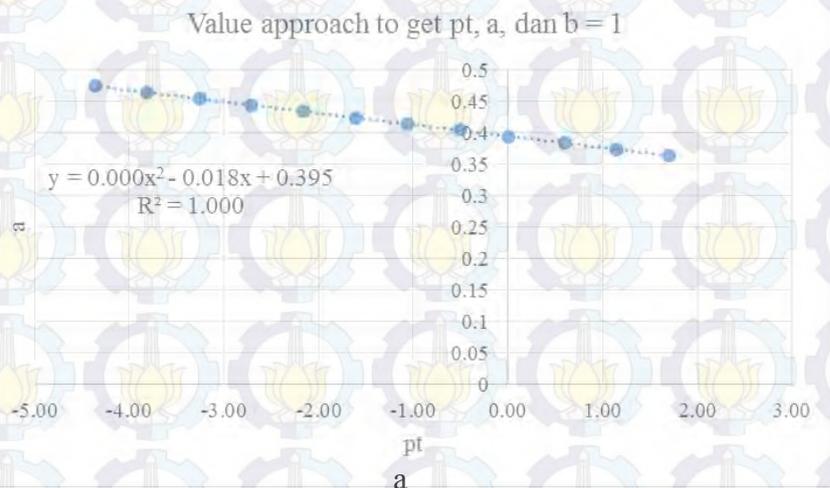
Dari Persamaan 4.6 didapatkan Gambar 4.25 yang menunjukkan perilaku benda uji pada pada garis geser sedangkan sudut yang dibentuk dari garis geser tersebut disebut *friction angel* . Dari Gambar 4.25 didapatkan *friction angel* $\pm 53,2^{\circ}$ untuk memodelkan benda uji pada Abaqus. Untuk nilai dari grafik tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.10 .yang menunjukkan nilai parameter pada bidang p, q, dan t. Sedangkan untuk nilai a, b, dan pt dapat dilihat pada Tabel 4.10. .

Tabel 4. 10 Kalkulasi untuk parameter a,b, dan pt untuk Drucker Prager

| a | b | pt | Selisih | a | b | pt | Selisih | a | b | pt | Selisih |
|-------|---|-------------|---------|----------|---|-----------|---------|------------|---|-------------|---------|
| 0.364 | 1 | 3.542453333 | 1.70 | 0.005852 | 2 | 1.8443524 | 0.72 | 0.3948 | 1 | 3.698917333 | 0.00 |
| | 1 | 1.84 | | | 2 | 1.13 | | | 1 | 3.70 | |
| 0.374 | 1 | 3.593253333 | 1.15 | 0.005952 | 2 | 1.846933 | 0.36 | | | | |
| | 1 | 2.45 | | | 2 | 1.49 | | | | | |
| 0.384 | 1 | 3.644053333 | 0.60 | 0.006052 | 2 | 1.8495137 | 0.00 | 0.006022 | 2 | 1.848739474 | 0.11 |
| | 1 | 3.05 | | | 2 | 1.85 | | | 2 | 1.74 | |
| 0.394 | 1 | 3.694853333 | 0.00 | 0.006152 | 2 | 1.8520943 | -0.36 | | | | |
| | 1 | 3.69 | | | 2 | 2.21 | | | | | |
| 0.404 | 1 | 3.745653333 | -0.51 | 0.006252 | 2 | 1.8546749 | -0.72 | | | | |
| | 1 | 4.25 | | | 2 | 2.57 | | | | | |
| 0.414 | 1 | 3.796453333 | -1.06 | 0.006352 | 2 | 1.8572556 | -1.08 | 0.006051 | 2 | 1.84948786 | 0.00 |
| | 1 | 4.85 | | | 2 | 2.94 | | | 2 | 1.846601 | |
| 0.424 | 1 | 3.847253333 | -1.61 | 0.006452 | 2 | 1.8598362 | -1.44 | | | | |
| | 1 | 5.45 | | | 2 | 3.30 | | | | | |
| 0.434 | 1 | 3.898053333 | -2.16 | 0.006552 | 2 | 1.8624169 | -1.80 | | | | |
| | 1 | 6.06 | | | 2 | 3.66 | | | | | |
| 0.444 | 1 | 3.948853333 | -2.71 | 0.006652 | 2 | 1.8649975 | -2.16 | 9.9938E-05 | 3 | 1.70643486 | 0.00 |
| | 1 | 6.66 | | | 2 | 4.02 | | | 3 | 1.71 | |
| 0.454 | 1 | 3.999653333 | -3.26 | 0.006752 | 2 | 1.8675781 | -2.52 | | | | |
| | 1 | 7.26 | | | 2 | 4.38 | | | | | |
| 0.464 | 1 | 4.050453333 | -3.81 | 0.006852 | 2 | 1.8701588 | -2.88 | | | | |
| | 1 | 7.86 | | | 2 | 4.75 | | | | | |
| 0.474 | 1 | 4.101253333 | -4.36 | 0.006952 | 2 | 1.8727394 | -3.23 | 2.76E-08 | 5 | 1.693426696 | 0.00 |
| | 1 | 8.46 | | | 2 | 5.11 | | | 5 | 1.69 | |

Dari **Tabel 4.10** didapat hubungan antara nilai eksponensial $b=1$ dengan nilai a , yang nantinya perlu dilakukan metode coba-coba untuk mendapatkan nilai antara p_t tension sama dengan p_t compression. Adapun untuk mendapatkan **Tabel 4.1** digunakan **Persamaan 4.3** dan **4.4**. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik hubungan nilai a dan p_t untuk $b=1$ pada **Gambar 4.26(a)** juga menunjukkan hubungan linier dari eksponensial=1.

Selain itu dilakukan pendekatan strain rate untuk menentukan kondisi batas regangan dari permodelan yang dibuat. Adapun hasil perhitungannya dapat dilakukan dengan menggunakan **Persamaan 4.8**, dimana hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 2.26(b)** yang menerangkan hubungan stress ratio p/q dengan nilai abs plastic strain.



Gambar 4. 25 (a) Nilai untuk pendekatan parameter a dari eksponen linier
 (b) Strain rate untuk modeling pada $f'c$ 60.16 MPa

Dari beberapa uji coba terhadap permodelan yang disesuaikan dengan ekperimental didapatkan beberapa kemungkinan pendekatan yang dapat dilakukan terhadap permodelan, dimana pendekatan tersebut berdasarkan beberapa percobaan sebelumnya. Pada **Tabel 4.11** dapat diperhatikan bahwa untuk percobaan sebelumnya untuk sudut friksi didapatkan 41.2° dan 36° dimana nilai tersebut tidak diperhitungkan karena penelitian ini memiliki hasil perhitungan untuk sudut friksi dan sudut dilatasi.

Tabel 4. 11 Kemungkinan penggunaan parameter Drucker Prager untuk multiaxial loading

| Parameter | friction | Dilatation | Flow Stress | Material Constanta | | |
|--------------------|--|--|---------------|--------------------|----------|---------------|
| | Angel | Angel | Ratio | a | b | pt |
| | $^{\circ}$ (derajat) | $^{\circ}$ (derajat) | K | | | |
| Van Gool, 2007 | 41.2184 | 0 | 0.778 | 0.0155 | - | - |
| Jia Fei dan Yu Fei | 36.5838 | - | - | - | - | - |
| NPL Manual | - | - | - | 0.0394 | 2 | 6.956311 |
| Desai ,2012 | - | - | - | - | - | - |
| Salvadore, 2010 | - | - | - | - | - | - |
| Conclution | 53°-69° | 28°-29° | 0.7780 | 0.3940 | 1 | 3.6900 |

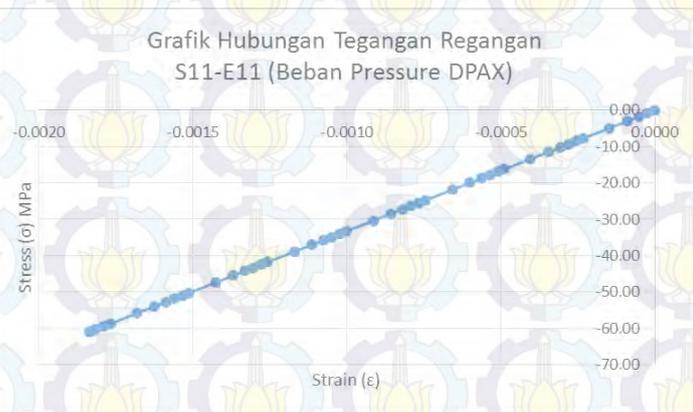
Sedangkan untuk detail input yang harus dimasukkan kedalam parameter DPA dapat dilihat pada **Tabel 4.12** dimana untuk kasus DPA ini dibagi menjadi 2 yaitu dapat menggunakan menu Drucker Prager Linier atau dengan menggunakan eksponensial. Adapun perbedaannya hanya pada input yang diperlukan, untuk DPA menggunakan eksponensial diperlukan data triaksial test sedangkan untuk linier Drucker Payer dimasukkan nilai dari data *Hardening Compression* pada **Tabel 4.7** sudah terdapat parameter untuk permodelan benda uji ini. Setelah permodelan siap maka dibuat *Step* untuk analisa pada Abaqus. Pembuatan *Step-1* merupakan nilai dari 70 MPa dikalikan dengan ratio dibagi dengan 10 *Step*, nantinya hasilnya akan berupa *Step-1* sampai dengan *Step-10*.

Tabel 4. 12 Parameter yang digunakan dalam permodelan Drucker Prager pada Abaqus

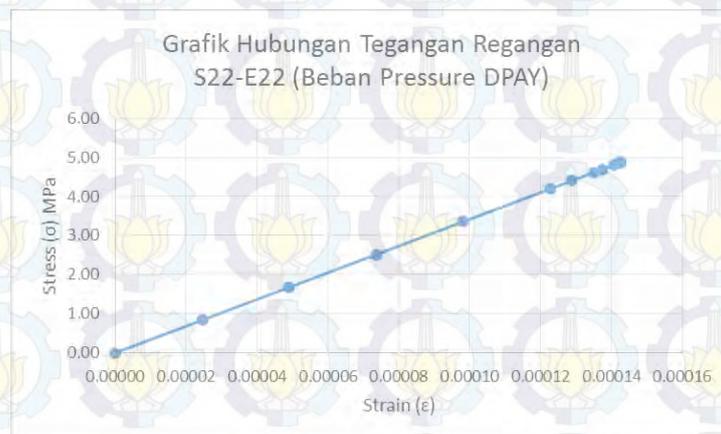
| Drucker Prager Triaxial | | | | | |
|------------------------------------|----------|--------------------------|---|-------------------------------|--|
| Data | | | | Strain Rate | |
| t | q | p | $\eta = p/q$ | Eq Plastic Strain Rate | |
| 95.34073 | 60.16 | 20.01304 | 0.00938071 | 0 | |
| 8.050713 | 5.08 | -1.68848 | 0.05217021 | 0.00011431 | |
| 71.41093 | 46.12 | 14.48128 | 0.05860317 | 0.0001244 | |
| 53.86735 | 35.49 | 10.29306 | 0.09021019 | 0.00016501 | |
| 31.06752 | 21.39 | 4.73766 | 0.12377433 | 0.00019822 | |
| 19.81768 | 14.18 | 1.89692 | 0.15104545 | 0.00022072 | |
| 15.6166 | 11.34 | 0.77796 | 0.18782775 | 0.00024684 | |
| 74.27892 | 46.87 | 14.77678 | 0.21148948 | 0.00026175 | |
| 52.6149 | 33.2 | 9.3908 | 0.27285542 | 0.00029544 | |
| 29.80983 | 18.81 | 3.72114 | 0.28002705 | 0.000299 | |
| 25.10301 | 15.84 | 2.55096 | 0.30399133 | 0.00031045 | |
| 19.90491 | 12.56 | 1.25864 | 0.3052716 | 0.00031104 | |
| 15.61014 | 9.85 | 0.1909 | 0.32266356 | 0.00031891 | |
| 13.40729 | 8.46 | -0.35676 | 0.34237795 | 0.00032746 | |
| Drucker Prager Eksponensial | | | | | |
| a | b | pt | Ψ | Use | |
| 0.394 | 1 | 3.69 | 28 | Triaxial | |
| 0.006052 | 2 | 1.84 | 28 | Data And Strain Rate | |
| Drucker Prager Linier | | | | | |
| β | K | Ψ | Use Hardening parameter for compression strength | | |
| 69 | 0.778 | 29 | | | |

4.4.2. Analisa Dan Hasil DPA

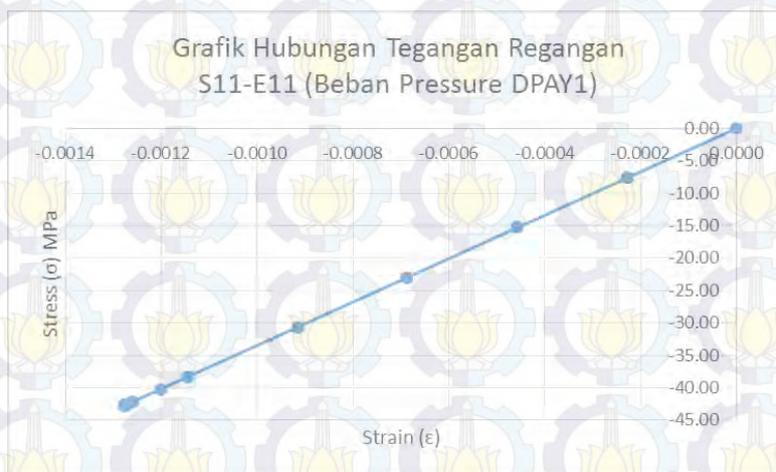
Hasil dari permodelan *Drucker Prager* diperoleh data tegangan regangan dengan menggunakan beban *pressure*. **Gambar 4.26** menunjukkan grafik hubungan tegangan dan regangan dari benda uji uniaksial tekan. Dari grafik tersebut dapat diketahui tegangan ultimate terjadi pada tegangan 60.16 MPa dengan nilai regangan 0.0016. sedangkan untuk **Gambar 4.27** menunjukkan hubungan tegangan dan regangan tarik benda uji dimana kegagalan dicapai pada beban 4.86 MPa pada regangan 0.000146. Pada permodelan benda uji tekan uniaksial ini akan diuji coba dengan menggunakan beban *displacement*. Sehingga didapatkan kurva keruntuhan untuk beton tekan pada tegangan 37.656 MPa pada regangan 0.00184.



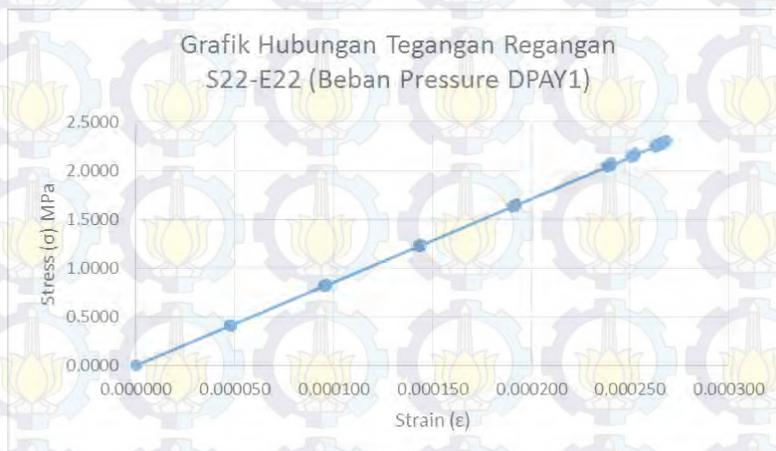
Gambar 4. 26 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan DPA
Compression (DPAX)



Gambar 4. 27 Grafik hubungan tegangan regangan pada permodelan DPA
Tension (DPAY)



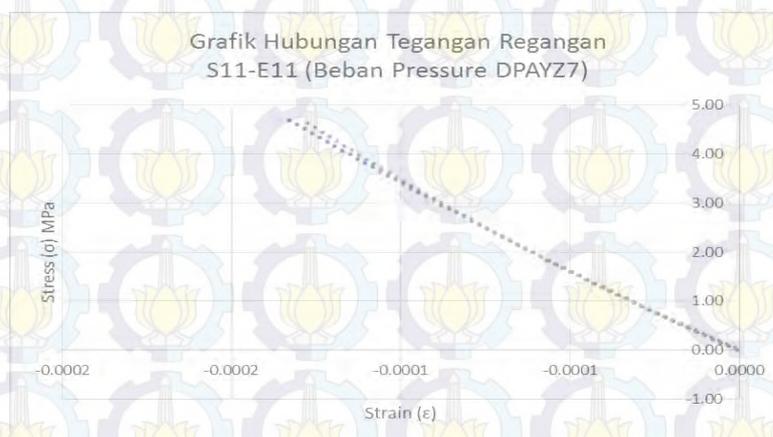
Gambar 4. 28 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu xx pada permodelan biaxial DPA dengan ratio (0.05 ,0 ,-1)



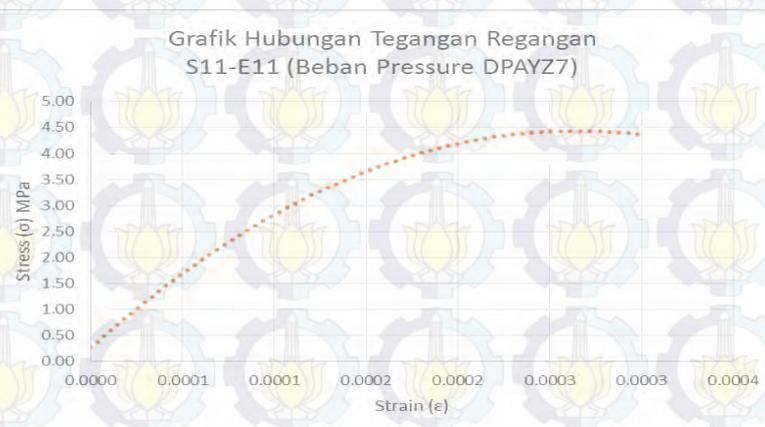
Gambar 4. 29 Grafik hubungan tegangan regangan sumbu yy pada permodelan biaxial DPA dengan ratio (0.05 ,0 ,-1)

Pada permodelan menggunakan beban biaxial didapatkan tegangan tarik 2.3MPa dan tekan 42.23MPa, jika dibandingkan prosentase selisih dari permodelan dengan eksperimental mencapai 3.48 % lihat **Gambar 4.28 dan 4.29**. Sedangkan untuk permodelan pada **Gambar 4.30 dan 4.31** dengan menggunakan beban triaksial dengan parameter DPA didapatkan hasil untuk tegangan $\sigma_x = \sigma_z$, namun karena ada perbedaan bidang sumbu yang dianut oleh peneliti sebelumnya namun bentuk permodelan serta tampaknya dibuat sama sehingga didapatkan tegangan $\sigma_1 = 4.5$ MPa sedangkan untuk tegangan $\sigma_2 = \sigma_3 = 4.639$ Mpa. Bila dibandingkan dengan data eksperimental didapatkan prosentase 8.73%. Dengan demikian dapat

diambil sebuah kesimpulan bahwa pendekatan yang dilakukan menggunakan *Drucker Prager Plasticity* memiliki nilai tegangan yang tidak jauh berbeda dengan permodelan eksperimental selain itu penggunaan parameter ini tidak menghasilkan loncatan prosentase yang tinggi dibandingkan dengan permodelan sebelumnya ini membuktikan bahwa parameter tersebut mampu mempertahankan kontinuitas (konstan) pada berbagai perbandingan rasio tegangan yang diterapkan sesuai ekperimental dengan menggunakan beban *pressure*. Adapun beberapa percobaan yang telah dimasukkan kedalam parameter *Drucker Prager* dapat dilihat pada **Tabel 4.13**. Sedangkan hasil untuk simulasi lainnya dapat dilihat pada **Lampiran(b)**.



Gambar 4. 30 Grafik hubungan tegangan regangan sumnbu xx pada permodelan triaxial DPA dengan ratio (1, -1 ,-1)



Gambar 4. 31 Grafik hubungan tegangan regangan sumnbu yy pada permodelan triaxial DPA dengan ratio (1, -1 ,-1)

Tabel 4. 13 Hasil dari beberapa percobaan dengan beberapa parameter berbeda

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | | | | |
|----|-------------|--------------|------------------|-----------------|------------|---------|----------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dirn Stress | Compresion | Tension | Triaxial | | | |
| 1 | a | 0.05335313 | -0.333333333 | 0.27002892 | 13.37 | 7.12 | 5.72 | | | |
| | b | 2 | 0.028147163 | 0.035464226 | | | | | | |
| | Pt | 5.08 | -0.231161348 | 0.203729518 | | | | | | |
| | q untuk p=0 | 9.7578 | -0.160848848 | 0.158103737 | | | | | | |
| | dilatation | 36.89 | -0.071088209 | 0.099858059 | | | | | | |
| | B | 56.33 | -0.026152482 | 0.070699266 | | | | | | |
| | fc | 60.16 | -0.008976064 | 0.059553488 | | | | | | |
| | d | 9.7578 | -0.482324911 | 0.366709555 | | | | Compresion | Tension | Triaxial |
| | d' | -30.057 | -0.145944149 | 0.148432078 | | | | 13.36 | 7.1 | 4.8789 |
| | a | 0.005623 | -0.107214096 | 0.123300147 | | | | | | |
| b | 2 | -0.069536791 | 0.098851344 | 13.36 | 7.1 | 4.8789 | | | | |
| | | -0.039007092 | 0.079040622 | | | | | | | |
| | | | -0.0234375 | 0.068937514 | | | | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | | |
|----|-------------|------------|------------------|----------------|-------------|---------|----------|--|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial | |
| 2 | a | 0.05335313 | -0.333333333 | 0.47139584 | | | | |
| | b | 2 | 0.028147163 | 0.061910734 | | | | |
| | Pt | 5.08 | -0.231161348 | 0.355655414 | 13.37 | 7.12 | 5.72 | |
| | q untuk p=0 | 9.7578 | -0.160848848 | 0.276005414 | | | | |
| | dilatation | 36.89 | -0.071088209 | 0.174324563 | | | | |
| | B | 56.33 | -0.026152482 | 0.123421372 | | | | |
| | fc | 60.16 | -0.008976064 | 0.103963925 | Rencana | | | |
| | d | 9.7578 | -0.482324911 | 0.6401735 | Compresion | Tension | Triaxial | |
| | | | | -0.317708333 | 0.45369584 | | | |
| | | | | -0.145944149 | 0.259121372 | | | |
| | | | -0.107214096 | 0.215247968 | | | | |
| | | | -0.069536791 | 0.172567117 | 60.16 | 5.08 | 4.88 | |
| | | | -0.039007092 | 0.137983074 | | | | |
| | | | -0.0234375 | 0.12034584 | | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-------------|--------------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| 3 | a | 0.006051 | -0.333333333 | 0.47139584 | 60.14 | 5.056 | 18 |
| | b | 2 | 0.028147163 | 0.061910734 | | | |
| | Pt | 1.85 | -0.231161348 | 0.355655414 | | | |
| | q untuk p=0 | 17.4852678 | -0.160848848 | 0.276005414 | | | |
| | | | -0.071088209 | 0.174324563 | | | |
| | | | -0.026152482 | 0.123421372 | | | |
| | | | -0.008976064 | 0.103963925 | | | |
| | | | -0.482324911 | 0.6401735 | | | |
| | | | -0.317708333 | 0.45369584 | | | |
| | | | -0.145944149 | 0.259121372 | | | |
| | | -0.107214096 | 0.215247968 | | | | |
| | | -0.069536791 | 0.172567117 | 60.16 | 5.08 | 17.49 | |
| | | -0.039007092 | 0.137983074 | | | | |
| | | | -0.0234375 | 0.12034584 | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-------------|------------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| | a | 0.006051 | -0.333333333 | 0.47139584 | | | |
| | b | 2 | 0.028147163 | 0.061910734 | | | |
| | Pt | 0.1 | -0.231161348 | 0.355655414 | | | |
| | q untuk p=0 | 4.06524218 | -0.160848848 | 0.276005414 | 55.39 | 29 | 14 |
| | | | -0.071088209 | 0.174324563 | | | |
| | | | -0.026152482 | 0.123421372 | | | |
| | | | -0.008976064 | 0.103963925 | | | |
| 4 | | | -0.482324911 | 0.6401735 | Compresion | Tension | Triaxial |
| | | | -0.317708333 | 0.45369584 | | | |
| | | | -0.145944149 | 0.259121372 | | | |
| | | | -0.107214096 | 0.215247968 | | | |
| | | | -0.069536791 | 0.172567117 | 60.16 | 5.08 | 4.07 |
| | | | -0.039007092 | 0.137983074 | | | |
| | | | -0.0234375 | 0.12034584 | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-------------|------------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| | a | 0.006051 | 0 | 5.08 | | | |
| | b | 2 | -32.25 | 0 | | | |
| | Pt | 0.1 | | | 11.59 | 5.08 | 4.47 |
| | q untuk p=0 | 4.06524218 | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | 60.16 | 5.08 | 4.07 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-------------|------------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| | a | 0.006051 | 0 | 5.08 | | | |
| | b | 2 | -32.25 | 0 | | | |
| | Pt | 1.84 | | | 11.59 | 5.08 | 4.389 |
| | q untuk p=0 | 17.4379463 | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | 60.16 | 5.08 | 17.44 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-------------|------------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| | a | 0.006051 | 0 | 5.08 | | | |
| | b | 2 | -60.16 | 0 | | | |
| | Pt | 1.84 | | | E | E | E |
| | q untuk p=0 | 17.4379463 | | | | | |
| 8 | | | | | | Rencana | |
| | | | | | Compresion | Tension | Triaxial |
| | | | | | | | |
| | | | | | 60.16 | 5.08 | 17.44 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-----------|-----------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| | a | 0.0060502 | 20.01304 | 95.340729 | | | |
| | b | 2 | -1.68848 | 8.050713154 | | | |
| | Pt | 1.85 | 14.48128 | 71.41093087 | 60.98 | 4.869 | 4.56 |
| | | | 10.29306 | 53.86734888 | | | |
| | | | 4.73766 | 31.06751864 | | | |
| | | | 1.89692 | 19.81767832 | | | |
| | | | 0.77796 | 15.61660111 | | | |
| 9 | | | 14.77678 | 74.27892235 | Compresion | Tension | Triaxial |
| | | | 9.3908 | 52.61489699 | | | |
| | | | 3.72114 | 29.80982567 | | | |
| | | | 2.55096 | 25.10301109 | | | |
| | | | 1.25864 | 19.90491284 | 60.16 | 5.08 | 4.23 |
| | | | 0.1909 | 15.61014263 | | | |
| | | | | 13.40729002 | | | |
| | | | -0.35676 | | | | |

| No | Parameter | Nilai | Input | | Hasil | | |
|----|-----------|-------|------------------|----------------|------------|---------|----------|
| | | | Confining Stress | Lod dim Stress | Compresion | Tension | Triaxial |
| | a | 0.394 | 20.01304 | 95.340729 | | | |
| | b | 1 | -1.68848 | 8.050713154 | | | |
| | Pt | 3.69 | 14.48128 | 71.41093087 | | | |
| | | | 10.29306 | 53.86734888 | 60.98 | 4.869 | 4.56 |
| | | | 4.73766 | 31.06751864 | | | |
| | | | 1.89692 | 19.81767832 | | | |
| | | | 0.77796 | 15.61660111 | | | |
| 10 | | | 14.77678 | 74.27892235 | | | |
| | | | 9.3908 | 52.61489699 | | | |
| | | | 3.72114 | 29.80982567 | | | |
| | | | 2.55096 | 25.10301109 | | | |
| | | | 1.25864 | 19.90491284 | 60.16 | 5.08 | 4.23 |
| | | | 0.1909 | 15.61014263 | | | |
| | | | -0.35676 | 13.40729002 | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

4.5. Summary Data Analysis

Pada pembahasan sebelumnya telah dibuka sedikit hasil tegangan dari masing-masing parameter baik *Drucker Prager* maupun *Concrete Damage Plasticity*. Setelah hasilnya dikerucutkan dan diambil nilai pada ambang puncak grafik tegangan dan regangan pada tiap permodelan dengan variasi stress rasio. Kemudian selisihkan nilai dari tegangan von mises yang terjadi antara parameter pendekatan CDP dan DPA dengan hasil ekeperimental yang ada kemudian dibuat prosentase, bila nilai prosentase besar maka tingkat akurasiya kecil sedangkan bila prosentase kecil maka tingkat akurasiya tinggi. Berikut adalah hasil rekapitulasi perhitungan dan pengelompokkan data kedalam ratio tegangan (lihat Tabel 4.14).

Tabel 4. 14 Hasil kalkulasi selisih tegangan tiap sumbu pada permodelan yang telah diprosentasekan terhadap hasil dari tegangan eksperimental

| Stress Ratio | | | Stress Value (Mpa) | | | CDP (Mpa) | | | DPA (Mpa) | | | Percentage | Percentage |
|--------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| σ_1 | σ_2 | σ_3 | σ_1 | σ_2 | σ_3 | σ_1 | σ_2 | σ_3 | σ_1 | σ_2 | σ_3 | Deviation CDP | Deviation DPA |
| 0.00 | 0.00 | -1 | 0.00 | 0.00 | -60.16 | 0.000 | 0.000 | 60.160 | 0.000 | 0.000 | 60.980 | 0.00% | 1.36% |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 5.08 | 0.00 | 0.00 | 5.080 | 0.000 | 0.000 | 4.869 | 0.000 | 0.000 | 0.00% | 4.15% |
| 0.05 | 0.00 | -1 | 2.20 | 0.00 | -43.92 | 2.715 | 0.000 | -30.780 | 2.348 | 0.000 | -42.270 | 28.49% | 3.48% |
| 0.10 | 0.00 | -1 | 3.23 | 0.00 | -32.26 | 2.840 | 0.000 | -22.110 | 3.240 | 0.000 | -33.060 | 30.40% | 2.36% |
| 0.25 | 0.00 | -1 | 4.28 | 0.00 | -17.11 | 3.230 | 0.000 | -12.910 | 4.568 | 0.000 | -19.000 | 24.54% | 10.43% |
| 0.50 | 0.00 | -1 | 4.73 | 0.00 | -9.45 | 3.680 | 0.000 | -8.326 | 5.214 | 0.000 | -10.840 | 14.80% | 13.43% |
| 0.75 | 0.00 | -1 | 4.86 | 0.00 | -6.48 | 3.867 | 0.000 | -6.310 | 5.377 | 0.000 | -7.320 | 9.70% | 12.02% |
| 0.05 | -1 | -1 | 2.23 | -44.64 | -44.64 | 3.916 | -22.760 | -22.760 | 4.320 | -46.490 | -46.490 | 43.09% | 8.41% |
| 0.10 | -1 | -1 | 3.02 | -30.18 | -30.18 | 3.711 | -18.510 | -18.510 | 4.670 | -33.460 | -33.460 | 33.07% | 14.85% |
| 0.25 | -1 | -1 | 3.76 | -15.05 | -15.05 | 3.957 | -11.920 | -11.920 | 4.410 | -16.730 | -16.730 | 15.59% | 12.39% |
| 0.35 | -1 | -1 | 4.11 | -11.73 | -11.73 | 3.800 | -9.800 | -9.800 | 4.095 | -12.112 | -12.112 | 14.14% | 2.32% |
| 0.50 | -1 | -1 | 4.19 | -8.37 | -8.37 | 3.811 | -7.718 | -7.718 | 4.428 | -8.780 | -8.780 | 8.21% | 5.16% |
| 0.75 | -1 | -1 | 4.22 | -5.63 | -5.63 | 3.860 | -5.816 | -5.816 | 4.505 | -4.730 | -4.730 | 1.77% | 6.24% |
| 1 | -1 | -1 | 4.23 | -4.23 | -4.23 | 3.900 | -4.700 | -4.700 | 4.560 | -4.639 | -4.639 | 1.65% | 8.73% |
| Summary | | | N | N | N | N | N | N | N | N | N | 16.10% | 7.52% |

BAB 5 KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari simulasi diatas sudah dilakukan perbandingan terhadap beberapa parameter baik CDP ataupun DPA terhadap beban multiaksial yang bekerja pada benda uji yang disimulasikan. Adapun simulasi yang dilakukan menggunakan pembebanan area *pressure* dan *boundary condition* yang telah disesuaikan. Sedangkan hasilnya dirumuskan dalam beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Parameter CDP digunakan nilai $\psi = 29^\circ$, eksentrisiti 0.1, $f_{co}/f_{cb}=1.16$, $K=0.778$, dan visco parameter=0 dengan menggunakan parameter perilaku tekan dan tarik beton. Sedangkan untuk parameter DPA digunakan parameter eksponensial dengan nilai $a=0.394$, $b=1$, $pt=3.69$, $\psi = 28^\circ$, $\beta = 53^\circ$ dengan menggunakan submenu triaxial tes data.
2. Analisa parameter *concrete damage plasticity* (CDP) memiliki kelebihan untuk tegangan yang terjadi akan mendekati nilai eksperimental untuk ratio yang lebih besar dari 0.1, sedangkan kekurangannya bila rasio semakin kecil maka tegangan yang terjadi akan menjauhi nilai tegangan ekperimental. Hal ini terjadi dimungkinkan karena data yang dimasukkan kedalam simulasi berupa data pendekatan tegangan dan regangan, selain itu parameter CDP ini tidak memiliki submenu untuk triaksil data. Namun dari segi parameter yang digunakan sudah cukup untuk mensimulasikan benda uji secara multiaksial.
3. Analisa parameter *Drucker Prager* juga memiliki keunggulan tersendiri yaitu konstannya selisih tegangan yang terjadi pada permodelan dengan tegangan eksperimental. Dikarenakan pada simulasi menggunakan DPA digunakan parameter data dari perilaku beton multiaksial adapun data triaksial dengan menggunakan nilai a , b , dan pt sebagai pendekatannya. Dimana nilai b menunjukkan eksponensial dari persamaan garis *failure shear*, selain itu nilai b mengindikasikan initial tension stress, semakin

besar nilai eksponen maka nilai initial tension semakin besar maka tingkat akurasi antara triaksial, biaksial, dan uniaksial semakin kecil. Sedangkan nilai a merupakan konstanta yang bisa dicari dengan menggunakan coba-coba, p_t merupakan nilai *shear failure* pada kondisi *von misses* sama dengan nol, sedangkan nilai p_t merupakan faktor identitas dari simulasi untuk benda uji dengan kondisi uniaksial tarik ataupun tekan.

4. Prosentase akurasi dari parameter CDP dan DPA digunakan tegangan *von misses* sebagai pembanding, dikarenakan tegangan tersebut mempresentasikan tegangan dari semua sumbu bidang. Dari hasil kalkulasi didapatkan nilai 16.10% untuk CDP dan nilai 7.52% untuk DPA.

5.2. Saran

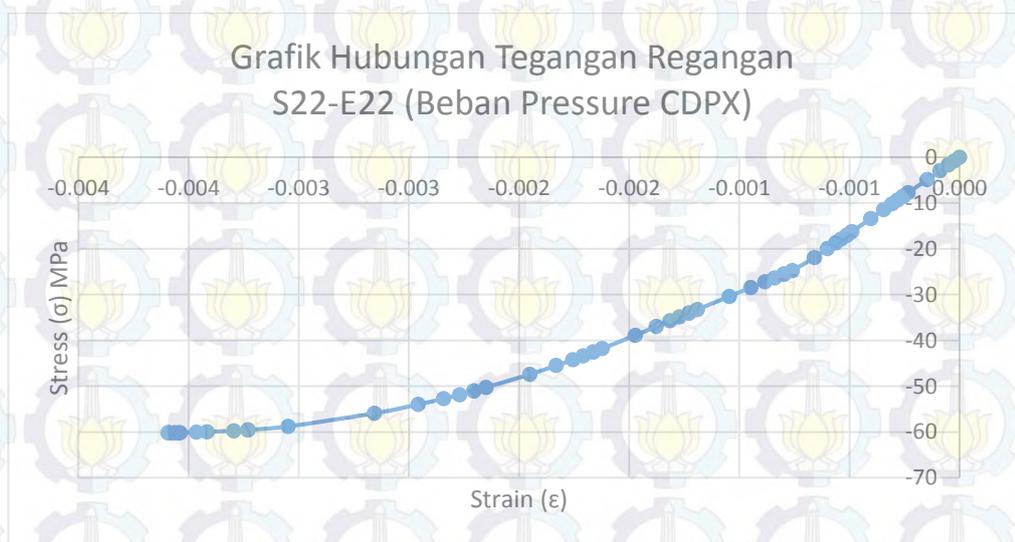
1. Perlu dilakukan uji benda dengan menggunakan *displacement load* yang dibandingkan dengan ratio beban yang digunakan agar dicapai kondisi puncak yang sama pada waktu dan regangan yang sama.
2. Parameter perlu diuji coba dengan hasil eksperimental pengujian yang lain.
3. Parameter perlu diuji dengan memodelkan kedalam sebuah bentuk element struktur bangunan.
4. Perlu dilakukan perbandingan terhadap perubahan sudut dilatasi dan sudut geser (*friction angel and dilatation angel*).

LAMPIRAN

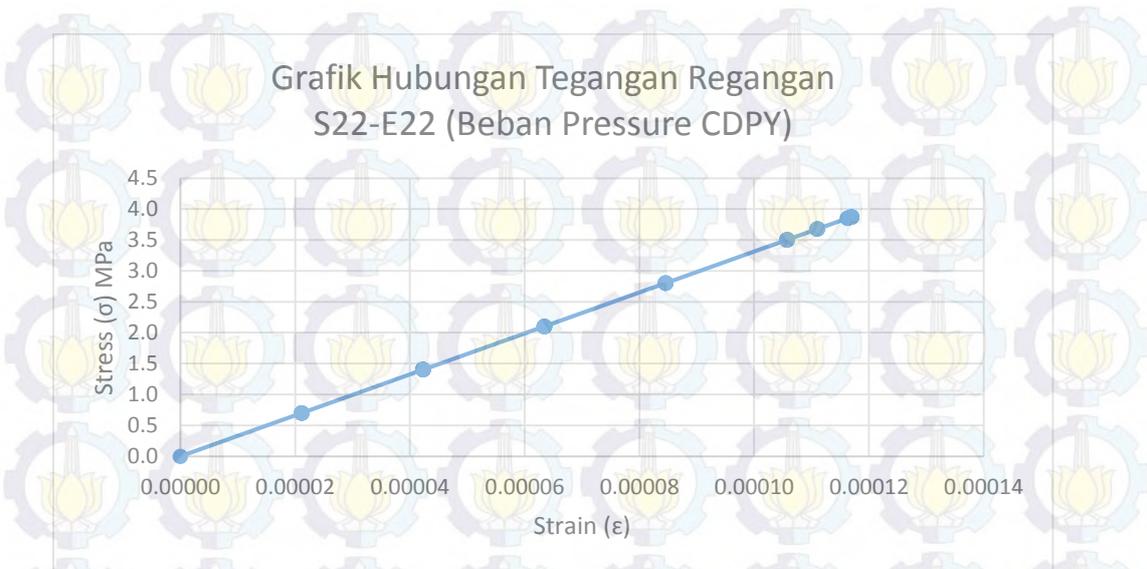
Tabel A. 1 Penamaan pada analisa simulasi menggunakan parameter CDP dan DPA

| No. | Analisa | Stress Ratio | | | Nama Notasi | Analisa | Nama Notasi |
|-----|----------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
| | | (Y) σ_1 | (Z) σ_2 | (X) σ_3 | | | |
| 1 | Drucker-Pager | 0.00 | 0.00 | -1 | DPAX | Concrete Damage-Plasticity | CDPX |
| 2 | | 1 | 0.00 | 0.00 | DPAY | | CDPY |
| 3 | | 0.05 | 0.00 | -1 | DPAXY1 | | CDPXY1 |
| 4 | | 0.10 | 0.00 | -1 | DPAXY2 | | CDPXY2 |
| 5 | | 0.25 | 0.00 | -1 | DPAXY3 | | CDPXY3 |
| 6 | | 0.50 | 0.00 | -1 | DPAXY4 | | CDPXY4 |
| 7 | | 0.75 | 0.00 | -1 | DPAXY5 | | CDPXY5 |
| 8 | | 0.05 | -1 | -1 | DPAXYZ1 | | CDPXYZ1 |
| 9 | | 0.10 | -1 | -1 | DPAXYZ2 | | CDPXYZ2 |
| 10 | | 0.25 | -1 | -1 | DPAXYZ3 | | CDPXYZ3 |
| 11 | | 0.35 | -1 | -1 | DPAXYZ4 | | CDPXYZ4 |
| 12 | | 0.50 | -1 | -1 | DPAXYZ5 | | CDPXYZ5 |
| 13 | | 0.75 | -1 | -1 | DPAXYZ6 | | CDPXYZ6 |
| 14 | | 1 | -1 | -1 | DPAXYZ7 | | CDPXYZ7 |
| 15 | | -1 | -1 | -1 | DPAXYZ8 | | CDPXYZ8 |

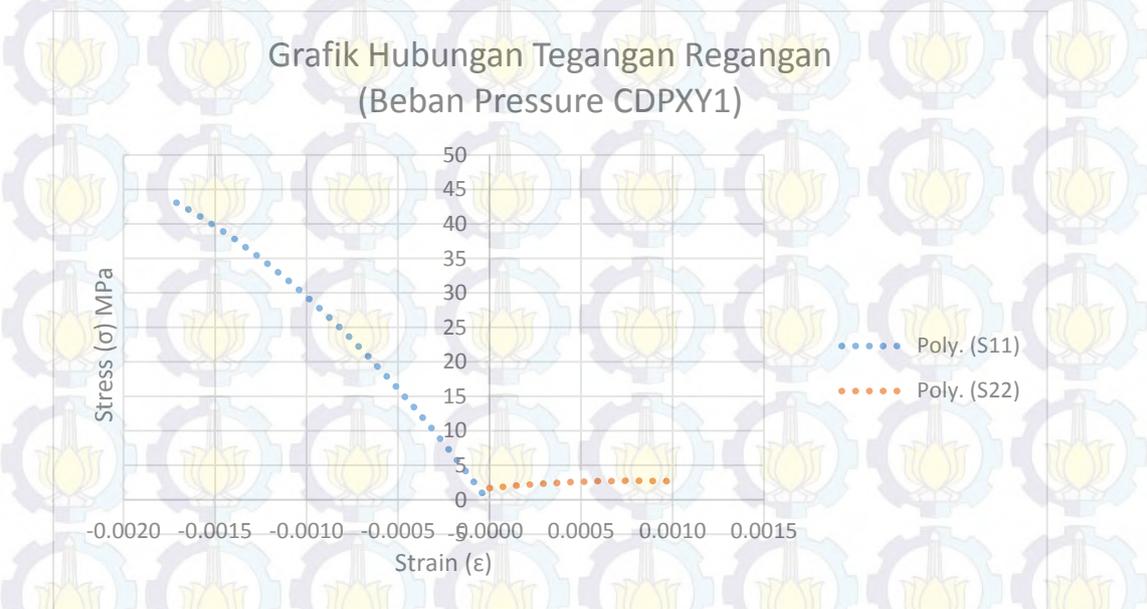
a. Hasil Simulasi *Concrete Damage Plasticity*



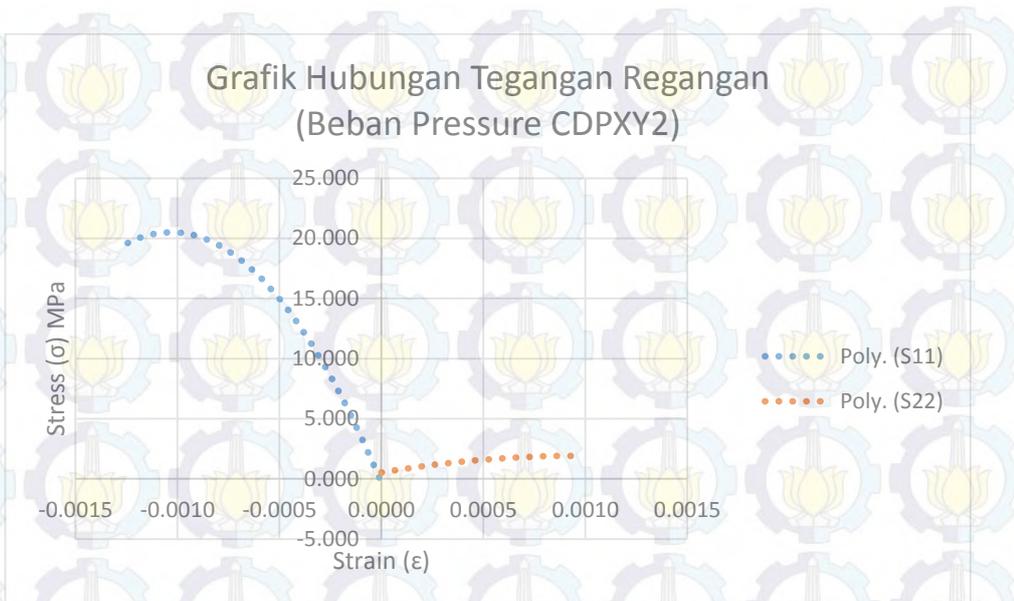
Gambar A.(a). 1 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPX



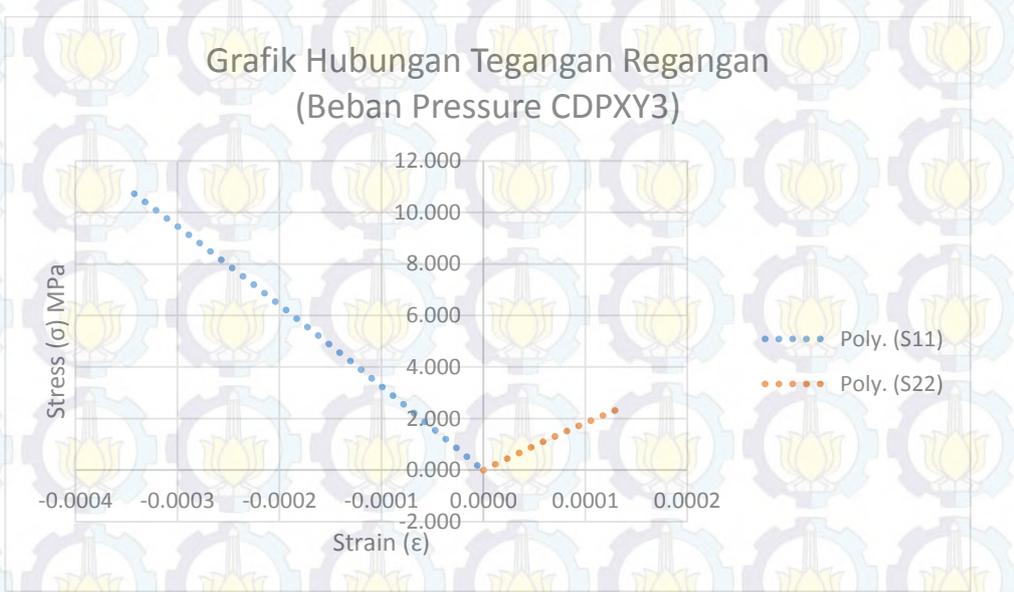
Gambar A.(a). 2 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPY



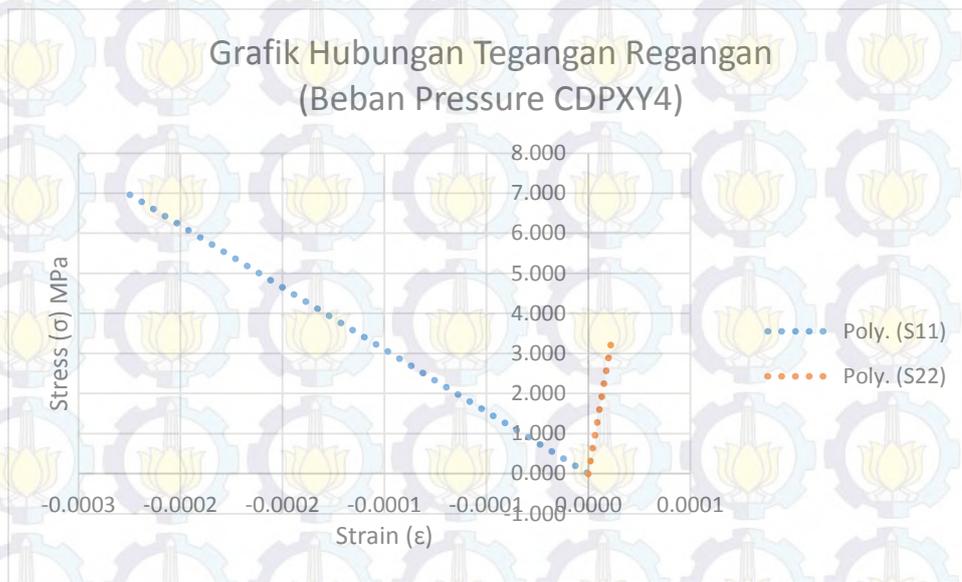
Gambar A.(a). 3 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY1



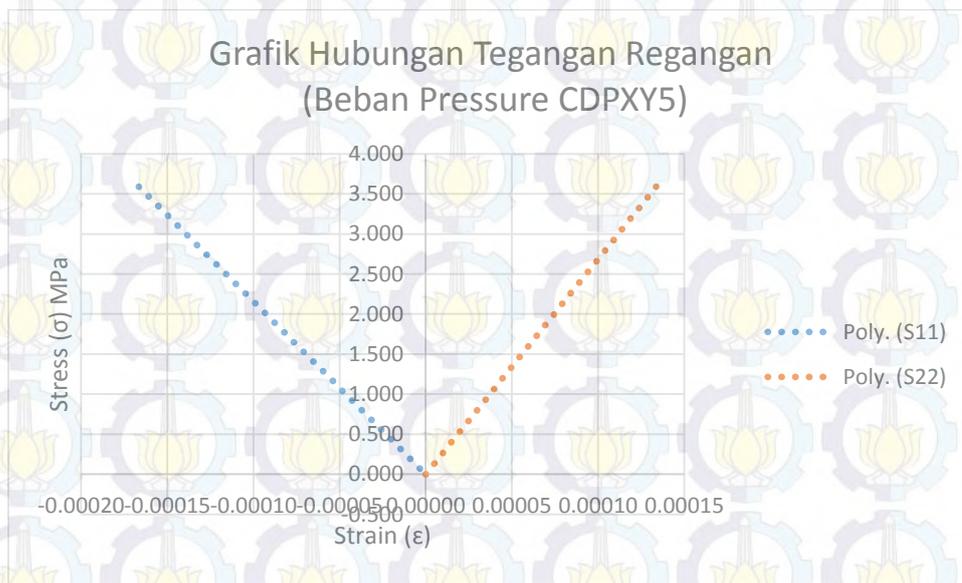
Gambar A.(a). 4 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY2



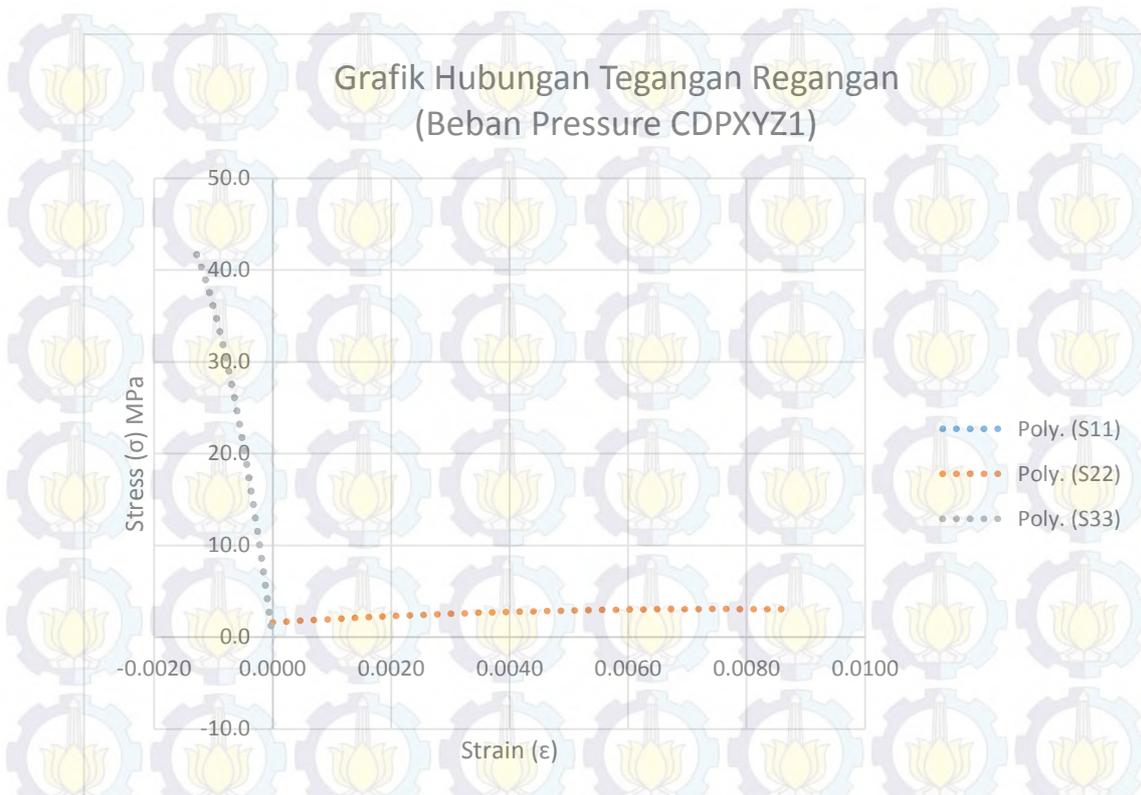
Gambar A.(a). 5 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY3



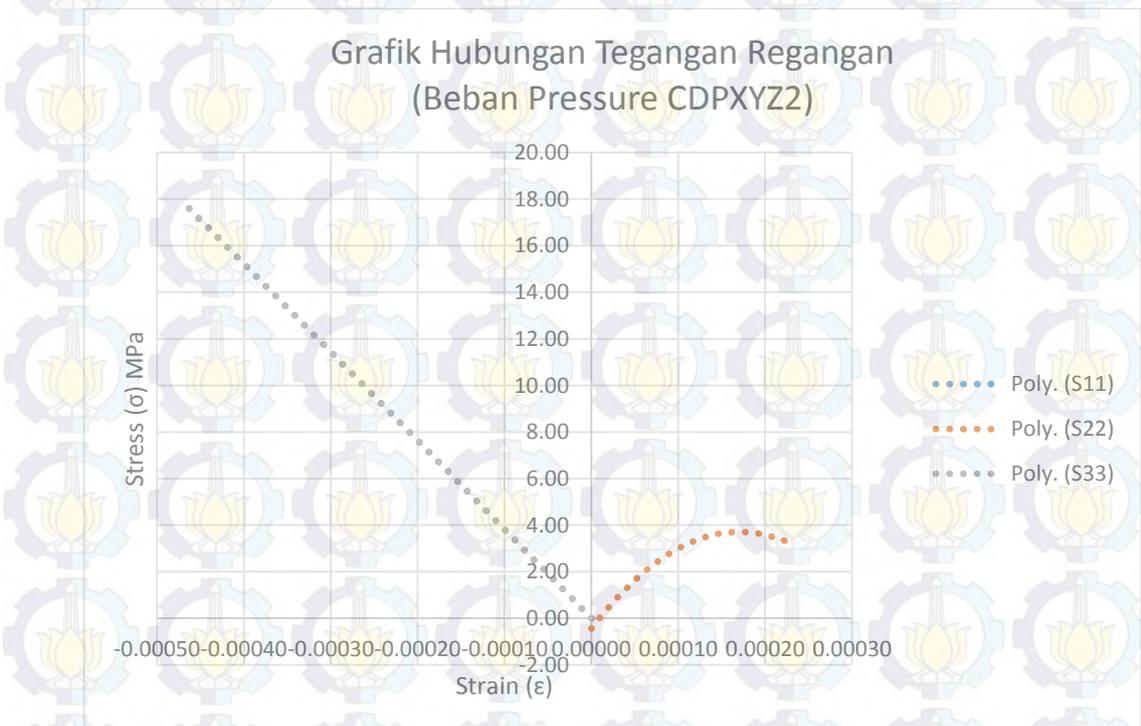
Gambar A.(a). 6 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY4



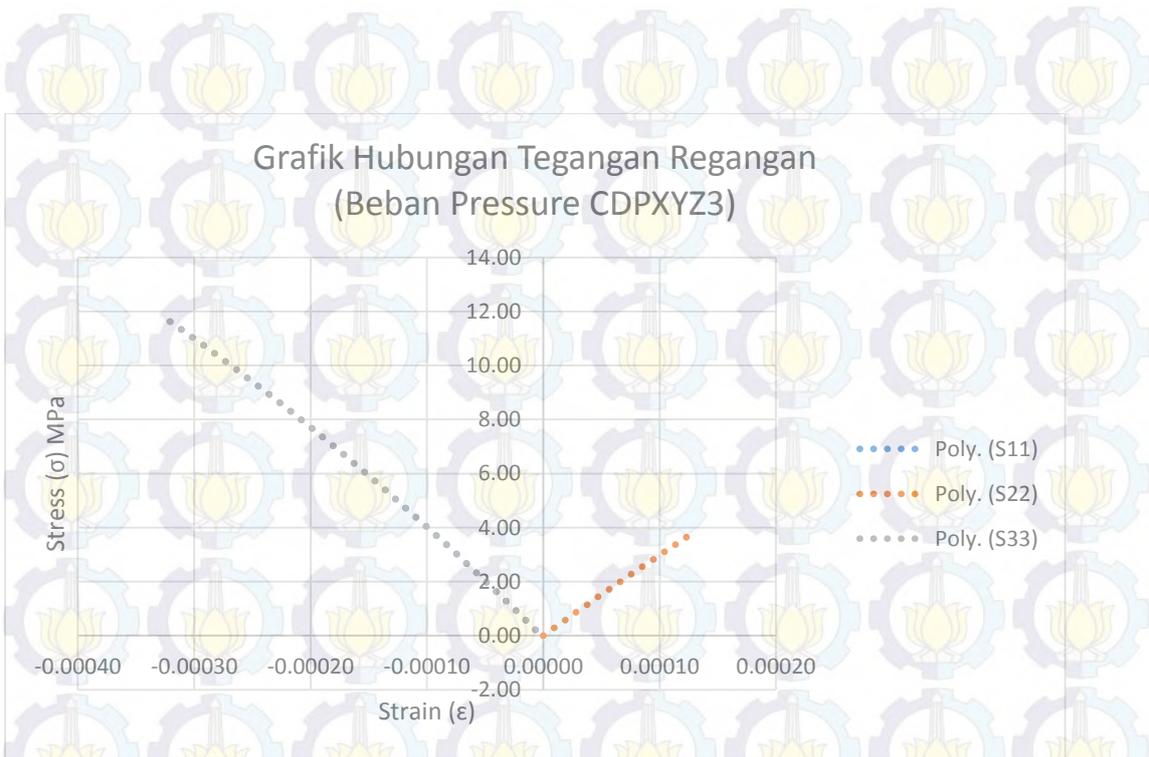
Gambar A.(a). 7 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXY5



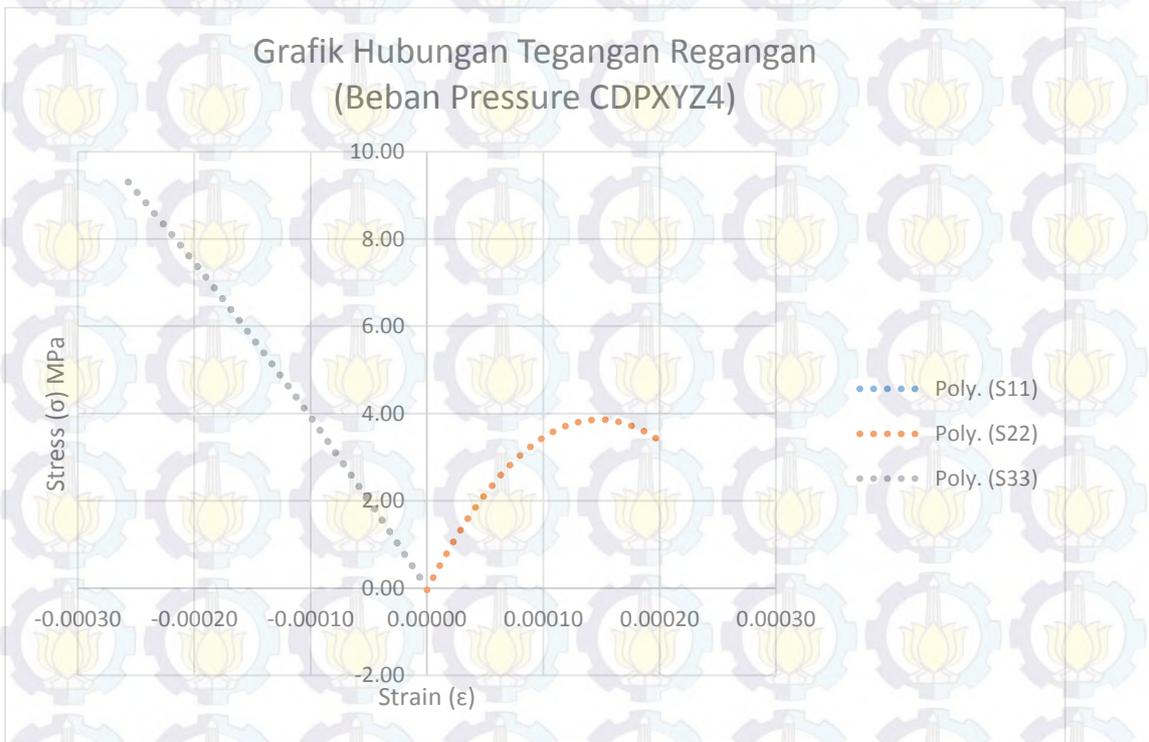
Gambar A.(a). 8 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ1



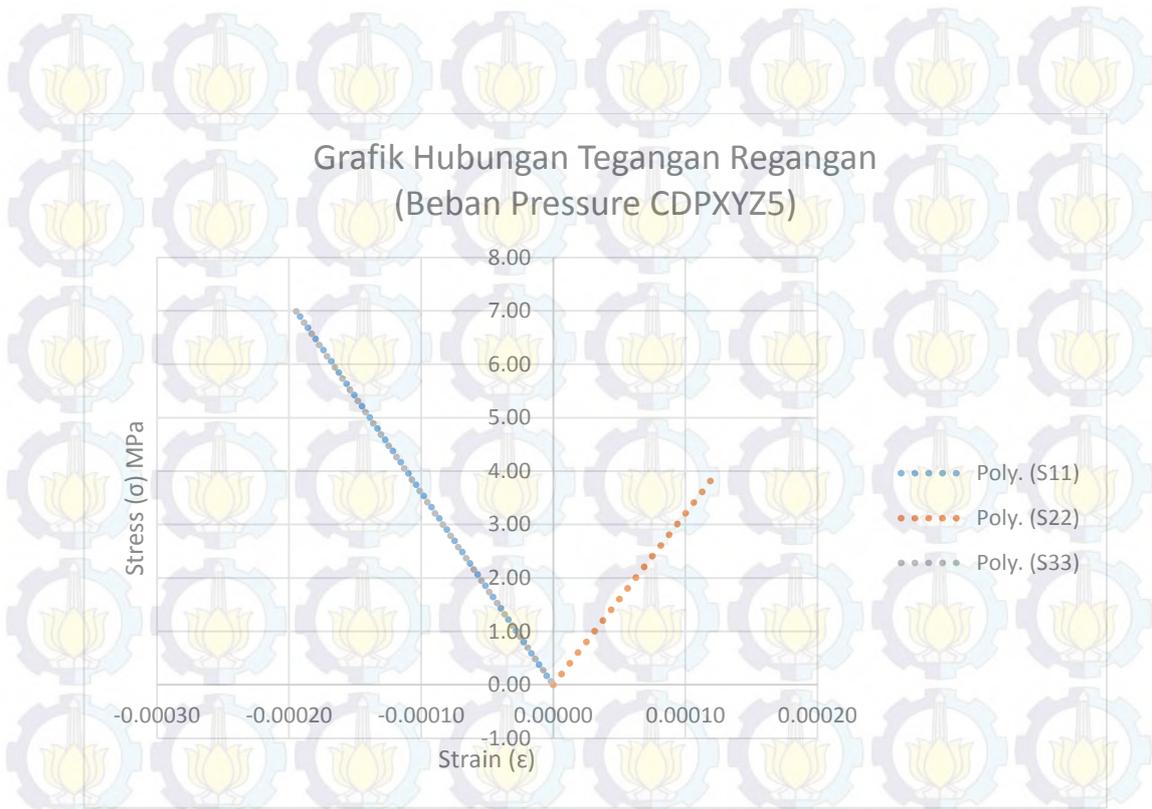
Gambar A.(a). 9 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ2



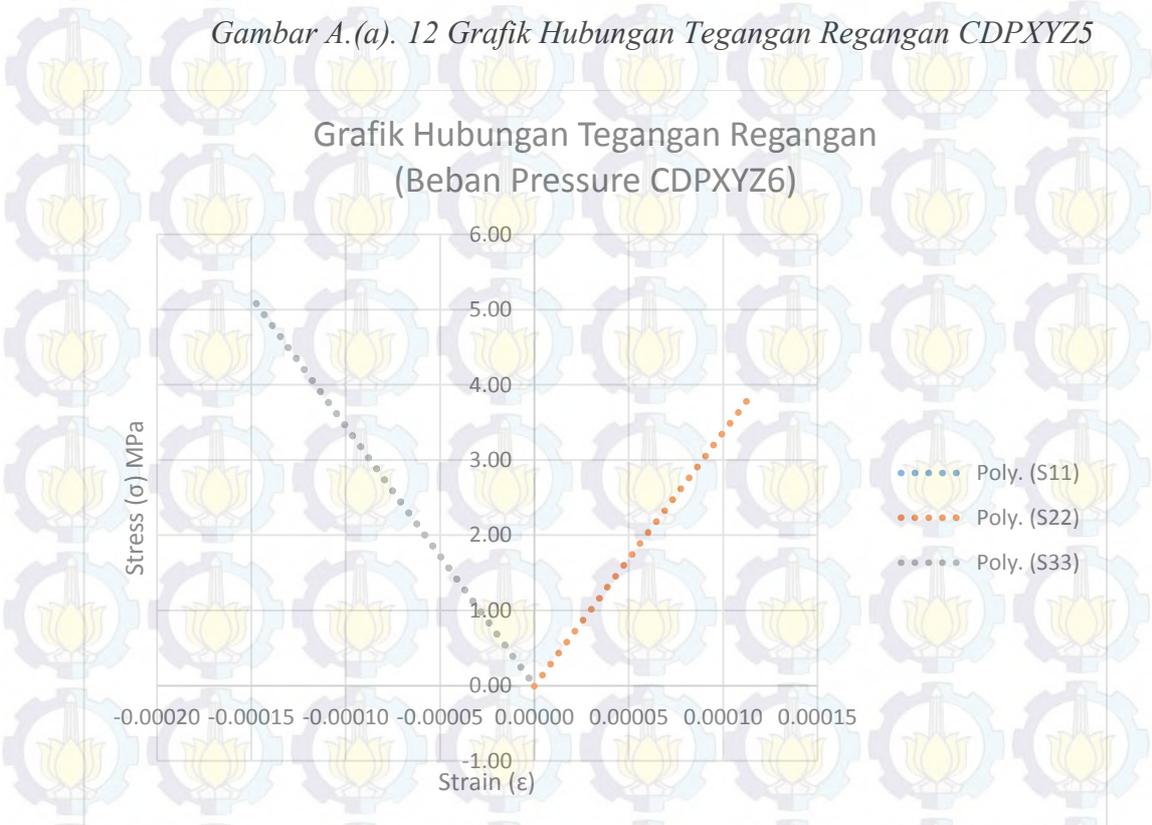
Gambar A.(a). 10 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ3



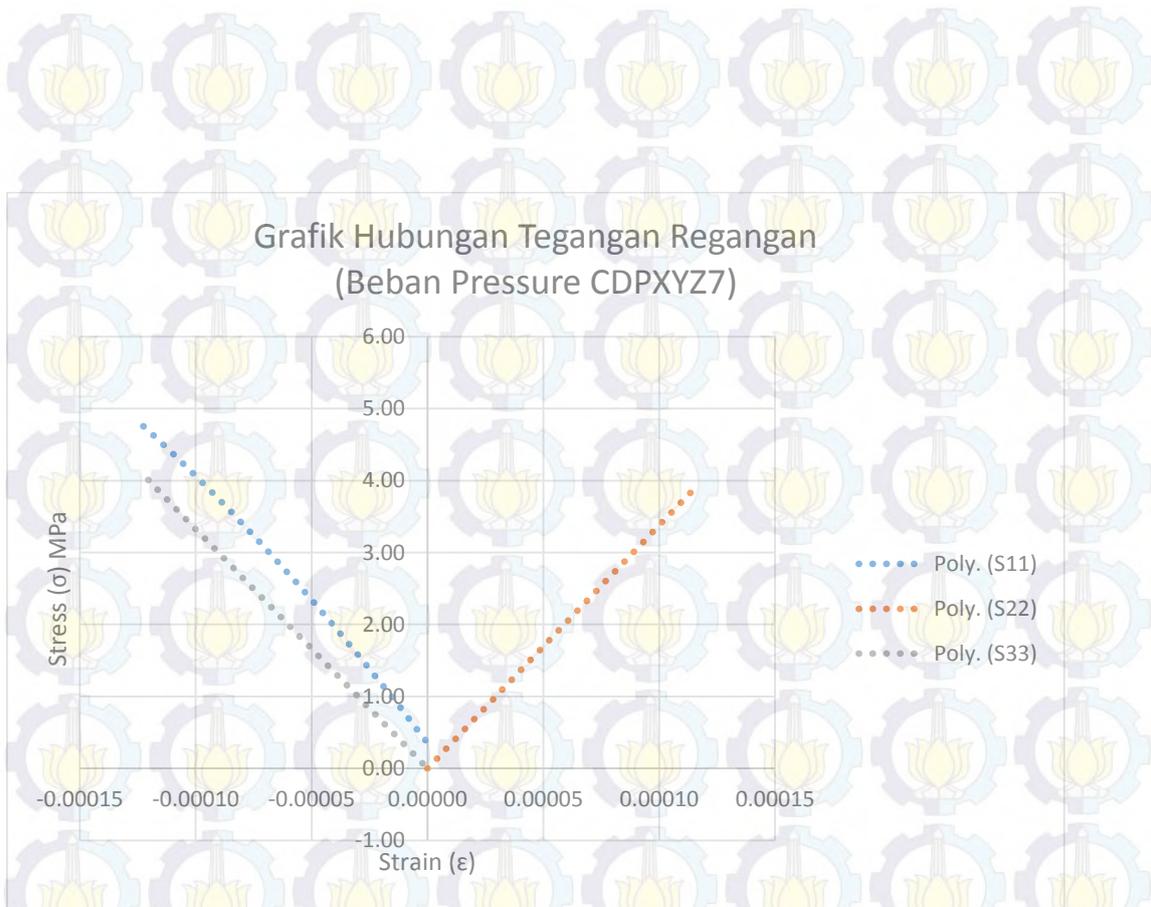
Gambar A.(a). 11 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ4



Gambar A.(a). 12 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ5



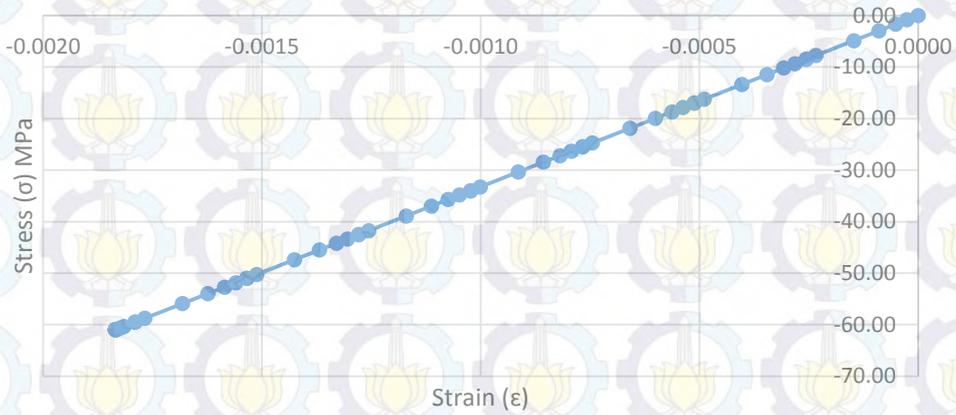
Gambar A.(a). 13 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ6



Gambar A.(a). 14 Grafik Hubungan Tegangan Regangan CDPXYZ7

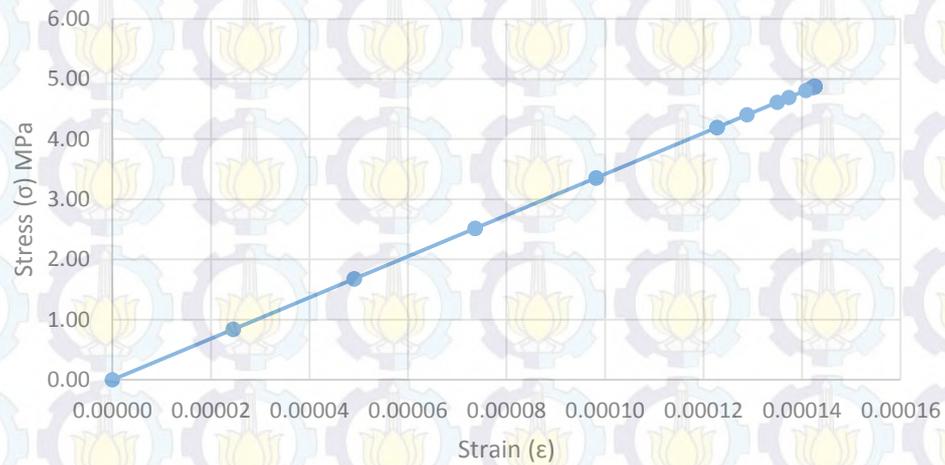
b. Hasil Simulasi *Drucker Prager Analysis*

Grafik Hubungan Tegangan Regangan
S11-E11 (Beban Pressure DPAX)

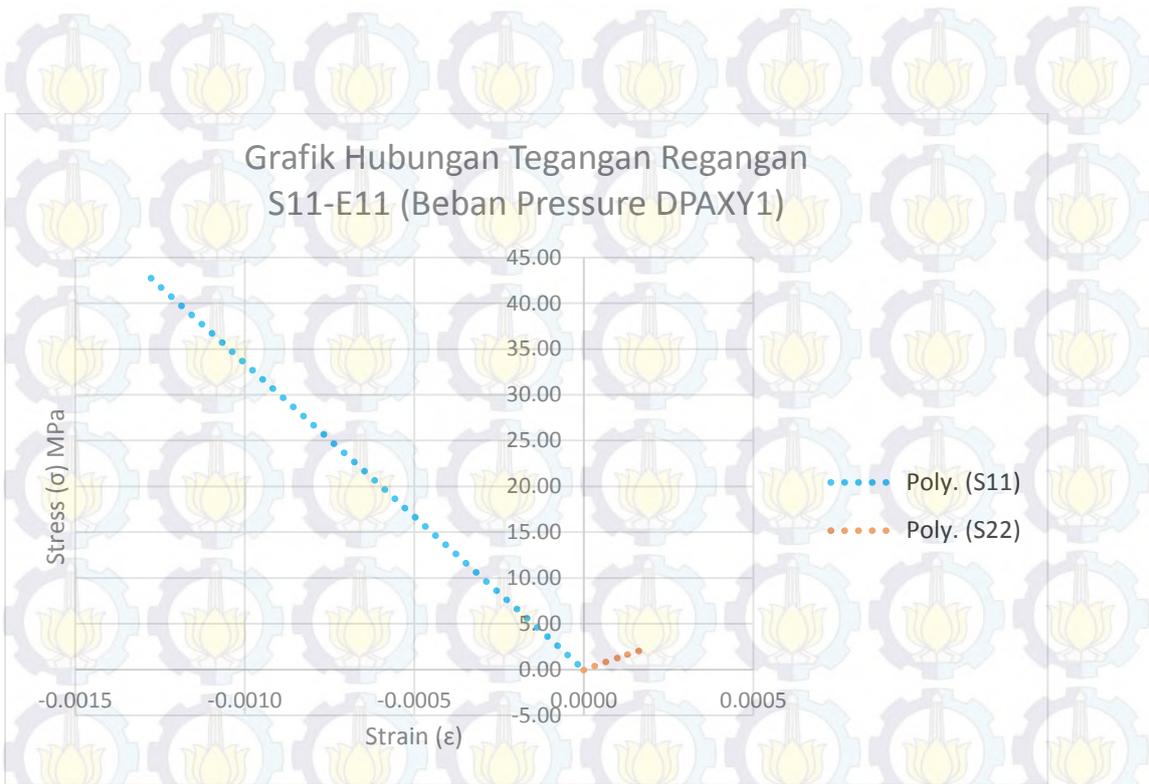


Gambar A.(b). 1 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAX

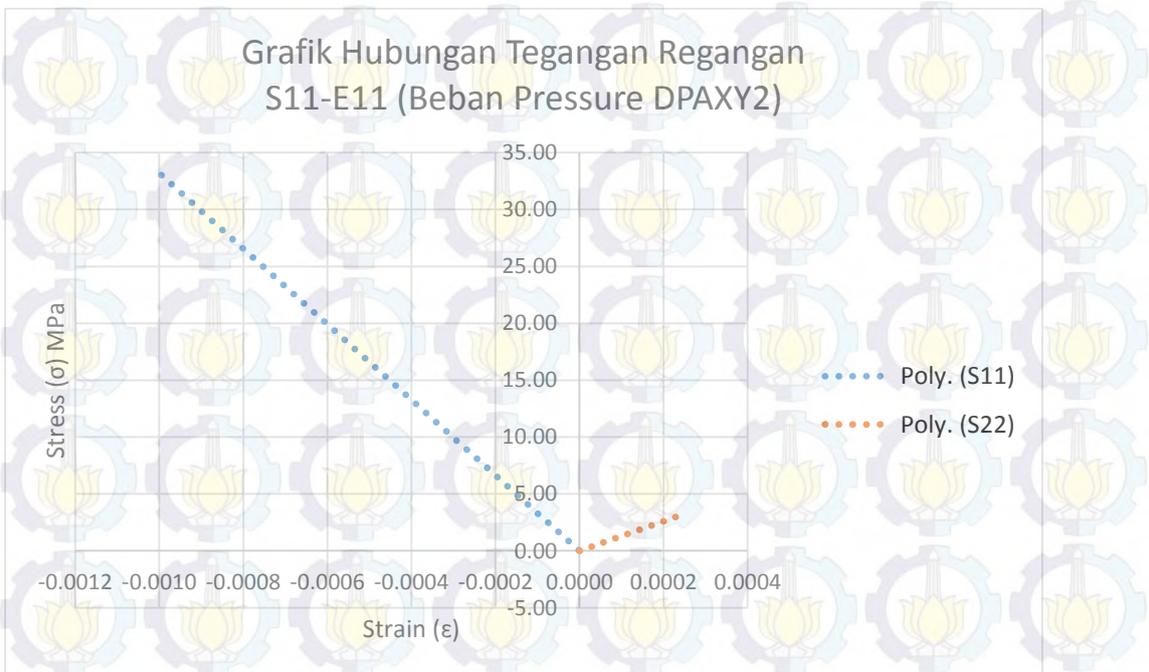
Grafik Hubungan Tegangan Regangan
S22-E22 (Beban Pressure DPAY)



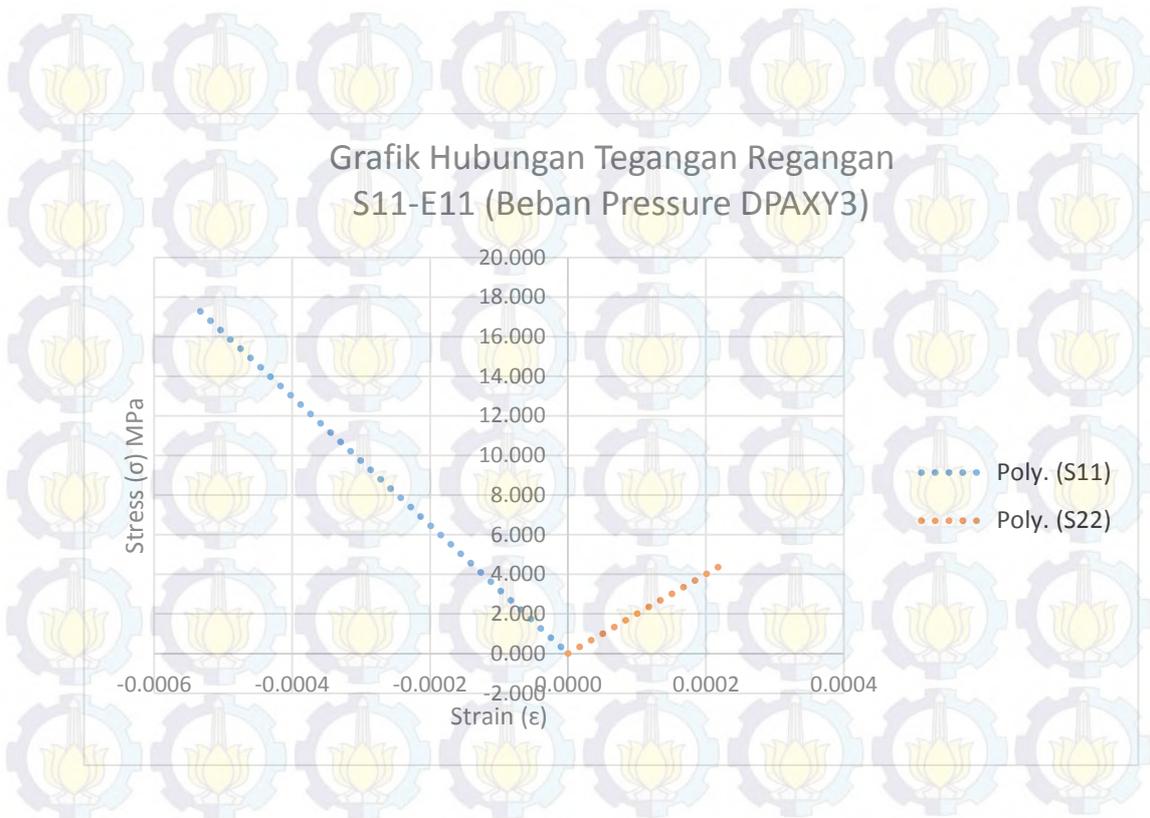
Gambar A.(b). 2 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAY



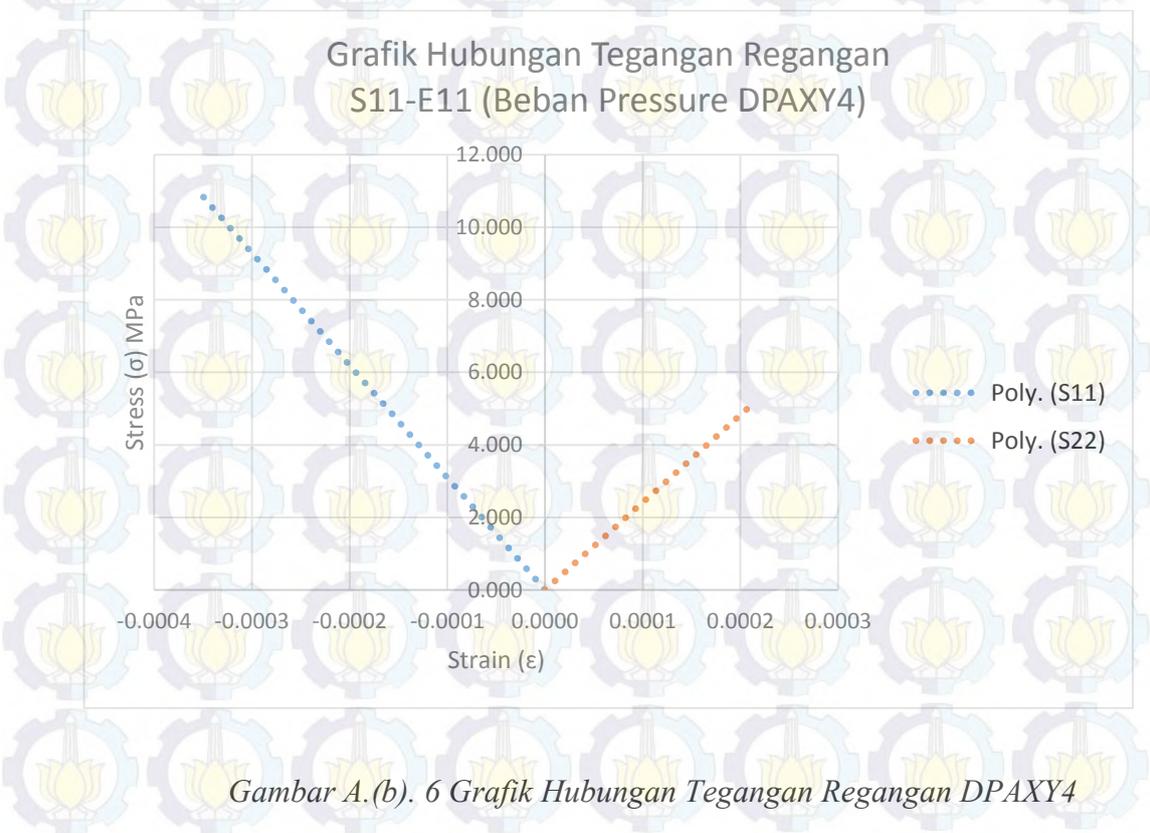
Gambar A.(b). 3 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY1



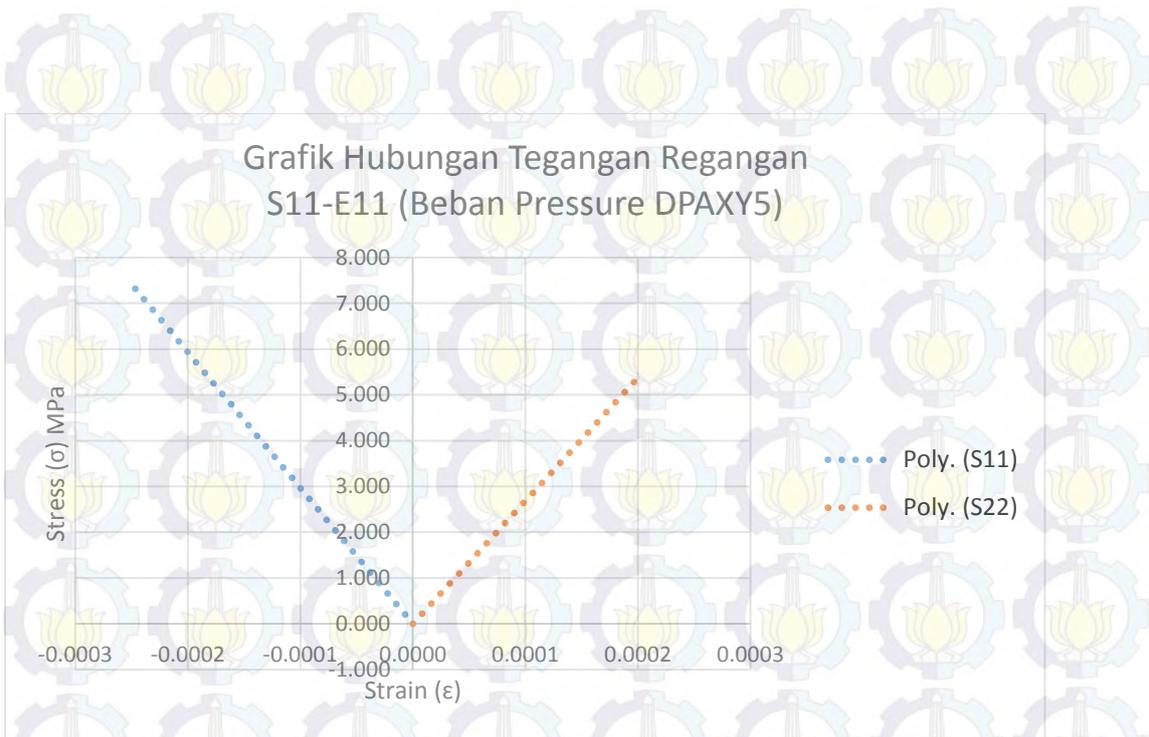
Gambar A.(b). 4 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY2



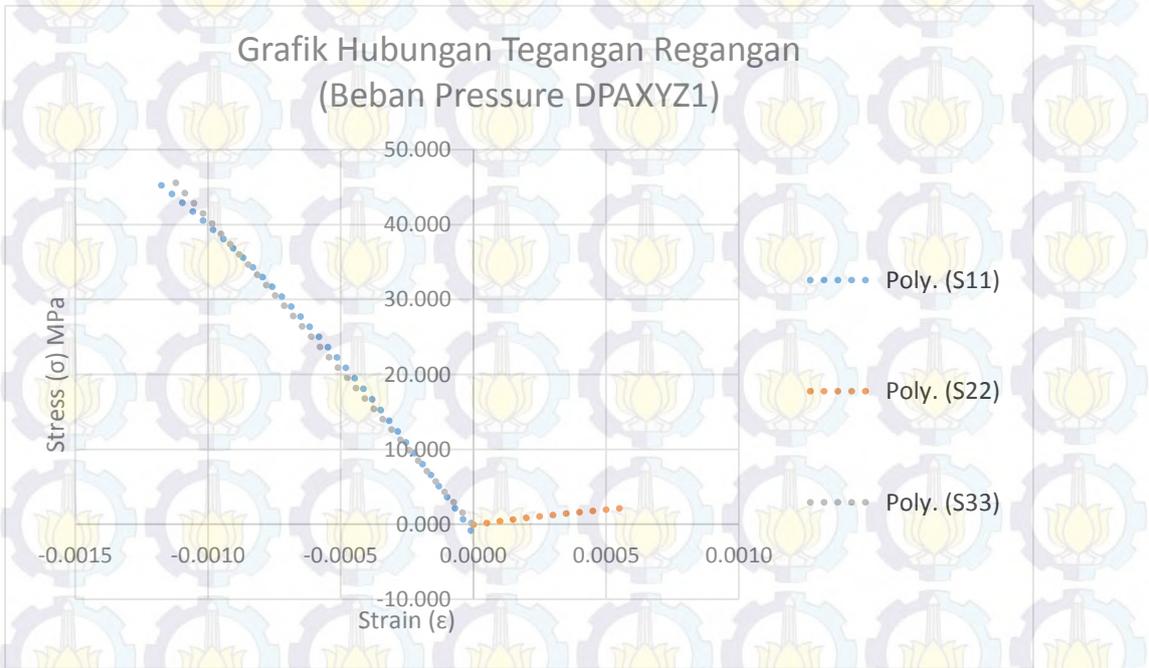
Gambar A.(b). 5 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY3



Gambar A.(b). 6 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY4

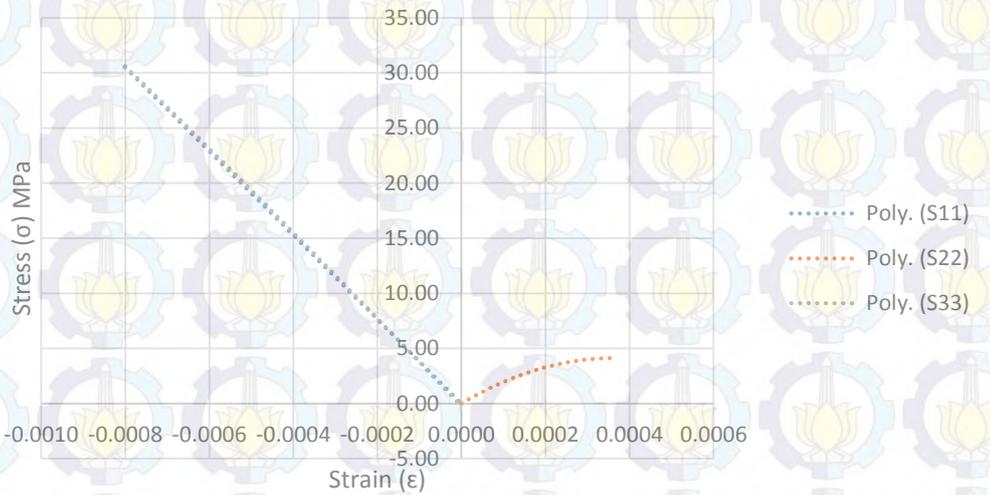


Gambar A.(b). 7 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXY5



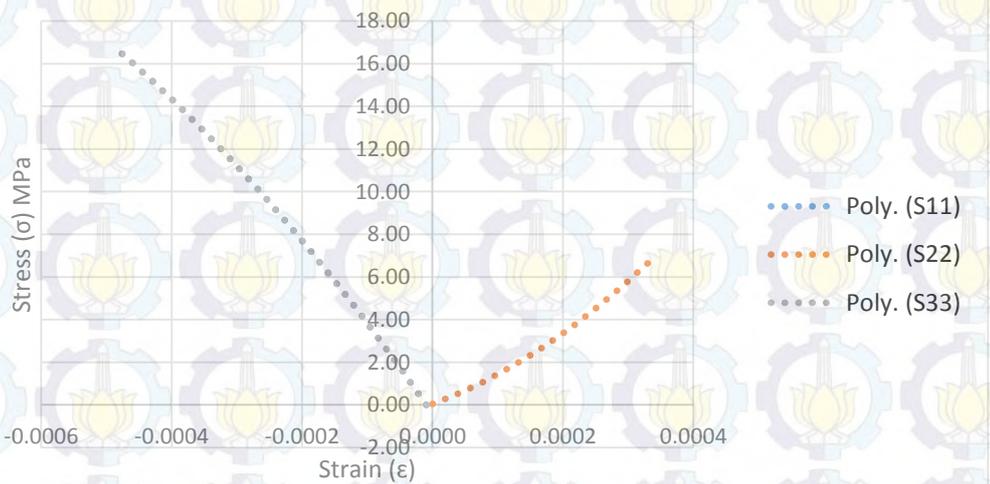
Gambar A.(b). 8 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ1

Grafik Hubungan Tegangan Regangan
S11-E11 (Beban Pressure DPAXYZ2)

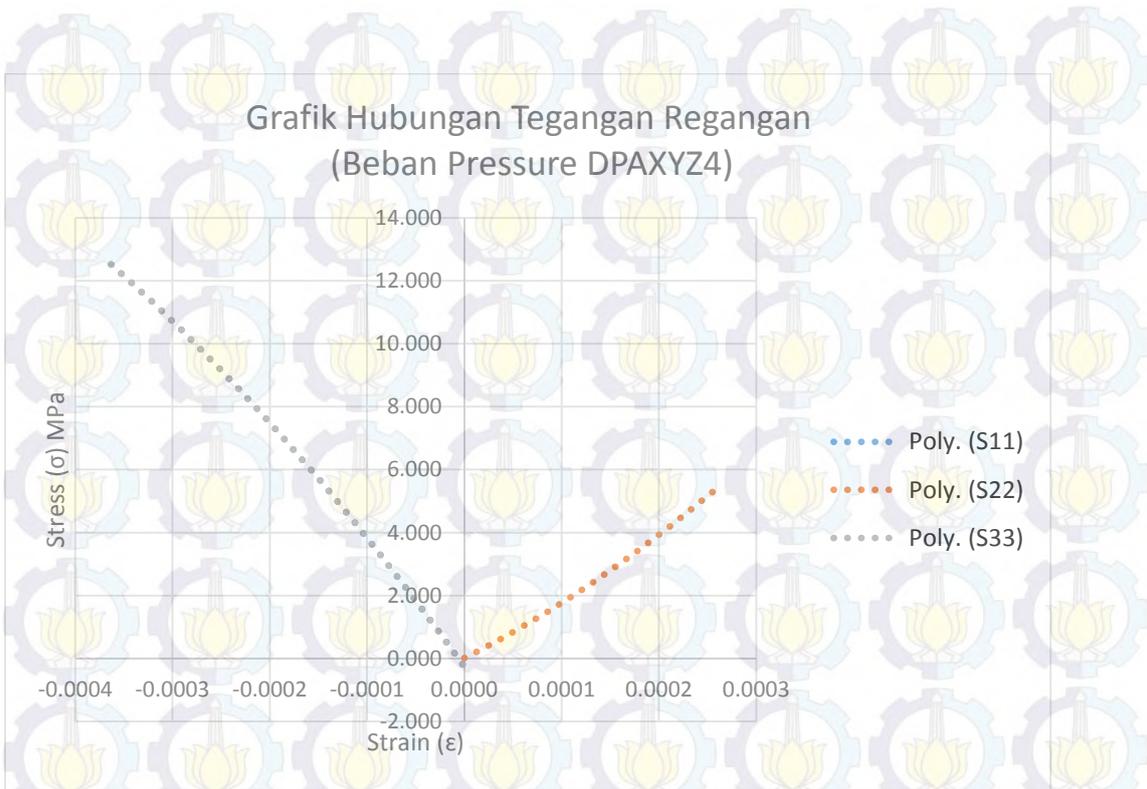


Gambar A.(b). 9 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ2

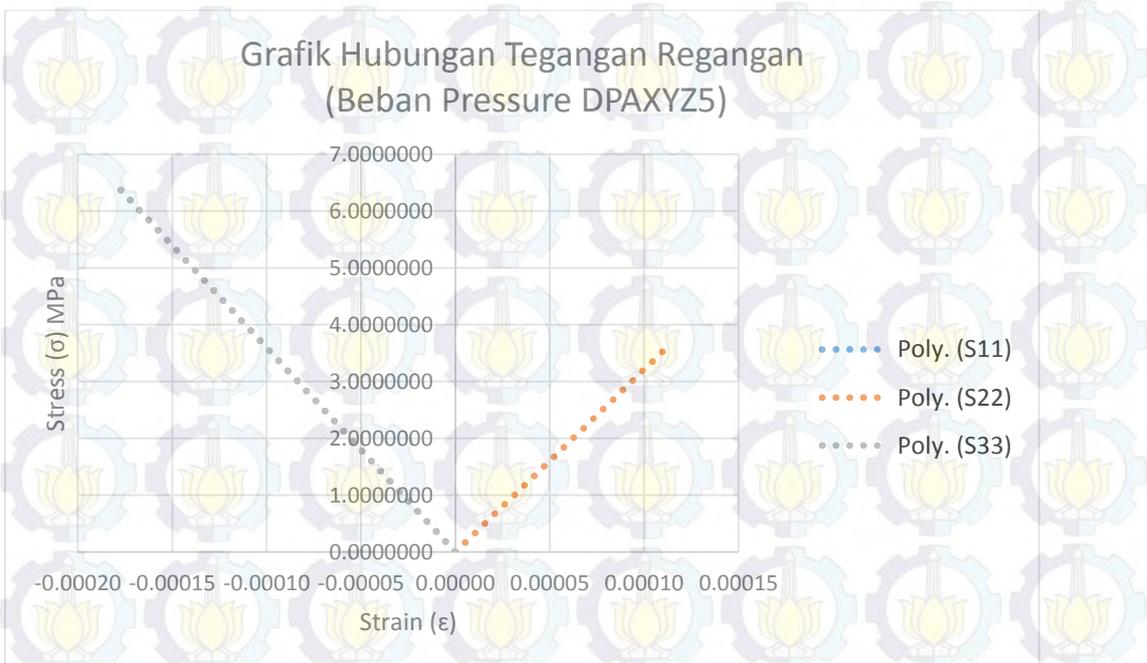
Grafik Hubungan Tegangan Regangan
(Beban Pressure DPAXYZ3)



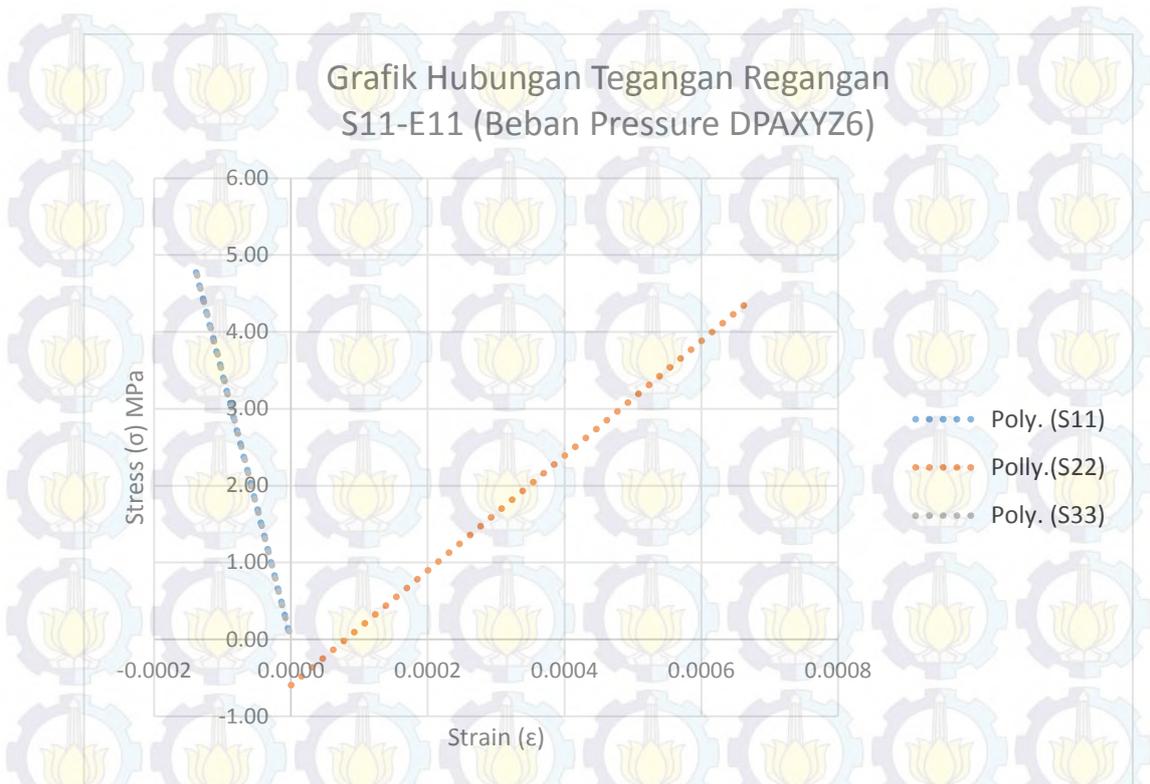
Gambar A.(b). 10 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPAXYZ3



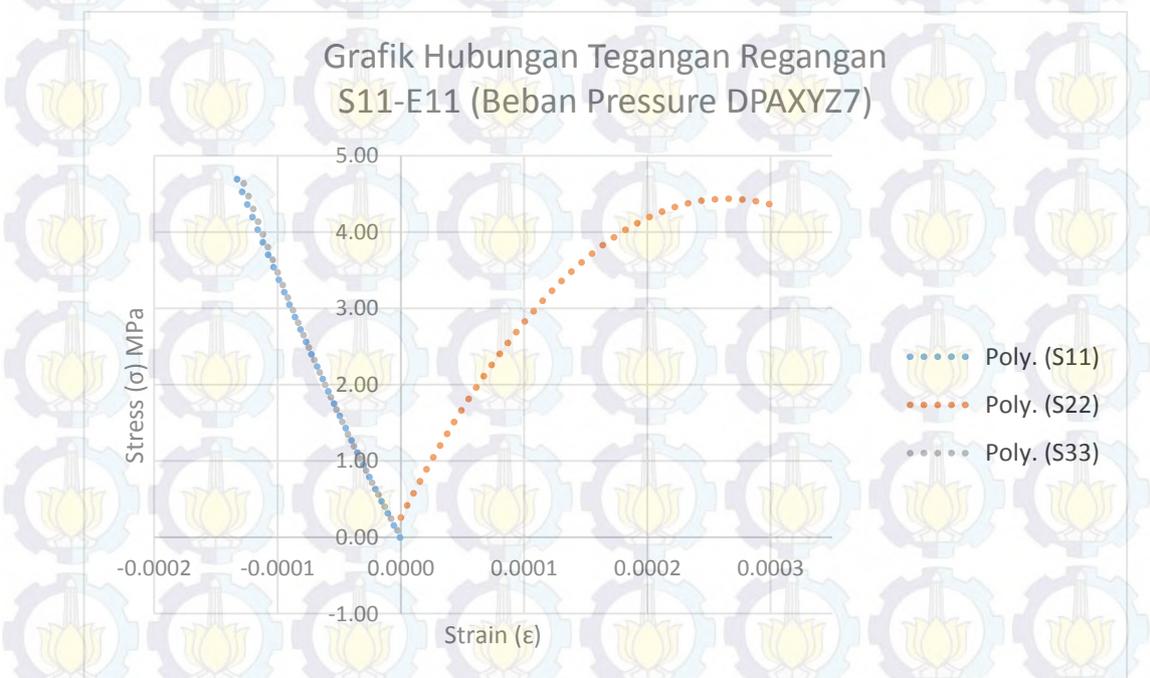
Gambar A.(b). 11 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPXYZ4



Gambar A.(b). 12 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPXYZ5



Gambar A.(b). 13 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPXYZ6



Gambar A.(b). 14 Grafik Hubungan Tegangan Regangan DPXYZ7



Halaman sengaja dikosongkan !!...

DAFTAR PUSTAKA

6.10, A. (2010). *Analysis User's Manual Vol III Material*.

Britto, A. M. (2005). *Running ABAQUS 6.4*.

Chen, W. (1982.). *Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill Book Company*.

D, Carreira; K, Chu. (1985). *Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. ACI Journal* ,.

Desai, C. S. (2012). *SOLID, STRUCTURE AND SOIL-STRUCTURE INTERACTION STATIC, DYNAMIC, CREEP THERMAL ANALYSES*. USA: Tucson, AZ,.

Endah Wahyuni, Data Iranata, Sylvya Anggraini. (2013). *PEMODELAN RESPONS NON-LINEAR MATERIAL BETON AKIBAT BEBAN BIAKSIAL DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE BERBASIS FINITE ELEMENT ANALYSIS*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

He Zhen-jun a, Song Yu-pu. (2009). *Multiaxial tensile-compressive strengths and failure criterion of plain. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, China*.

Hsuan-Teh Hu , Fu-Ming Lin, Yih-Yuan Jan. (2004). *Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics. Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University Taiwan*.

Hyong-Gyoung Kwak, F. (1990). *Finite Element Analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads*. California: Department of civil engineering, University of California.

Jeeho Lee dan Gregory L Fenves. (1998). *Plastic Damage Model for cyclic loading of concrete structure*. *Journal of engineering mechanics ASCE*.

Jia- Fei Jiang, Yu-Fei Wu. (2011). Identification of material parameter for Drucker Prager plasticity model fro FRP confined circular concrete coloumns. *Dept. of Civil and Architectural Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong.*

Kazuhiro Naganuma, Kenji Yonezawa, Osamu Kurimoto, Hiroaki Eto. (2004). Simulation of non-linier dynamic response of reinforde concrete scaled model using tree dimensional finite element methode. *13th World Conference on Earthquake Engineering.*

Kwak, H. G. and Filippou, Fillip C. . (1990). Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structure Under Monotonic Loads. *Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.*

Launay, P. and Gachon, H. (1971). Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress. *Am. Concr. Inst. Spec.*

Linlin Shi, Licheng Wang, Yupu Song, Lu Shen. (2013). Dynamic multiaxial strength and failure criterion of dam concrete. *Elsevier Ltd.*

Malm, R. (2006). *Shear cracks in concrete structures subjected ti in-plane stresses.* Sweden: Royal Institute of Technology.

McCormac, J. (2003.). *Desain Beton Bertulang Jilid 1.* Jakarta: Diterjemahkan oleh Sumargo. Penerbit Erlangga.

Michelis, P. (1987). True triaxial cyclic behaviour of concrete and rock in compression. *Int. J. of Plasticity, Vol.3, 249-270.*

Mills, L.L. and Zimmerman, R.M. (1970). Compressive strength of plain concrete under multiaksial loading condition. *J. Am. COncr. Inst, Vol67, no 10, 802-807.*

Moran, D. A. (2011). *Unified modelfor concrete coloumns confined by fiber-reinforced polymer jackets with practical applications.* Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Utah.

Nawy, E. G. (1985). *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Diterjemahkan oleh Bambang Suryoatmono. Eresco.

NPL Manual. (2007). *Manual for the Calculation of Elastic-Plastic Materials Models Parameters*. Reproduced with the permission of the Controller of HMSO and Queen's Printer for Scotland.

P. KMIECIK, M. KAMIŃSKI. (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego*.

Park, R., & Paulay, P. (1974). *Reinforced Concrete Structure*. New York: A Wiley Interscience Publication. Dipetik November 27, 2012, dari http://dc430.4shared.com/download/s0sQyavb/Reinforced_concrete_structures.pdf?tsid=20121127-091319-abeba613

Pin, C. S. (1998). *Finite element application for strenght analysis of scarf patch repaired composite laminates*. Taiwan: Chemical Engineering Chun Yuan Cristian University .

Prakash, A., Anandavalli, N., Madheswaran, C., Rajasankar, J., & Lakshmanan, N. (2011). Three Dimensional FE Model of Stud Connected Steel-Concrete Composite Girders Subjected to Monotonic Loading. *International Journal of Mechanics and Applications*, *I(1)*, 1-11. doi:10.5923/j.mechanics.20110101.01

Richard, R. M. (1975). Versatile Elastic – Plastic Stress-Strain Fomula. *Journal Engineering Mechanics Division, ASCE Vol. 101No. EM4*, 511-515.

Roosseno. (1951.). *Beton Tulang*. . Jakarta: PT. Pembangunan. .

Salvador Ivorra, Ramon Irlas, Luis Estevan, Jose Miguel Adam, Fransisco J. Pallares, Belen Ferrer. (2010). Drucker-Prager yield criterion application to study the behavior of CFRP confined concrete under compression. *Department of Construction Engineeering, University of Alicante, Spain*,.

Setiawan, D. (April 2008). Model Analisa Finite Element Untuk Mempresentasikan Prilaku Nonlinieritas Material Balok Beton Bertulang, Bond, Slip dan Pola Retak. *Wahana TEKNIK SIPIL Vol. 13 No. 1*, 7 - 16.

Shang Shiming, Song Yupu. (2012). Dynamic biaxial tensile–compressive strength and failure criterion of plain concrete. *State Key Laboratory of Coast and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, China*.

T.Yu, J.G Teng, YL. Wong, S.L Dong. (2008). *Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*.

Taijun Wang, Thomas T.C Hsu. (2001). Nonlinier finite element analysis of concrete structures using new constitutive models. *Dept of Civil and Enviromental Engineering University of Huston*.

Tjokrodimuljo, K. (1996.). Teknologi Beton. *Yogyakarta: Universitas Gajah Mada Press*.

Tomas Jankowiak, Tomas Lodygowski. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Poznan University of Technology, Institute of Structural Engineering (ISE)*.

V.T Tran, F-V Donze, P Marin. (2010). A discrete element model of concrete under high triaxial loading. *Elsevier Ltd*.

Van Gool, B. (2007). *Effects of blasting on stability of paste fill stopes at Cannington Mine*. Ph.D thesis, James Cook University.

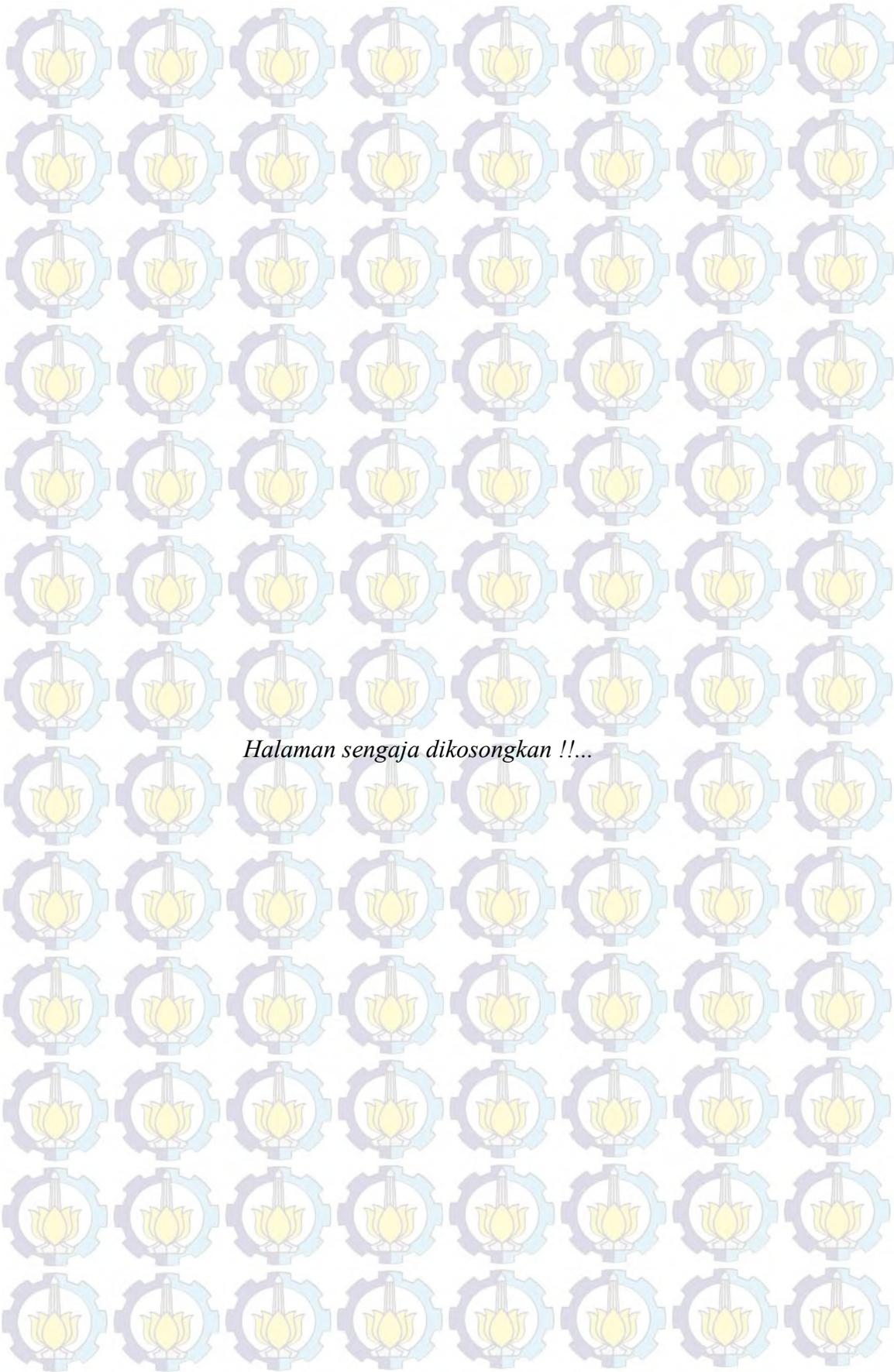
Vassilis K. Papanikolaou and Andreas J. Kappos. (2005). Modelling confinement in concrete coloumns and bridge piers trhough 3D non-linier finite element analysis. *Laboratory of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Civil Engineering Department, Thessaloniki, Greece*.

Vassilis K. Papanikolaou, A. J. (2007). Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression. *science direct, International Journal of Solids and Structures, Aristotle University of Thessaloniki, Greece*.

Wahjoedi. (2010.). Model Numerik Pengujian Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Tulangan Under Reinforce. *Wahana Teknik Sipil* 16(1).

Wahyudi, L., & A. Rahim, S. (1997). *Struktur Beton Bertulang Standar Baru SNI T-15-1991-03*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.

Zhang, X. (2002). *Punching failure analysis of reinforced concrete flat plates using simplified us failure criterion*. Australia: Griffith University Gold Coast Campus.



Halaman sengaja dikosongkan !!...

BIODATA PENULIS



Alfin Septya Nugroho

Berjenis kelamin laki-laki lahir di Surabaya pada tanggal 21 September 1991. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara.

Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Bojong 1 Tangerang (1997-2003), SMP Negeri 3 Tangerang (2003-2006), dan SMA Negeri 2 Tangerang (2006-2009). Setelah lulus dari SMA pada tahun 2009, penulis mengikuti SNMPTN ITS dan diterima di Perguruan Tinggi Negeri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Sipil dan terdaftar dengan NRP 3109100 104. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan kejenjang Pascasarjana atau Program Magister Struktur Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan NRP 3113202016.

Di Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS Surabaya ini penulis adalah Mahasiswa Program Pascasarjana (MT) dengan bidang studi struktur. Penulis merupakan orang yang aktif dalam organisasi, penulis berkontribusi dan menyumbangkan penghargaan dalam beberapa Lomba Tingkat Nasional.

Twitter&FB : Blood_suneh@yahoo.co.id

Email : alfin.s52.its@gmail.com



Halaman sengaja dikosongkan !!...