



**ANALISIS SKALA MESO PADA KOMPOSIT
BERPENGUAT *WOVEN BAG POLYPROPYLENE***

Skripsi

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin**

Oleh

Muhammad Idris Amarullah

NIM.5212414049

**TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2019**


PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Muhammad Idris Amarullah
NIM : 5212414049
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisis Skala Meso Pada Komposit Berpenguat *Woven Bag Polypropylene*

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, Agustus 2019

Pembimbing,



Dr. Heri Yudianto, S.Pd., M.T.

NIP. 196707261993031003

PENGESAHAN

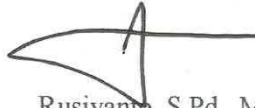
Skripsi dengan judul “Analisis Skala Meso Pada Komposit Berpenguat *Woven Bag Polypropylene*” telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 22 bulan Agustus tahun 2019

Oleh

Nama : Muhammad Idris Amarullah
NIM : 5212414049
Program Studi : Teknik Mesin

Panitia:

Ketua



Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Sekretaris



Samsudin Anis S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197601012003121002

Penguji 1



Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Penguji 2



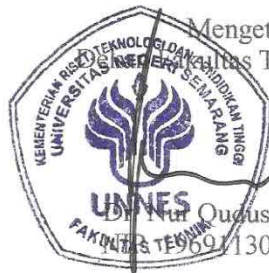
Kriswanto, S.Pd., M.T.
NIP. 198609032015041001

Pembimbing



Dr. Heri Yudiono, S.Pd., M.T.
NIP. 196707261993031003

Mengetahui:
Panitia Ujian Fakultas Teknik UNNES



Dr. Nur Qudus, M.T., IPM.
NIP. 19691301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, Agustus 2019

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Idris Amarullah

NIM. 5212414049

SARI ATAU RINGKASAN

Amarullah, Muhammad Idris. 2019. Analisis Skala Meso Pada Komposit Berpenguat *Woven Bag Polypropylene*. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Penelitian ini bertujuan untuk meneliti *material properties* komposit berpenguat *woven bag polypropylene* pada skala meso (unit sel) menggunakan simulasi dengan pendekatan metode elemen hingga. Keakuratan hasil prediksi simulasi divalidasi dengan cara membandingkan modulus elastisitas simulasi dengan hasil dari eksperimen pengujian tarik. Penelitian skala meso kemudian juga dilakukan dengan simulasi untuk meneliti pengaruh parameter skala meso komposit yaitu *yarn width*, *yarn spacing* dan *fabric thickness* terhadap modulus elastisitas (E_{11} , E_{22} , E_{33}), modulus geser (G_{12} , G_{23}), dan *Poisson ratio* (ν_{12} , ν_{23}).

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan simulasi. Eksperimen pengujian tarik dilakukan pada komposit laminat $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ (26 layer) berpenguat *woven bag polypropylene* untuk mengetahui data *material properties* khususnya modulus elastisitas. Simulasi metode elemen hingga untuk memprediksi material komposit menggunakan *software modelling* TexGen dan *finite element solver* ABAQUS dengan prosedur standar yang sudah ditetapkan. Analisa data penelitian menggunakan analisis deskriptif dan deskriptif kualitatif dengan persentase untuk mengukur keakuratan hasil simulasi terhadap eksperimen.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa modulus dari hasil simulasi lebih besar dari pada eksperimen pengujian tarik. Keakuratan simulasi dalam memprediksi modulus elastisitas eksperimen memiliki hasil yang akurat dengan persentase 84,1%. Hasil penelitian parameter skala meso menunjukkan bahwa dengan bertambahnya ukuran *yarn width* dan *fabric thickness* mengakibatkan nilai modulus turun. Sebaliknya terjadi pada parameter *yarn spacing* dimana dengan bertambahnya ukuran mengakibatkan naiknya nilai modulus. Sedangkan *Poisson ratio* relatif tidak berubah dengan naik atau turunnya ukuran parameter skala meso tersebut.

Kata kunci : Komposit, *woven bag polypropylene*, skala meso, Metode Elemen Hingga, TexGen.

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Analisis Skala Meso Pada Komposit Berpenguat *Woven Bag Polypropylene*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaikan kepada Nabi Muhammad S.A.W, mudah-mudahan kita semua mendapatkan safaat Nya di yaumul akhir nanti, Amin.

Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T.,IPM. Dekan Fakultas Teknik, Rusiyanto, S.Pd, M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin, Dr., Ir. Basyirun S.Pd., M.T., IPP., Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Mesin atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa.
3. Dr. Heri Yudiono, S.Pd., M.T. selaku Pembimbing yang penuh perhatian dan atas perkenaan memberi bimbingan dan dapat dihubungi sewaktu- waktu disertai kemudahan menunjukkan sumber-sumber yang relevan dengan penulisan karya ini.

4. Rusiyanto, S.Pd, M.T. dan Kriswanto, S.Pd, M.T. selaku Penguji I dan Penguji II yang telah memberi masukan kepada penulis yang sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan, menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
5. Semua dosen Jurusan Teknik Mesin FT UNNES yang telah memberi bekal pengetahuan yang berharga.
6. Orangtua dan Abang dan Adik tercinta yang selalu memberikan do'a, semangat, dukungan maupun motivasi.
7. Teman-teman Program Studi Teknik Mesin S1.
8. Berbagai pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap skripsi ini bermanfaat bagi pembaca pada umumnya, dan dunia keteknikan khususnya.

Semarang, Agustus 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
SARI ATAU RINGKASAN.....	v
PRAKATA.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR SINGKATAN TEKNIS DAN LAMBANG.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 IDENTIFIKASI MASALAH.....	5
1.3 PEMBATASAN MASALAH.....	6
1.4 RUMUSAN MASALAH.....	7
1.5 TUJUAN.....	8
1.6 MANFAAT.....	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	10
2.1 KAJIAN PUSTAKA.....	10
2.1.1 Perkembangan Material Komposit Tekstil.....	10
2.1.2 Metode dalam Analisis dan Memprediksi Sifat Material.....	11
2.1.3 Perkembangan Pemodelan Geometri Tekstil.....	14
2.2 LANDASAN TEORI.....	15
2.2.1 Komposit.....	15
2.2.2 <i>Textile Fabric Composites</i>	17
2.2.2.1 <i>2D Plain Woven</i>	18
2.2.3 Metode Elemen Hingga atau <i>Finite Element Method (FEM)</i>	19
2.2.4 Skala Pemodelan Analisis <i>Woven Fabric Composites</i>	23
2.2.5 Jenis – Jenis Perilaku Material terhadap Pembebanan.....	25
2.2.5.1 <i>Isotropic</i>	26

2.2.5.2 Bahan <i>Anisotropic</i>	27
2.2.5.3 Bahan <i>Monoclinic</i>	28
2.2.5.4 Bahan Orthotropik.....	29
2.2.5.5 <i>Transversersely Isotropic</i>	33
2.2.6 Pemodelan Material terhadap Pembebanan.....	33
2.2.6.1 <i>Micro-Mechanical Modelling</i>	34
2.2.6.2 <i>Meso-Mechanical Modelling</i>	41
2.2.7 Prosedur Standar untuk Pemodelan <i>FE</i> Unit Sel.....	42
2.2.8 <i>Geometric Modelling</i>	45
2.2.9 TexGen.....	47
2.2.9.1 <i>Yarn Paths</i>	48
2.2.9.2 <i>Yarn Cross Section</i>	49
2.2.9.3 <i>Interpolation Between Yarn Sections</i>	49
2.2.9.4 <i>Yarn Properties</i>	49
2.2.9.5 <i>Domain</i>	50
2.2.9.6 <i>Surface mesh</i>	51
2.2.9.7 <i>Volume mesh</i>	51
2.2.9.8 <i>Rendering and Export of Model</i>	54
2.2.10 <i>Material Properties</i>	54
2.2.10.1 Karung Plastik.....	54
2.2.10.2 Resin <i>Unsaturated Polyester (UP)</i>	55
2.2.11 <i>Boundary Condition</i>	56
2.2.12 Analisis Mikromekanis dengan Pendekatan Unit Sel.....	60
2.2.12.1 <i>Simple Cubic Packing System and Voronoi Cell</i>	61
2.2.12.2 <i>Displacements Fields Under Uniform Macroscopic Strains</i>	62
2.2.12.3 <i>Translational Symmetries and The Unit Cell</i>	64
2.2.12.4 <i>Displacement Boundary Condition For The Cubic Unit Cell</i>	65
2.2.12.5 <i>Application of Loads in Terms of Macroscopic Stresses and Effective Elastic Material Properties</i>	70
BAB III METODE PENELITIAN.....	74
3.1 WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN.....	74
3.2 DESAIN PENELITIAN.....	74
3.3 ALAT DAN BAHAN PENELITIAN.....	78

3.3.1	Alat dan Bahan untuk Eksperimen Pengujian Tarik.....	78
3.3.2	Alat dan Bahan untuk Simulasi Menggunakan Metode Elemen Hingga	80
3.4	PARAMETER PENELITIAN.....	81
3.4.1	Variabel Kontrol.....	81
3.4.2	Variabel Bebas.....	81
3.4.2.1	Parameter <i>Yarn Width</i>	81
3.4.2.2	Parameter <i>Yarn Spacing</i>	82
3.4.2.3	Parameter <i>Fabric Thickness</i>	83
3.4.3	Variabel Terikat.....	85
3.5	TEKNIK PENGUMPULAN DATA.....	85
3.5.1	Prosedur Pembuatan Spesimen dan Eksperimen Pengujian Tarik.....	85
3.5.2	Prosedur Simulasi Menggunakan Metode Elemen Hingga.....	89
3.5.2.1	Pengukuran Spesimen Penelitian.....	90
3.5.2.2	Membuat Model Spesimen Komposit Tekstil Menggunakan TexGen.....	91
3.6	KALIBRASI INSTRUMEN.....	97
3.7	TEKNIK ANALISIS DATA.....	97
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	99
4.1	Deskripsi Data.....	99
4.2	Analisis Data.....	100
4.2.1	Hasil Eksperimen Pengujian Tarik.....	100
4.2.2	Hasil Simulasi Metode Elemen Hingga.....	101
4.2.3	Studi Parameter.....	106
4.2.3.1	<i>Yarn Width</i>	106
4.2.3.2	<i>Yarn Spacing</i>	108
4.2.3.3	<i>Fabric Thickness</i>	110
4.2.3.4	<i>Effective Parameter</i>	112
4.3	Pembahasan.....	113
BAB V	PENUTUP.....	116
5.1	Kesimpulan.....	116
5.2	Saran.....	117
DAFTAR	PUSTAKA.....	118
LAMPIRAN	123

DAFTAR SINGKATAN TEKNIS DAN LAMBANG

DAFTAR SINGKATAN TEKNIS:

Singkatan	Keterangan	Halaman Pertama Kali Muncul
<i>PP</i>	<i>Polypropylene</i>	1
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i>	3
RVE	<i>Representative Volume Element</i>	4
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>	14
<i>DoF</i>	<i>Degree of Freedom</i>	21
<i>FEA</i>	<i>Finite Element Analysis</i>	22
<i>PBC</i>	<i>Periodic Boundary Condition</i>	59

DAFTAR LAMBANG:

Singkatan	Keterangan	Satuan	Halaman Pertama Kali Muncul
σ	Tegangan normal atau <i>normal stress</i>	MPa	27
τ	Tegangan geser atau <i>shear stress</i>	MPa	27
γ	Regangan geser atau <i>shear strain</i>	-	27
ε	Regangan normal atau <i>normal strain</i>	-	34
ε_{eng}	<i>Engineering strain</i>	-	35
C	<i>Stiffnes matrix tensor</i>	GPa	27
E	<i>Modulus elastisitas</i>	GPa	36
F	Gaya atau pembebanan	N	71
G	Modulus geser	GPa	39
<i>l</i>	Panjang akhir	mm	34
<i>lo</i>	Panjang mula - mula	mm	34

U	<i>Displacement</i>	-	68
ν	<i>Poisson ratio</i>	-	38
W	Kerja	Joule	71

Subscript

$1,2,3$	Vektor atau tensor pada koordinat x, y, dan z	-	27
x, y, z	Koordinat x, y, dan z	-	35
L, T	Longitudinal, transversal	-	40

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Bidang yang Mendefinisikan Domain dari P.....	50
Tabel 2.2 Spesifikasi <i>Unssaturated Polyester Resin</i> Yukalac 157 BQTN-EX.....	56
Tabel 3.1 Variabel <i>Yarn Width</i>	82
Tabel 3.2 Variabel <i>Yarn Spacing and Gap Size</i>	83
Tabel 3.3 Variabel <i>Fabric thickness Parameter</i>	84
Tabel 3.4 Tabel Pengumpulan Data Penelitian Eksperimen.....	91
Tabel 3.5 Data Geometri <i>Textile</i>	91
Tabel 3.6 Data Ukuran Domain Komposit Lamina.....	92
Tabel 3.7 Data Ukuran Domain Komposit Laminat.....	93
Tabel 3.8 Material Properties <i>Reinforcement</i> dan <i>Matrix</i>	94
Tabel 3.9 <i>Setting</i> untuk <i>Export Model</i>	95
Tabel 3.10 Tabel Pengumpulan Data Penelitian Parameter Laminat.....	96
Tabel 3.11 Tabel Pengumpulan Data Penelitian Parameter Lamina.....	97
Tabel 4.1 Hasil Eksperimen Pengujian Tarik.....	100
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Penelitian dengan Metode Elemen Hingga.....	101
Tabel 4.3 Hasil Penelitian Parameter <i>Yarn Width</i>	107
Tabel 4.4 Hasil Penelitian Parameter <i>Yarn Spacing</i>	109
Tabel 4.5 Hasil Penelitian Parameter <i>Fabric Thickness</i>	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Integrasi Skala Pemodelan Mekanik Mikro, Meso, dan Makro.....	13
Gambar 2.2 Klasifikasi Komposit Tekstil.....	17
Gambar 2.3 Jenis Pola Anyaman <i>2D Plain woven</i>	18
Gambar 2.4 Tabel dan Kolom Pola Anyaman dari <i>Plain Woven Fabric</i>	19
Gambar 2.5 Skala Struktur pada <i>Woven Fabric Composites</i>	24
Gambar 2.6 Reaksi Material Isotropik terhadap Pembebanan.....	26
Gambar 2.7 Material Anisotropik Tidak Memiliki Bidang yang Simetri.....	27
Gambar 2.8 Material Monoklinik yang Memiliki Satu Bidang Simetri.....	28
Gambar 2.9 Bidang Simetri pada Material Orthotropik.....	29
Gambar 2.10 Reaksi Material Komposit Serah Searah terhadap Pembebanan.....	30
Gambar 2.11 <i>Extension Shear Coupling</i> pada Komposit Serat Searah.....	31
Gambar 2.12 (a) Regangan dalam Bentuk Sederhana (b) <i>Engineering Strain</i>	34
Gambar 2.13 Tegangan pada Pembebanan Multiaxial.....	37
Gambar 2.14 Regangan pada Pembebanan Multiaxial.....	37
Gambar 2.15 Pemilihan <i>RVE</i> pada <i>Plain Woven</i> dan 3D Orthogonal.....	46
Gambar 2.16 Pemodelan Berbagai Struktur <i>Textile</i> oleh <i>Software Texgen</i>	48
Gambar 2.17 <i>Nodes</i> pada <i>Texgen</i> yang Mendefinisikan Jalur dari <i>Yarn</i>	49
Gambar 2.18 <i>Tetrahedral Element Volume Meshes</i>	52
Gambar 2.19 <i>Yarn Hexahedral Elemen Mesh</i>	52
Gambar 2.20 <i>Hexahedral Element Volume Meshes</i>	53
Gambar 2.21 Kondisi Batasan Periodik pada <i>Yarn</i>	58
Gambar 2.22 <i>Simple Cubic Packing System (A)</i> dan <i>Cubic Voronoi Cell (B)</i>	61
Gambar 2.23 <i>Model Unit Cell TexGen</i> dari <i>Komposit Textile</i>	62
Gambar 2.24 Rusuk – Rusuk dan <i>Vertices</i> pada Unit Sel Berbentuk Kubus.....	67

Gambar 3.1 Garis Besar Diagram Alir Penelitian.....	75
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> Eksperimen Pengujian Tarik Komposit.....	76
Gambar 3.3 <i>Flowchart</i> Penelitian Simulasi Metode Elemen Hingga.....	77
Gambar 3.4 <i>Torrontech Universal Testing Machine</i>	76
Gambar 3.5 <i>Plain Woven Polypropylene</i> dari Karung Plastik.....	87
Gambar 3.6 Lebar Benang atau <i>Yarn Width</i> pada <i>Woven</i>	82
Gambar 3.7 <i>Yarn Spacing</i> dan <i>Gap Size</i> pada <i>Woven</i>	83
Gambar 3.8 <i>Woven Fabric Thickness Parameter</i>	84
Gambar 3.9 Spesimen Uji Tarik Standar ASTM D638.....	87
Gambar 3.10 Spesimen <i>Woven Monofilament Polypropylene</i>	90
Gambar 3.11 Ketebalan Komposit dari Pengamatan Mikroskop.....	94
Gambar 3.12 Pola <i>Plain Woven Textile</i> pada Dialog <i>Weave Pattern</i>	92
Gambar 3.13 Susunan Unit Sel Komposit Lamina pada Komposit Laminat.....	93
Gambar 3.14 (a) Model Unit Sel Komposit Lamina. (b) Laminat.....	94
Gambar 4.1 Distribusi Tegangan Von Misses pada Komposit.....	102
Gambar 4.2 Tegangan Von Misses Maximum Pada Unit Sel Komposit.....	103
Gambar 4.3 Tegangan Von Misses Maksimum pada Komposit.....	104
Gambar 4.4 Spesimen Komposit Setelah Pengujian Tarik.....	104
Gambar 4.5 Modulus Elastisitas Penelitian Eksperimen dan Simulasi.....	105
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Lebar <i>Yarn</i> terhadap Modulus Elastisitas.....	107
Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Lebar <i>Yarn</i> terhadap Modulus Geser.....	108
Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Lebar Celah <i>Yarn</i> terhadap Modulus Elastisitas....	109
Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Lebar Celah <i>Yarn</i> terhadap Modulus Geser.....	110
Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Tebal <i>Fabric</i> terhadap Modulus Elastisitas.....	111
Gambar 4.11 Grafik Hubungan <i>Fabric Thickness</i> terhadap Modulus Geser.....	112

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Eksperimen Pengujian Tarik Spesimen 01.....	123
Lampiran 2. Data Eksperimen Pengujian Tarik Spesimen 02	124
Lampiran 3. Data Eksperimen Pengujian Tarik Spesimen 03	125
Lampiran 4 Data Eksperimen Pengujian Tarik Spesimen 04	126
Lampiran 5. Gambar Hasil Simulasi Komposit.....	127
Lampiran 6. Data Hasil Simulasi Load 0.....	128
Lampiran 7. Data Hasil Simulasi Load 1.....	129
Lampiran 8. Data Hasil Simulasi Load 2.....	130
Lampiran 9. Data Hasil Simulasi Load 3.....	131
Lampiran 10. Data Hasil Simulasi Load 4.....	132
Lampiran 11. Data Hasil Simulasi Load 5.....	133
Lampiran 12. Contoh Perhitungan Analisis Data Simulasi.....	134
Lampiran 13. Tabel Hasil Penelitian Parameter (1 dari 5).....	137
Lampiran 14. Tabel Hasil Penelitian Parameter (2 dari 5).....	138
Lampiran 15. Tabel Hasil Penelitian Parameter (3 dari 5).....	139
Lampiran 16. Tabel Hasil Penelitian Parameter (4 dari 5).....	140
Lampiran 17. Tabel Hasil Penelitian Parameter (5 dari 5).....	141

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda dan digabung atau dicampur secara makroskopis (Gibson, 1994: 1). Material komposit mulai dilirik penggunaannya diberbagai industri otomotif karena memiliki keunggulan dibanding dengan logam. Penggunaan logam pada berbagai komponen produk otomotif semakin berkurang dikarenakan komponen yang terbuat dari logam lebih berat dibanding dengan material komposit, proses pembentukannya yang relatif sulit, dapat mengalami korosi, dan biaya produksi yang relatif mahal (Ojahan dan Tri, 2015: 64a). Adanya inovasi material komposit yang ringan, kuat, dan ramah lingkungan serta mudah untuk diaplikasikan menjadikan daya tarik tersendiri bagi dunia industri otomotif sehingga prospek pasarnya sangat terbuka lebar.

Industri komposit berbahan plastik (*polymer*) pada sektor otomotif memiliki potensi untuk dikembangkan di masa depan. Plastik merupakan material yang memiliki sifat kuat, ringan, nonkorosif, fleksibel, dan murah sehingga membuatnya banyak digunakan di industri kemasan dan konstruksi (Pehlivan, *et al.*, 2004: 114). Salah satu inovasi yang sedang dikembangkan saat ini adalah penggunaan material komposit berpenguat karung plastik (*woven bag*) sebagai material alternatif pada *bumper* kendaraan. Inovasi ini menjadi sangat menarik untuk dikembangkan sebab karung plastik tersebut terbuat dari material polimer berbentuk monofilamen *polypropylene* (PP) yang merupakan golongan polimer

paling ringan dan memiliki sifat bahan ulet sehingga mudah dibentuk. *Polypropylene* memiliki massa jenis 0.9007 gr/cm^3 (ASTM D792) dan tegangan maksimum sebesar $19,53 \text{ kg/mm}^2$ (Sumaryono, 2012: 79). Anyaman pada karung plastik memberikan keunggulan tersendiri bila diolah menjadi komposit dikarenakan karung plastik memiliki bentuk anyaman polos dua dimensi (*2D plain woven*) yang mana digolongkan dalam bagian dari keluarga besar jenis komposit tekstil.

Komposit tekstil (*textile composites*) merupakan subkelas dari komposit serat kontinyu yang tersusun secara rapi dalam bentuk *woven*, *braided* atau *stitched*. Secara tradisional komposit dikembangkan sebagai material yang dimanfaatkan kekuatannya pada satu arah beban tertentu yaitu sejajar dengan arah serat demi mengeksploitasi secara maksimal properti anisotropik yang dimilikinya (Ruijter, 2009: 5). Komposit *woven* kemudian dikembangkan karena memiliki banyak kelebihan dalam hal performa kekuatan mekanik dibanding komposit laminat serat searah (*unidirectional fiber laminated composites*) (Dixit dan Mali, 2013: 1). Komposit serat searah memiliki properti sifat elastis yang bagus hanya pada arah orientasi seratnya saja, sedangkan pada arah melintang sangat lemah dan rawan akan proses delaminasi. Kekurangan inilah yang kemudian dapat diatasi oleh komposit *woven* dengan sifat elastisnya yang seimbang (Li dan Shiekh, 1988: 104). Selain kekuatan yang seimbang dari berbagai arah pembebanan, komposit *woven* menawarkan sebuah kelebihan dalam hal kemudahan proses manufaktur. Kelebihan lainnya adalah komposit *woven* menyerap lebih banyak energi saat terjadinya kegagalan yang terjadi secara

perlahan-lahan dalam suatu tahapan (Ruijter, 2009: 5). Kelebihan - kelebihan tersebut membuat komposit *woven* seringkali digunakan pada aplikasi seperti struktur-struktur yang rawan terjadinya kegagalan, sebagai lapisan yang berfungsi sebagai proteksi pembebanan *impact*, bagian bagian yang memiliki bentuk bentuk melengkung dan lain sebagainya. Contoh dari komponen - komponen tersebut banyak ditemukan pada bidang *aerospace*, otomotif, peralatan olahraga dan lain-lain.

Kompleksnya geometri struktur dari anyaman disertai dengan banyaknya berbagai parameter yang mempengaruhi kekuatan komposit *woven* membuat pemodelan dan analisisnya selalu memunculkan tantangan baru. Salah satu metode yang telah banyak digunakan untuk analisis tersebut yaitu dengan metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM). FEM telah banyak digunakan untuk menganalisis sifat efektif dari material komposit, terutama material komposit *woven* (Li, *et al.*, 2011). FEM didasarkan pada analisis distribusi tegangan dan regangan dari model geometrik dimana input parameternya berupa sifat material serat dan matriks.

Pemodelan komposit *woven* digolongkan pada tiga skala model yaitu mikromekanik, mesomekanik dan makromekanik dalam proses analisisnya (Dixit dan Mali, 2013: 4). Skala pemodelan mikromekanik melibatkan studi orientasi dan sifat mekanik dari penyusunan serat atau *fiber*. Pemodelan skala mesomekanik mengikuti konsep homogenisasi *fiber* yang membentuk suatu *yarn* dalam susunan *woven fabric* atau lembaran anyaman untuk mengevaluasi sifat mekanik unit selnya. Skala makromekanik berkaitan dengan memprediksi sifat

komposit *woven* dibawah deformasi kompleks pada suatu *part*. Pemodelan unit sel komposit karung plastik PP pada penelitian ini dilakukan pada skala meso dimana analisis dilakukan untuk meneliti kekuatan komposit *woven* yang dipengaruhi oleh parameter seperti lebar serat (*yarn width*), jarak antar serat (*yarn spacing*) dan ketebalan lembaran anyaman serat (*fabric thickness*).

FEM diterapkan pada analisis skala meso model komposit *woven* yang divisualisasikan dalam bentuk unit sel atau *Representative Volume Element* (RVE). Unit sel merupakan bagian terkecil yang dengannya dapat tersusun keseluruhan blok bangunan komposit *woven* (Tabiei dan Jiang, 1999). Prosedur umum untuk memprediksi sifat mekanik dari komposit *woven* dengan menggunakan FEM yaitu dengan membagi model komposit *woven* menjadi unit sel yang berulang. Batas-batas dari unit sel perlu diterapkan suatu kondisi yang disebut *periodic boundary condition* agar unit sel dapat mempresentasikan reaksi pembebanan dari keseluruhan lembaran *woven*.

Penerapan kondisi tersebut membutuhkan koordinat titik kontrol atau *node* dan *tessellation* pada setiap pasangan sisi dari unit sel yang secara presisi berkaitan. Kebutuhan akan hal ini sulit dipenuhi dalam beberapa kasus, khususnya pada komposit *woven* untuk menghasilkan hasil yang memuaskan tanpa menggunakan *software pre-processor finite element* yang dikembangkan dengan baik untuk hal tersebut. Pada penelitian ini penulis memperkenalkan metode dalam pemodelan unit sel dan penerapan *boundary condition* yang sudah disederhanakan oleh peneliti dari University of Nottingham melalui *open-source software* yang diberi nama TexGen. Unit sel dari komposit yang terbuat dari

susunan anyaman karung plastik nantinya dapat dimodelkan dengan *software* ini untuk memprediksi sifat mekanik dari komposit melalui simulasi analisis FEM.

Berangkat dari permasalahan dan kajian teori tersebut, penelitian ini lebih menitik beratkan pada simulasi menggunakan FEM untuk mengetahui *material properties* dari model skala meso atau unit sel komposit berpenguat *woven bag polypropylene*. Studi parameter dilakukan untuk meneliti bagaimana pengaruh parameter-parameter pada skala meso terhadap *material properties* komposit.

1.2 IDENTIFIKASI MASALAH

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dalam penelitian ini dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Penggunaan logam pada berbagai komponen produk otomotif mulai dikurangi dan diganti dengan material komposit karena kelebihannya. Dibutuhkan inovasi material komposit yang ringan, kuat dan ramah lingkungan serta mudah untuk diaplikasikan.
2. Secara tradisional, komposit dikembangkan sebagai material yang dimanfaatkan kekuatannya hanya pada satu arah beban tertentu yaitu sejajar dengan arah serat. Komponen khusus yang mengalami pembebanan kompleks seperti *bumper*, membutuhkan jenis komposit yang memiliki sifat yang tepat. Komposit tekstil kemudian dikembangkan karena dipandang memiliki propertis yang mendukung.
3. Komposit tekstil jenis *woven* berpenguat monofilamen *polypropylene* (PP) dipandang mempunyai propertis yang bagus sebagai material alternatif untuk

bumper. Perlunya penelitian lebih lanjut terhadap propertisnya dan seberapa efektif material tersebut.

4. Penelitian dibidang komposit *woven* baru dilirik dua dekade terakhir. Perlunya dikembangkan metode penelitian yang lebih dalam mengenai sifat material tersebut.
5. *Finite Element Method* (FEM) telah digunakan secara efektif untuk menganalisis sifat yang efektif dari suatu material. Dikarenakan kompleksnya geometri dan banyaknya parameter komposit *woven*, perlu untuk meneliti dengan membagi skala pemodelannya dalam berbagai skala yaitu mikro, meso dan makro.
6. Analisis FEM pada skala meso dilakukan pada unit sel dari struktur komposit. Memodelkan unit sel ini membutuhkan suatu model geometri yang akurat. Model unit sel tersebut disatu sisi menjadi sangat kompleks karena harus bisa menerapkan suatu kondisi batas periodik (*periodic boundary condition*) yang membuatnya dapat berperilaku mewakili keseluruhan bagian dari komposit.
7. Parameter pokok yang terdapat pada komposit *woven* pada skala meso yaitu lebar benang (*yarn width*), jarak antar benang (*yarn spacing*) dan ketebalan serat pada anyaman (*fabric thickness*). Perlunya diteliti bagaimana pengaruh parameter - parameter tersebut terhadap kekuatan komposit.

1.3 PEMBATAHAN MASALAH

Agar penelitian lebih fokus dan tidak meluas dari pembahasan yang dimaksud, penulis membatasinya pada ruang lingkup penelitian sebagai berikut:

1. Hasil penelitian simulasi yang divalidasi dengan hasil eksperimen adalah untuk modulus elastisitas (E_{11}) pada komposit laminat berorientasi $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$.
2. Penelitian simulasi menggunakan FEM dengan pendekatan model skala meso yaitu unit sel dari komposit.
3. Pemodelan geometri dari komposit menggunakan *software* TexGen dan *finite element solver*-nya menggunakan *software* ABAQUS.
4. Sifat material yang dianalisis didasarkan pada perhitungan unit sel dari komposit dimana kondisi *periodic boundary*-nya merujuk kepada jurnal berjudul "*Unit cells for micromechanical analyses of particle-refined composites*" oleh Shuguang Li dan Anchana Wongsto.
5. Jenis *woven* pada penelitian ini dibatasi hanya untuk jenis *2D plain woven* atau anyaman dasar seperti pada plastik karung beras.
6. Spesimen pada eksperimen pengujian tarik dibuat menggunakan karung plastik bekas wadah dari beras.
7. Parameter – parameter yang diteliti pada penelitian ini meliputi tiga jenis parameter *woven* pada skala meso yaitu *yarn width*, *yarn spacing*, dan *fabric thickness*. Parameter tersebut diteliti bagaimana pengaruhnya terhadap material propertis berupa modulus elastisitas, modulus geser dan *Poisson ratio*.

1.4 RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana analisis simulasi *material properties* komposit berpenguat *woven bag polypropylene* dengan pendekatan FEM?.

2. Bagaimana keakuratan hasil FEM tersebut dalam memprediksi hasil *material properties* komposit secara eksperimen?.
3. Bagaimana pengaruh parameter skala meso *yarn width*, *yarn spacing* dan *fabric thickness* terhadap modulus elastisitas (E_{11} , E_{22} , E_{33}), modulus geser (G_{12} , G_{23}), dan *Poisson ratio* (ν_{12} , ν_{23}) pada komposit berpenguat *woven bag polypropylene* menggunakan FEM?.

1.5 TUJUAN

1. Mengetahui hasil analisis simulasi *material properties* komposit berpenguat *woven bag polypropylene* menggunakan pendekatan FEM.
2. Menganalisis keakuratan simulasi FEM terhadap komposit berpenguat *woven bag polypropylene* dengan membandingkan modulus elastisitas hasil simulasi terhadap hasil dari eksperimen pengujian tarik.
3. Menganalisis pengaruh parameter skala meso komposit berpenguat *woven bag polypropylene* (*yarn width*, *yarn spacing* dan *fabric thickness*) terhadap modulus elastisitas (E_{11} , E_{22} , E_{33}), modulus geser (G_{12} , G_{23}), dan *Poisson ratio* (ν_{12} , ν_{23}) menggunakan pendekatan FEM.

1.6 MANFAAT

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengenalkan analisis FEM yang dapat digunakan untuk menganalisis *material properties* dari komposit *woven bag polypropylene* secara cepat dan akurat.

2. Mengembangkan keilmuan dalam bidang rekayasa material komposit sebagai material alternatif khususnya komposit berpenguat *woven bag polypropylene*.
3. Sebagai tambahan literatur atau referensi untuk penelitian selanjutnya.
4. Masukan yang membangun guna meningkatkan kualitas lembaga pendidikan khususnya pada bidang ilmu bahan yang ada.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

2.1.1 Perkembangan Material Komposit Tekstil

Selama dua dekade terakhir, perhatian sektor manufaktur komposit telah dikhususkan kepada material komposit tekstil terutama pada jenis *woven fabric*. Material tersebut memiliki banyak kelebihan dalam hal performa kekuatan mekaniknya dibanding komposit serat searah (*unidirectional fiber laminated composites*) (Dixit dan Mali: 2013: 1). Komposit *woven* memiliki properti yang seimbang pada bidang-bidangnya (Li dan Shiekh, 1988: 104). Komposit *woven* memiliki ketahanan impak yang lebih baik dimana dapat menyerap lebih banyak energi saat terjadinya kegagalan (Ruijter, 2009: 5). Ketangguhan impak pada komposit tekstil *woven* lebih tinggi dikarenakan jalinan ikatan serat-seratnya yang mencegah terjadinya pertumbuhan kerusakan (Peng dan Cao, 2000).

Reorientasi serat dapat menyebabkan perubahan yang signifikan pada kekakuan dari *fabric* dimana mempengaruhi perilaku material terhadap tabrakan dan dampak pembebanan impak (Tabiei dan Ivanov, 2003). Fitur-fitur inilah yang kemudian membuat *woven fabric* menjadi populer untuk digunakan pada struktur yang dikenakan pembebanan impak melintang, seperti airbag, armor pelindung tubuh manusia dan jaket pelindung mesin pesawat jet (Ivanov dan Tabiei, 2002). Salah satu keuntungan penting lainnya dari *woven fabric* bagi produsen komposit adalah kemudahan *formability* yang ditawarkannya dengan biaya produksi rendah.

Berbagai teknik pembentukan seperti rolling, molding, kompresi dan diafragma forming, serta permesinan, telah digunakan untuk pembuatan *woven fabric* komposit (Lim dan Ramakrishna, 2002). Laporan penelitian juga menunjukkan bahwa *woven* komposit sangat cocok untuk pembuatan komponen - komponen yang melengkung (Page dan Wang, 2002).

Meningkatnya kekhawatiran tentang aspek lingkungan dari produk industri, komposit *woven* berbahan polimer termoplastik dipandang sebagai bahan unggul untuk produksi secara massal dikarenakan potensi daur ulangnya (Lebrun, *et al.*, 2003). Ketika mempertimbangkan sejumlah besar bahan mentah konsumsi dalam industri modern terutama dalam bidang transportasi, penggunaan komposit *woven* termoplastik tersebut dapat menjadi cara yang efisien untuk mengurangi limbah lingkungan. Bahan polimer dibuat sebagai penguat komposit berstruktur *textile* melalui metode pembuatan tekstil seperti menganyam (*weaving*), mengepang (*braiding*), merajut (*knitting*) dikarenakan rasio harga dan kualitasnya yang bagus (Postle, 1996).

2.1.2 Metode dalam Analisis dan Memprediksi Sifat Material

Finite Element Method (FEM). FEM telah banyak digunakan untuk memprediksi sifat efektif dari material komposit, terutama untuk komposit *woven* (Li, *et al.*, 2011). FEM merupakan salah satu pemodelan numerik yang paling mapan karena perkembangan komputer dan peralatan teknik yang cepat (Hu dan Teng, 1996).

FEM didasarkan pada analisis distribusi tegangan dan regangan dari model geometrik dimana input parameternya berupa sifat material serat dan matriks. Keakuratan dari perhitungan distribusi tegangan-regangan mempengaruhi sifat produk akhir secara langsung. Representasi yang memadai dari geometri model sangat penting untuk memperoleh hasil prediksi yang akurat.

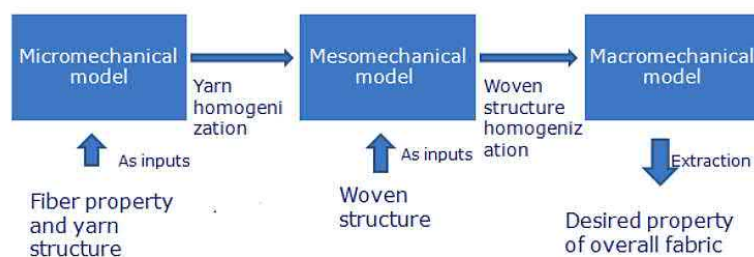
Beberapa kesulitan yang muncul diantaranya karena perilaku nonlinier dari *woven fabric*. Perilaku tersebut merupakan hasil resistansi *woven* yang rendah terhadap deformasi geser pada bidangnya dimana memungkinkan *yarn* untuk menyesuaikan dengan mudah pembebanan dan akhirnya memberikan *woven* perilaku anisotropik yang sangat besar (Xue, *et al.*, 2003). Kompleksnya struktur dan sifat yang unik dari bahan - bahan tekstil juga menjadi tantangan tersendiri untuk memprediksi sifat produk komposit (Shen, *et al.*, 2014). Akibatnya munculah kebutuhan besar terhadap model yang detail untuk memprediksi perilaku mekanik dari *woven fabric* selama proses manufaktur serta sifat mekaniknya setelah deformasi pada produk akhir komposit.

Pengembangan analisis dari komposit tekstil pada akhirnya bergantung pada model yang komprehensif dan dapat digunakan secara nyata pada aplikasi kehidupan sebenarnya. Perlu dicatat juga bahwa model-model bahan yang dibuat tidak boleh terlalu rumit untuk digunakan secara praktis atau terlalu sederhana sehingga meremehkan sifat dan karakteristik yang akurat dari material komposit. Model tersebut juga harus cukup fleksibel untuk dimasukkan ke dalam prosedur pemodelan umum seperti metode elemen hingga.

Model diklasifikasikan menjadi model mikro-mekanik, model meso-mekanik dan model makro-mekanik berdasarkan skalanya. Studi tahap mikro-mekanik mempelajari *yarn* dengan memperhatikan pengaruh orientasi, struktur dan sifat serat penyusunnya. Tahap mikromekanik adalah proses mentransfer sifat dari serat penyusun untuk keseluruhan properti yang terakit menjadi *yarn*.

Model meso-mekanik berfokus pada studi properti keseluruhan dari unit sel *fabric* dengan pengenalan geometri unit sel dan mempertimbangkan *yarn* sebagai material yang homogen dimana keseluruhan sifat homogen *yarn* tersebut didapat dari model mikro-mekanis sebelumnya. Model makro-mekanis bertujuan memprediksi deformasi yang rumit dari *fabric* secara keseluruhan dengan mempertimbangkan *fabric* sebagai material kontinum (Takano, *et al.*, 1999).

The Textile Society, lembaga studi dalam disiplin tekstil mengusulkan hirarki pemodelan berdasarkan tiga skala pemodelan: pemodelan *micromechanical* dari *yarn*, pemodelan meso-mekanik dari unit sel *fabric* dan pemodelan makro-mekanik dari lembar *fabric* (Shen, 2013 : 9) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Integrasi dari Skala Pemodelan Mekanik Mikro, Meso, dan

Makro (Sumber : Shen, 2013 : 9).

Satu-satunya input data untuk keseluruhan prosedur pemodelan menurut konsep pemodelan tekstil yang terintegrasi tersebut adalah sifat serat, struktur *yarn* dan struktur *fabric*. Properti serat dan struktur *yarn* diperkenalkan pada tahap pemodelan pertama sebagai input parameter untuk analisis mekanik dari *yarn* dan penghitungan sifat-sifat *yarn*. Properti *yarn* tersebut kemudian ditransfer ke tahap meso-mekanik sebagai input. *Yarn* dalam model meso-mekanik dianggap homogen dan sifat *yarn* sesuai dengan proses homogenisasi yang menghubungkan tahap model pertama dan kedua.

Geometri unit sel dari *fabric* selanjutnya diperkenalkan pada tahap ini untuk membuat model 3D solid yang akurat. Analisis yang dilakukan terbatas pada unit sel *fabric*. Proses homogenisasi diperlukan untuk menghubungkan tahap kedua dan ketiga dengan memperhitungkan unit sel dan atributnya dalam lembar *fabric*. Tahap pemodelan makro-mekanis kemudian dilakukan berdasarkan pada asumsi kontinum bahan untuk memprediksi kinerja mekanik dari potongan *fabric* yang diperluas terhadap deformasi kompleks (Bogdanovich, 2006).

2.1.3 Perkembangan Pemodelan Geometri Tekstil

Prasyarat pertama dalam melakukan analisis elemen hingga adalah membangun model geometrik objek dengan akurat. Banyak metode dan konsep yang diusulkan untuk mengembangkan model tekstil 2D atau 3D menggunakan *Computer Aided Design* (CAD). Pierce, *et al.* memprakarsai penelitian mengenai arsitektur dari anyaman (*woven*) pertama kali dengan mendeskripsikannya dalam penampang melingkar. Lomov, *et al.* (2007), Robitaille, *et al.* (1999), dan Hofstee,

et al. (2000) mengusulkan deskripsi geometrik yang lebih sesuai dimana dapat berkontribusi terhadap pemodelan tekstil yang lain. Perkiraan deskripsi dari geometri tersebut kemudian ditemukan dengan mempelajari pola jalinan dari anyaman. Beberapa peneliti seperti Adanur dan Liao mengusulkan model geometri *fabric* menggunakan komputer yang dibantu teknik desain geometrik sehingga mampu menghasilkan berbagai model *fabric* geometris lain yang berbeda seperti kain tenunan, keping, dan rajutan (Adanur dan Liao, 1998).

Lomov, *et al.* (2007) selanjutnya memodelkan *woven fabric* komposit yang dikembangkan dan diimplementasikan dalam perangkat lunak bernama WiseTex untuk menentukan geometri dari komposit tekstil. Perangkat lunak TexGen (2012) lalu dikembangkan oleh Universitas Nottingham untuk tujuan pemodelan geometri 3D tekstil di unit tingkat sel dengan mekanisme pemodelan geometri yang didasarkan pada konsep generatif model dimana bentuk *cross-sectional* diterjemahkan sepanjang dari jalur *yarn* (Sherburn, 2007).

2.2 LANDASAN TEORI

2.2.1 Komposit

Komposit adalah suatu material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih material sehingga dihasilkan material yang mempunyai sifat mekanik dan karakteristik yang berbeda dari material pembentuknya. Beberapa lamina komposit dapat ditumpuk dengan arah orientasi serat yang berbeda, gabungan lamina ini disebut sebagai laminat. Komposit dibentuk dari dua jenis material yang berbeda, yaitu:

1. Matriks.

Matriks berfungsi sebagai pengikat dari penguat, mendistribusikan beban antara penguat, memproteksi penguat dari lingkungan, dan melindungi permukaan abrasi mekanis. Pemilihan matriks dalam suatu komposit menjadi penting karena dalam suatu komposit dibutuhkan sifat mekanis yang baik, sifat mampu proses yang baik, dan juga memiliki resistansi yang baik terhadap bahan kimia dan panas.

2. *Filler* (Pengisi) atau *Reinforcement* (Penguat).

Filler berfungsi sebagai penguat dalam komposit untuk meningkatkan sifat dari material komposit yang dihasilkan dan memiliki kemampuan untuk ditempatkan pada arah pembebanan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Bahan penguat komposit dapat berbentuk serat, partikel, serpihan, atau juga dapat berbentuk lain. Berdasarkan jenis penguatnya, komposit dibagi menjadi 3 macam, yaitu:

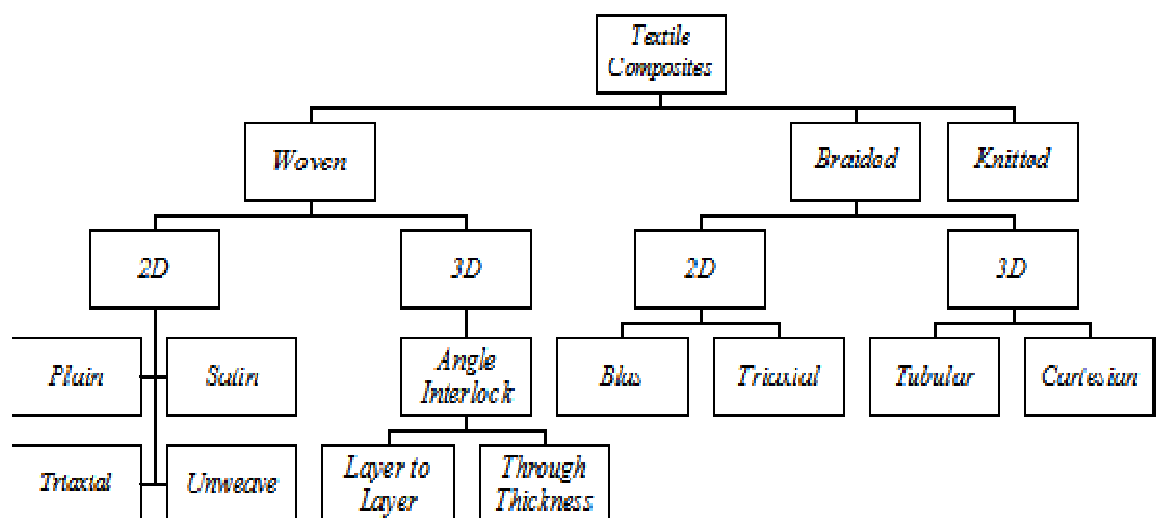
- Partikulat yang terdiri dari partikel besar dan penguat dispersi.
- *Fiber* atau serat yang terdiri dari kontinyu dan diskontinyu.
- Struktural yang terdiri dari lamina dan *panel sandwich*.

Bahan umumnya lebih kuat dan lebih kaku dalam bentuk serat daripada dalam bentuk *bulk*. *Defect* atau cacat mikroskopik yang bertindak sebagai lokasi inisiasi fraktur dalam bahan berbentuk *bulk* tereduksi ketika bahan tersebut ditarik menjadi bagian yang lebih tipis. Sebuah bahan mengandung sangat sedikit cacat mikroskopis dalam bentuk serat yang denganya retakan memulai untuk menghasilkan kegagalan katastropik, sehingga kekuatan serat lebih besar dari pada kekuatan *bulk* pada suatu material.

2.2.2 Textile Fabric Composites

Kain tekstil atau *textile fabric* terbuat dari benang (*yarn*) yang saling terikat dimana unsur dasarnya berupa serat (*fiber*). *Textile fabric* selain digunakan sebagai bahan garmen, dianggap juga sebagai material *engineering* dengan kemampuan teknis yang kuat dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi komposit. *Textile fabric* tidak hanya menawarkan kekuatan pada strukturnya tetapi juga memberikan fleksibilitas pembentukan yang cukup baik (mudah ditekuk, digeser, maupun diputar). Potensi *textile fabric* sebagai produk *engineering* tergantung pada kemampuannya untuk memberikan sifat yang diinginkan pada suatu aplikasi komposit (Banerjee, 2014).

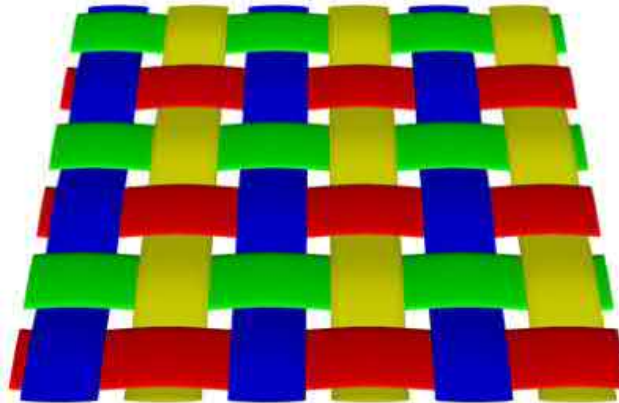
Struktur komposit tekstil dapat diklasifikasikan sesuai dengan proses manufaktur atau fabrikasi dari *textile fabric*, yaitu diantaranya adalah proses menganyam (*weaving*), mengepang (*braiding*) dan merajut (*knitting*). Klasifikasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi Komposit Tekstil (Sumber: Dixit, 2013; 2).

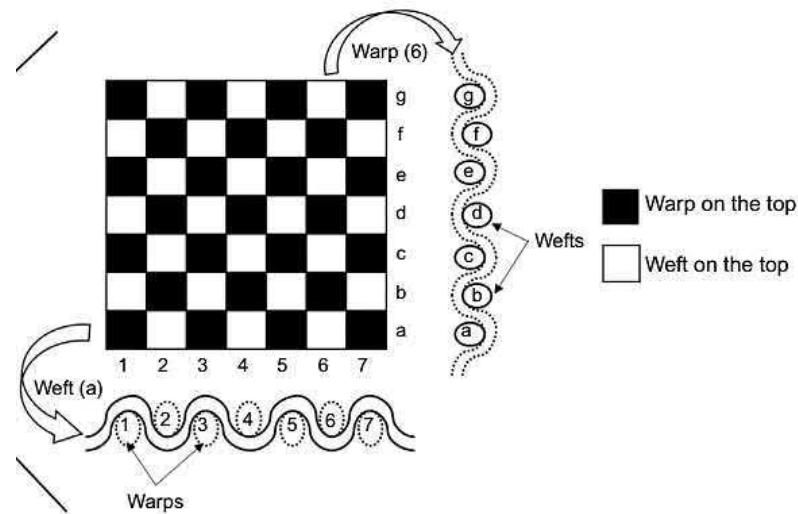
2.2.2.1 2D Plain Woven

2D woven fabric adalah jenis *fabric textile* yang paling banyak digunakan dalam industri komposit. Jenis *fabric* ini memiliki dua set *yarn* yaitu *warp* (0°) dan *weft* (90°) yang tersusun tegak lurus mengikat satu sama lain membentuk suatu permukaan anyaman atau *woven* (Banerjee, 2014). Jenis - jenis dasar anyamannya memiliki variasi yaitu polos (*plain*), *satin*, dan *triaxial* (3 set *yarn*). Pola *2D plain woven* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Jenis Pola Anyaman *2D Plain Woven*.

Jalinan antara *warp* dan *weft* dari *2D plain woven fabric* pada skala mikroskopis dapat dengan mudah diamati dimana terlihat struktur yang koheren dan stabil. Tampak samping jika diperiksa maka akan terlihat bahwa pada lokasi tertentu *warp* berada di atas *weft* dan kemudian begitu sebaliknya. Pola ini terus berulang di seluruh struktur *woven*. Pola anyaman tersebut dapat diindikasikan menggunakan tabel sederhana dari beberapa baris dan kolom yang masing-masing mewakili satu *warp* dan *weft* seperti yang direpresentasikan Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Tabel dan Kolom yang Merepresentasikan Pola Anyaman dari *Plain Woven Fabric*. (Sumber: Kumar dan Hu, 2018).

Kotak hitam menunjukkan posisi *warp* yang berada di atas *weft* dan kotak kosong (putih) menunjukkan sebaliknya. Pola naik dan turun masing-masing *warp* berbeda dari *warp* di kiri atau kanannya. *Warp* (1) berada di atas *weft* (a, c, e, dan g), sedangkan *warp* (2) berada di atas *weft* (b, d dan f). Pola *warp* (1) berulang kembali atau sama dengan *warp* (3, 5, 7 dan selanjutnya) sedangkan pola *warp* (2) sama dengan *warp* (4, 6, 8 dan seterusnya).

2.2.3 *Finite Element Method (FEM)*

Finite Element Method adalah salah satu dari metode numerik untuk menyelesaikan masalah-masalah teknik dan problem matematis dari suatu gejala fisik. Metode ini dikenal sebagai metode elemen hingga karena kita membagi (*discretizes*) struktur menjadi sejumlah kecil elemen terbatas (*finite*). Komponen mekanis dalam bentuk batang atau balok sederhana dapat dianalisis dengan metode dasar mekanika. Sangat jarang pada kenyataannya komponen mekanis

berbentuk sederhana, sehingga membutuhkan metode numerik yang lebih kompleks dan kemudian terciptalah metode elemen hingga. Metodenya adalah dengan cara mendiskretisasi atau membagi komponen menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana dimana interaksi antar bagian kecil tersebut ditentukan berdasarkan fenomena fisik yang akan diselesaikan. Penentuan model *finite element* bergantung pada beberapa faktor yaitu masalah fisik termasuk masalah pengetahuan prinsip mekanik dan pemahaman mengenai prosedur *finite element* yang ada untuk analisa. Diskretisasi dari *domain* ke *finite element* adalah langkah awal pada FEM. Bentuk, ukuran, jumlah dan konfigurasi elemen pada simulasi dengan FEM harus di pilih secara hati-hati agar bentuk original atau *domain* tersimulasi dengan baik. Beberapa hal yang di perhatikan dalam diskretisasi adalah :

1. Tipe elemen.

2. Ukuran elemen.

Ukuran elemen berpengaruh pada konvergensi solusi dari simulasi. Ukuran elemen yang kecil membuat solusi tersebut semakin akurat tetapi berpengaruh terhadap waktu komputasi yang lama. Suatu benda bisa memiliki ukuran elemen yang berbeda. Contohnya adalah suatu benda dengan lubang dimana akan memiliki ukuran elemen yang berbeda pada daerah dekat lubang dan daerah yang jauh dari lubang. Wilayah yang dekat dengan lubang umumnya memiliki ukuran elemen yang lebih kecil. Karakteristik lain pada ukuran elemen adalah aspek rasio dari elemen tersebut.

3. Lokasi *nodes*.

Propertis material dan kondisi luar seperti beban, temperatur, dan sebagainya jika tidak mengalami perubahan geometri mendadak maka akan terbagi sama besar atau jarak antar *nodes* akan sama. Diskontinuitas jika ada pada suatu masalah maka *nodes* akan didefinisikan berdasarkan diskontinuitas tersebut.

4. Jumlah elemen.

Jumlah elemen yang ditentukan berpengaruh pada tingkat akurasi dan ukuran elemen. Jumlah elemen yang semakin banyak membuat semakin tingginya tingkat akurasi dari suatu simulasi. Jumlah elemen yang banyak juga mempengaruhi jumlah derajat kebebasan atau *Degree of Freedom (DoF)* dan berpengaruh pada penyimpanan *memory*.

5. Penyederhanaan model.

Simulasi dapat dilakukan dengan setengah dari benda tersebut atau seperempat dari benda tersebut jika benda memiliki bentuk yang simetris sehingga waktu komputasi tidak memakan waktu yang lama.

6. Batasan dari suatu model.

Beberapa kasus pada benda yang memiliki model yang tidak terbatas, contohnya seperti lapisan batas yang tidak dapat didefinisikan maka dalam kasus ini berefek pada penurunan beban secara bertahap dan meningkatkan jarak dari titik beban.

7. Skema penomoran *node*.

Matrix yang ada pada analisa *finite element* adalah simetri dan saling terikat. Persyaratan penyimpanan komputer bisa ditentukan dengan mengurangi penyimpan yang hanya menyimpan elemen yang terlibat dalam *bandwith* pada matrix. *Bandwith* pada matrix ini bergantung pada skema penomoran *node*, jika mengecilkan *bandwith* maka persyaratan penyimpanan akan berkurang dan waktu komputasi juga akan berkurang. *Bandwith* tersebut dapat dikecilkan dengan skema penomoran *node*.

8. Generasi *mesh* secara otomatis.

Prosedur penomoran *node* tidak mungkin dilakukan pada sistem yang besar, generasi *mesh* secara otomatis harus dilakukan dari diskretisasi geometri ke *finite element mesh* yang efisien.

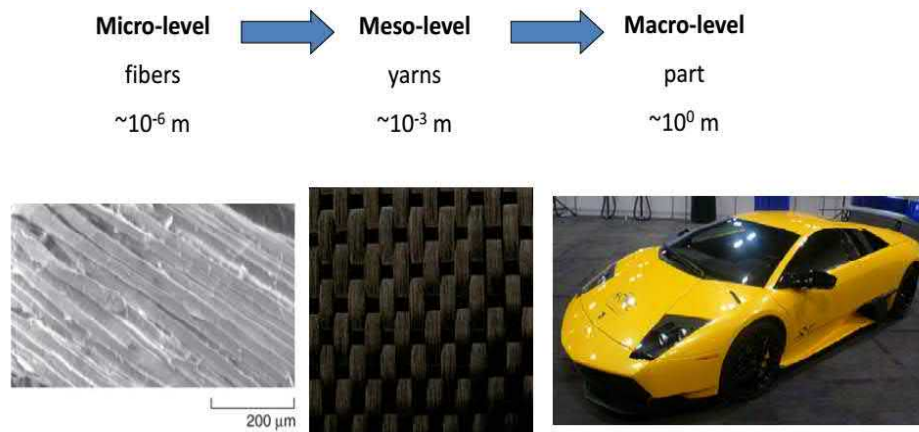
Analisis elemen hingga atau *Finite Element Analysis* (FEA) eksplisit digunakan untuk memprediksi sifat-sifat mekanis unit sel. FEM implisit umumnya lebih baik dibandingkan dengan metode eksplisit untuk menyelesaikan suatu masalah statis. Metode eksplisit dianggap lebih cocok karena kerumitan kontak yang ada dalam struktur tekstil. Metode ini melibatkan pemberlakuan *yarn* sebagai daerah dari suatu kontinum dimana hubungan tegangan-tegangan yang diberikan diasumsikan. Deformasi dapat dikenakan pada unit sel dengan mereplikasi uji eksperimental yang mungkin dialami oleh *woven* dalam aplikasi yang diberikan melalui penerapan syarat batas pada *yarn*. Metode elemen hingga kemudian akan memprediksi kesetimbangan pada kondisi *steady state* dari *fabric* terhadap deformasi yang diberikan.

Perhitungan tekanan dan regangan dalam *yarn* secara numerik dapat dilakukan setelah mendiskritkan model terlebih dahulu. Persyaratan penting lain dalam hal ini adalah setiap elemen harus memiliki batas yang dapat berbagi dengan tetangganya. Batas-batas tersebut terdiri dari sisi yang didefinisikan oleh tepian yang pada gilirannya ditentukan oleh suatu titik atau *nodes*. Regangan pada setiap elemen dihitung berdasarkan deformasi yang terjadi pada elemen dimana deformasinya tergantung dari posisi *nodes*. Regangan ini kemudian akan menghasilkan *stress* di dalam elemen yang dapat dihitung berdasarkan hubungan tegangan-regangan (model material atau model konstitutif). Gaya yang beraksi pada *node* dapat diekstrapolasikan dari *stress* yang terjadi di dalam elemen. Saat model berada dalam keadaan *steady state*, gaya total yang bekerja pada setiap *node* adalah sama dengan nol kecuali pada *node* dimana *displacement* telah ditentukan.

2.2.4 Skala Pemodelan Analisis *Woven Fabric Composites*

Perilaku mekanik dari *woven fabric* sulit diprediksi dikarenakan interaksi yang rumit pada *yarn*. Karakterisasi pada berbagai tingkatan atau skala merupakan hambatan terbesar dalam implementasi analisis *woven fabric*. Serat tradisional seperti serat pendek dan serat panjang (*unidirectional*) kompositnya sering diperlakukan pada skala mikro dan makro (Potluri, *et al.*, 2006). Sedangkan Komposit tekstil khususnya komposit yang berasal dari *woven fabric* memiliki skala peralihan atau pertengahan yang dikenal sebagai skala meso. *Woven fabric* umumnya dianggap sebagai sebuah struktur bahan hierarkis yang memiliki tiga skala struktural (Lomov, *et al.*, 2007). Ketiga skala ini disebut skala mikro, skala

meso dan skala makro dimana merupakan tingkatan yang terkecil hingga tingkatan yang memiliki urutan magnitudo terbesar (Gambar 2.5). Urutan dari besarnya untuk masing-masing skala dan definisi perilaku material tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Tiga Tingkatan atau Skala Struktur pada *Woven Fabric Composites*. (Sumber : Komeili, 2010: 6)

1. Skala Mikro.

Skala mikro didefinisikan oleh susunan serat yang menyusun sebuah *yarn*. Urutan besaran dalam skala ini mendekati ukuran dari sebuah serat yaitu sekitar 5-20 μ meter dan relatif lebih kecil dibandingkan dengan bagian akhir atau bahkan *yarn* serat. Interaksi dan perilaku serat memiliki pengaruh properti yang signifikan pada skala meso sehingga memiliki efek perilaku pada skala makro.

2. Skala Meso.

Skala meso dikarakterisasi oleh dimensi dari *yarn*, interaksi tiap-tiap *yarn* dan tekstur dari *fabric*. Skala meso juga mendefinisikan struktur internal dari *yarn* dan variasi arah *yarn* tersebut. Urutan besarnya yaitu direntang 10^{-3} - 10^{-2} meter

tergantung pada ukuran *yarn* dan pola dari *fabric*. Skala meso sangat mempengaruhi perilaku mekanik dari sebuah *woven fabric* dan merupakan skala yang paling penting untuk dianalisis dikarenakan *yarn* itu sendiri terbuat dari bundel serat dimana merupakan hirarki skala berikutnya (Guagliano dan Riva, 2001). Analisis pada skala meso meliputi geometri dari *woven fabric* dan jalinan setiap *yarn*. Skala *yarn* dianggap sebagai suatu *domain* kontinyu.

3. Skala Makro.

Skala makro dapat didefinisikan sebagai skala geometri dari produk akhir komposit yang biasanya berada pada rentang ukuran 10^{-1} - 10^0 meter. Geometri bagian mekanis yang paling sering diamati diantaranya adalah kelengkungan, fraksi volume serat dan sudut geser. Perilaku makroskopik sangat bergantung pada interaksi *yarn* pada skala meso.

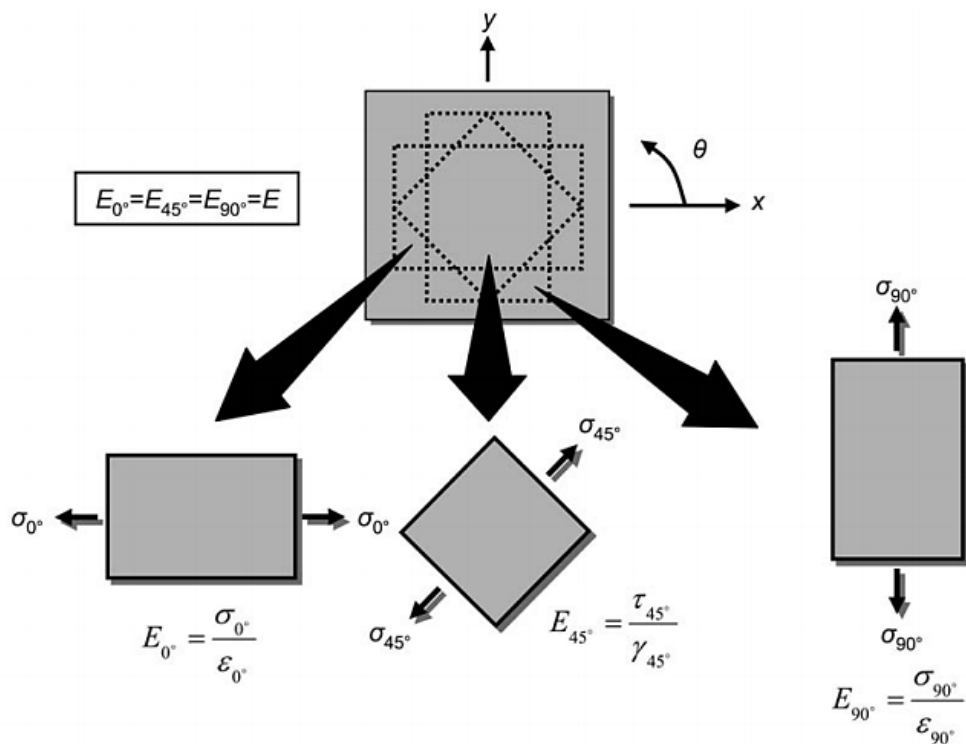
2.2.5 Jenis – Jenis Perilaku Material terhadap Pembebanan

Berdasarkan perilakunya terhadap kondisi pembebanan, suatu material diklasifikasikan menjadi:

- (i) Isotropik
- (ii) Anisotropik
- (iii) Monoklinik
- (iv) Orthotropik
- (v) *Transversely Isotropic*

2.2.5.1 Isotropic

Bahan isotropik memiliki sifat material yang sama disemua arah dan beban normal hanya akan menciptakan regangan normal. Material tersebut mengandung jumlah bidang simetri properti material yang tak terbatas melewati suatu titik. Properti material isotropik bersifat independen terhadap arah. Reaksi elemen material isotropik terhadap pembebanan sebagai contohnya ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Reaksi Material Isotropik terhadap Pembebanan (Sumber : Champbell, 2010).

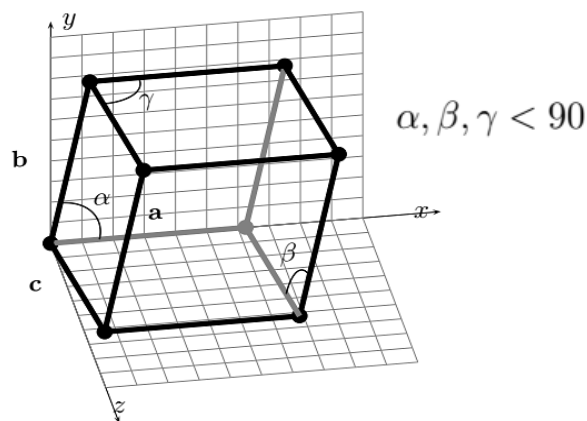
Material isotropik yang diberi beban sepanjang arah 0° , 45° , dan 90° , modulus elastisitasnya (E) adalah sama di masing-masing arah orientasi ($E_{0^\circ} = E_{45^\circ} = E_{90^\circ}$). Bahan ini memiliki dua konstanta elastis independen yaitu:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11}-C_{12})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11}-C_{12})}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11}-C_{12})}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

(2.1)

2.2.5.2 Bahan *Anisotropic*

Bahan anisotropik memiliki sifat material yang berbeda disemua arah pada suatu titik ditubuhnya. Tidak ada bidang dari material yang memiliki sifat simetri (*triclinic*) dalam bahan anisotropik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Material Anisotropik Tidak Memiliki Bidang yang Simetri (*Triclinic*).

Beban normal selain akan mengakibatkan regangan normal juga akan membuat regangan geser. Sifat fisik akan berbeda pada arah yang berbeda pula sehingga sifat material bergantung pada arah pembebananya. Bahan anisotropik

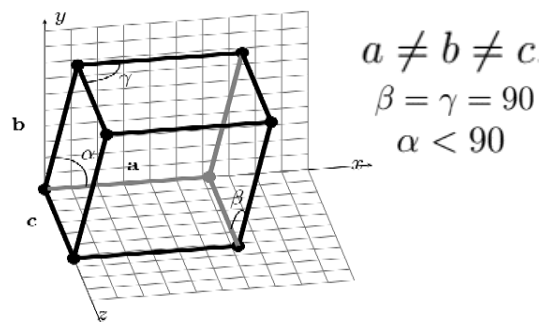
memiliki 21 konstanta elastis yang independen dalam hubungan tegangan-regangannya yaitu:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Tegangan normal tidak hanya menghasilkan regangan normal di arah lain karena efek Poisson tetapi juga menghasilkan regangan geser karena pengaruh timbal balik. Tegangan geser tidak hanya menghasilkan regangan geser tetapi juga akan menghasilkan regangan normal.

2.2.5.3 Bahan *Monoclinic*

Bahan monoklinik memiliki satu bidang simetri sifat material. Gambar 2.8 menunjukkan bidang xy (bidang 1-2) yang dianggap sebagai bidang yang simetri pada bahan monoklinik.



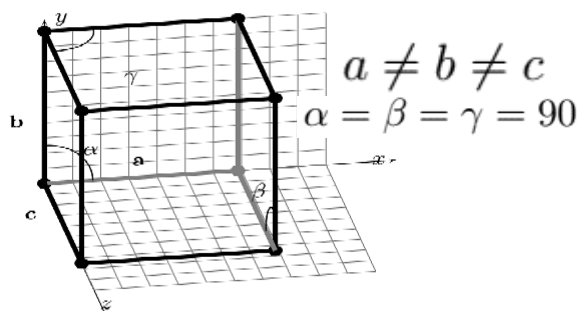
Gambar 2.8 Material Monoklinik yang Memiliki Satu Bidang Simetri.

Ada 13 konstanta elastis independen dalam *stiffnes matrix* bahan monoklinik seperti yang diberikan pada persamaan di bawah ini. Tegangan geser dari bidang pada salah satu sumbu yang tegak lurus dengan bidang simetri (bidang 2-3 dan 3-1) karena memiliki satu bidang simetri material maka hanya akan berkontribusi untuk regangan geser bidang tersebut. Tegangan normal tidak akan berkontribusi terhadap regangan geser pada bidang ini.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

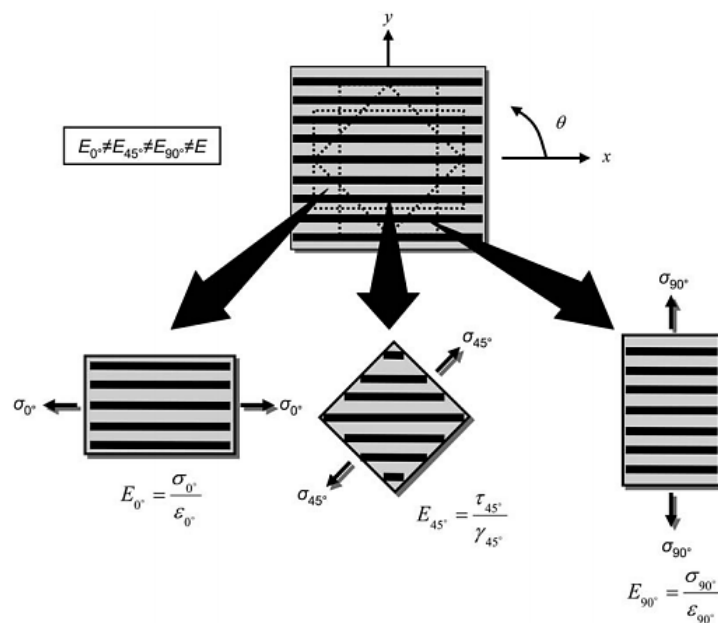
2.2.5.4 Bahan Orthotropik

Bahan orthotropik memiliki tiga bidang simetri yang saling tegak lurus seperti yang ditunjukkan Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Bidang Simetri pada Material Orthotropik.

Komposit berpenguat serat *unidirectional* secara umum mempunyai tiga bidang tersebut dan diklasifikasikan sebagai bahan ortotropik. Komposit tersebut memiliki tiga sumbu simetri yang saling tegak lurus dan beban yang diterapkan sejajar dengan sumbu-sumbu ini hanya akan menghasilkan regangan normal. Reaksi pembebanan dari komposit tersebut akan bervariasi dengan arah didalam material seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Modulus pada maerial ini akan berbeda disetiap arah orientasinya ($E_{0^\circ} \neq E_{45^\circ} \neq E_{90^\circ}$).

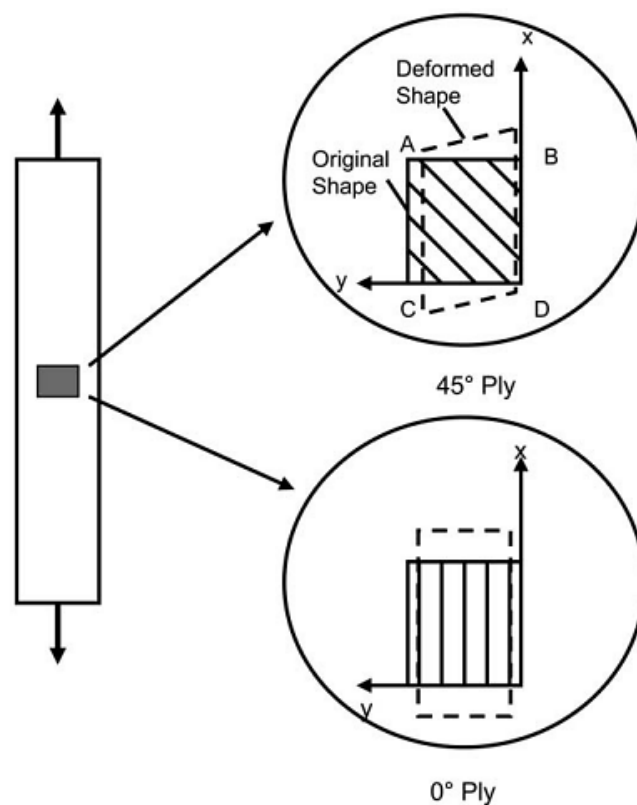


Gambar 2.10 Reaksi Material Komposit dengan Serah *Unidirectional* terhadap Pembebanan (Sumber : Champbell, 2010).

Sifat material orthotropik sangat dipengaruhi oleh arah pembebanannya. Ketika pembebanan diaplikasikan dari arah yang tidak merujuk sistem koordinat utama pada material (parallel atau *perpendicular*), material orthotropik akan berperilaku sama dengan material anisotropik dimana akan menghasilkan regangan normal dan geser. Fenomena ini juga disebut sebagai *extension-shear*

coupling sehingga sifat mekanik material orthotropik adalah fungsi dari orientasinya.

Fenomena tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.11 dimana spesimen komposit *unidirectional* memiliki serat yang berorientasi pada sudut 45 derajat dengan sumbu x. Elemen persegi yang diamati pada spesimen ini memiliki serat yang sejajar dengan arah diagonal atau garis AD pada elemen dan sebaliknya, arah serat tersebut tegak lurus dengan garis diagonal BC.



Gambar 2.11 *Extension Shear Coupling* pada Komposit Serat Searah

(Sumber : Champbell, 2010).

Elemen tersebut menyiratkan bahwa sepanjang diagonal AD lebih kaku dibanding dengan diagonal BC. Persegi dari elemen berubah bentuk ketika

tegangan tarik diterapkan pada spesimen komposit. Panjang pada diagonal AD tidak akan meregang lebih besar daripada regangan pada diagonal BC karena kekakuannya yang lebih tinggi sehingga elemen yang tadinya persegi, berubah bentuk menjadi bentuk jajaran genjang. Regangan geser yang terjadi merupakan hasil fenomena kopel dari regangan yang terjadi pada arah x dan y.

Gambar 2.11 pada bagian bawah menunjukkan jika arah serat sejajar dengan arah tegangan yang diberikan pada material (orientasi serat 0 derajat) maka pemanjangan akan terjadi kearah x dengan kontraksi pada arah y dan elemen akan terdistorsi tetap dalam berbentuk persegi panjang. Efek kopling yang ditunjukkan oleh komposit hanya terjadi jika tegangan dan regangan diaplikasikan tidak berdasarkan dari referensi arah material. Perilaku material disebut sebagai orthotropik khusus yaitu ketika tegangan normal diaplikasikan pada arah utama material, jika tidak maka disebut sebagai orthotropik umum yang memiliki perilaku sama dengan material anisotropik. Ada sembilan konstanta elastis yang independen dalam *stiffnes matriks* seperti yang diberikan persamaan di bawah ini untuk bahan orthotropik khusus.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

(2. 4)

Hubungan tegangan-regangan tersebut menunjukkan bahwa tegangan normal yang diterapkan pada salah satu arah utama material material orthotropik menyebabkan pemanjangan pada arah diterapkannya tegangan tersebut dan kontraksi pada dua arah transversal lainnya. Sedangkan tegangan normal yang diterapkan pada arah selain dari arah utama material akan menciptakan pemanjangan dan deformasi geser.

2.2.5.5 *Transversely Isotropic*

Material *transversely isotropic* misalnya serat *unidirectional*, memiliki sumbu simetri pada sumbu longitudinalnya dan semua arah yang tegak lurus dengan sumbu longitudinalnya yaitu lebih dari tiga sumbu simetri yang saling tegak lurus . Ada lima independen konstanta elastis untuk bahan-bahan ini, yaitu :

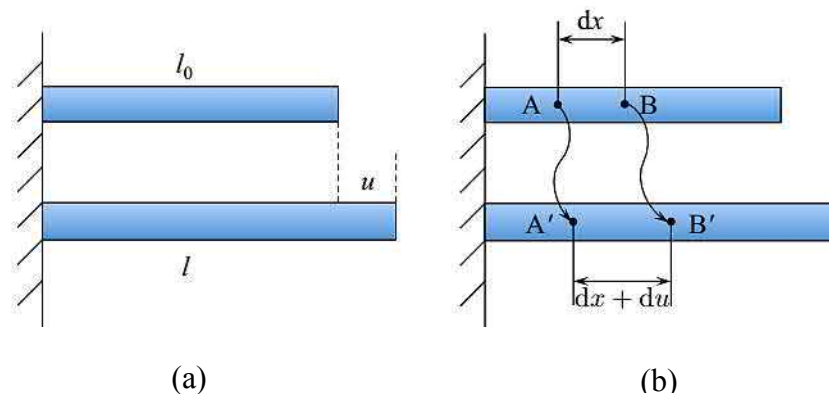
$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11}-C_{12})}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.6 Pemodelan Material terhadap Pembebanan

Model material menggambarkan tegangan pada *yarn* sebagai fungsi dari regangannya dan kemudian akan menentukan gaya apa yang dihasilkan dari *displacement* yang terjadi. Sub bab ini menyajikan masalah signifikan dalam pemodelan perilaku mekanis dari *woven*.

2.2.6.1 Micro-Mechanical Modelling

Tujuan pemodelan mikro-mekanis adalah untuk menggambarkan hubungan tegangan-regangan dari *yarn* dan mendapatkan *displacement* apa yang akan dihasilkan dari beban yang diberikan pada arah yang berbeda. Sifat-sifat *yarn* yang dihitung dari tahapan ini nantinya akan digunakan lebih lanjut dalam pemodelan meso-mekanik. Hal penting pertama untuk memulai pembahasan ini adalah untuk sepenuhnya memahami makna regangan sebelum penerapan material pada model. Regangan atau *strain* (ϵ) merepresentasikan deformasi atau perubahan ukuran pada suatu tubuh material seperti yang ditunjukkan Gambar 2.12 .



Gambar 2.12 (a) Regangan dalam Bentuk Sederhana (b) *Engineering Strain*.

Bentuk yang sederhana pada kasus satu dimensi (Gambar 2.12a) dengan skenario deformasi yang terjadi seragam, regangan dirumuskan sebagai:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.6)$$

Regangan dapat didefinisikan dalam bentuk yang disebut *engineering strain* jika deformasi pada tubuh tidak lagi seragam seperti ditunjukkan Gambar 2.12b, *engineering strain* dirumuskan :

$$\epsilon_{\text{eng}} = \frac{(dx + du) - dx}{dx} = \frac{du}{dx} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) juga biasa dituliskan dalam bentuk alternatif:

$$du = \epsilon dx \quad (2.8)$$

Persamaan (2.7) dengan asumsi ruang euclidian dalam kasus tiga dimensional dapat diekspresikan meluas menjadi tiga arah orthogonal (x, y dan z) sehingga menjadi:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Menurut mekanika suatu bahan, regangan geser (*shear strain*) didefinisikan sebagai persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xy} &= \epsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \epsilon_{xz} &= \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \epsilon_{yz} &= \epsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

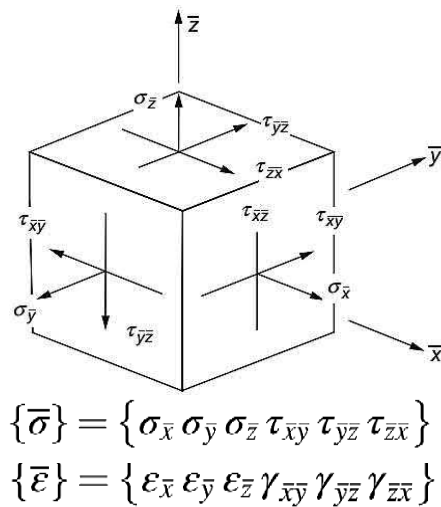
Deformasi pada titik mana pun di dalam tubuh dapat didefinisikan sebagai regangan tarik dan regangan geser $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}$. Regangan yang terjadi di

dalam tubuh akan menyebabkan gaya internal untuk menahan terjadinya deformasi. Gaya internal ini dapat diekspresikan sebagai tegangan atau *stress* yang merupakan distribusi internal gaya per satuan luas. *Stress* biasanya dihitung sebagai fungsi dari *strain* yaitu dengan persamaan:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.11)$$

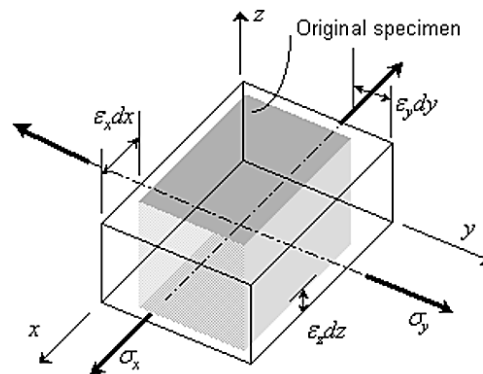
Fungsi pada persamaan (2.11) menggambarkan hubungan antara *stress* dan *strain* atau biasanya disebut sebagai model material atau persamaan konstitutif yang akan dicari pada pemodelan mikro-mekanis. Bahan disebut sebagai bahan isotropik jika hubungan tegangan-regangan materialnya sama dan tidak terpengaruh oleh arah, sedangkan jika hubungan tegangan-regangan tersebut berbeda pada tubuh yang sama dikarenakan bergantung dari arah, maka bahan tersebut kemudian disebut sebagai bahan anisotropik.

Teori elastisitas modern menggeneralisasikan hukum Hooke's untuk mengatakan bahwa *strain* (deformasi) benda atau bahan elastis sebanding dengan tegangan yang diberikan padanya. Tegangan dan regangan umum mungkin memiliki beberapa komponen independen atau "faktor proporsionalitas" yang bukan lagi hanya bilangan real tunggal melainkan peta linier (tensor) yang dapat diwakili oleh matrix dari bilangan real. Perilaku mekanis dari material solid pada kasus pembebanan multiaxial dikarakterisasi dalam bentuk tegangan dan regangan yang lebih rumit yaitu seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Tegangan pada Pembebanan Multiaxial.

Gambar 2.13 memperlihatkan bahwa ada enam komponen tegangan dan masing-masing mengakibatkan regangan tertentu seperti yang ditunjukkan Gambar 2.14 . Hukum Hooke's dalam bentuk tiga dimensi ini dapat diturunkan menggunakan *Poisson ratio* dan bentuk hukum Hooke's dari dimensi tertentu.



Gambar 2.14 Regangan pada Pembebanan Multiaxial.

Pembebanan diberikan pada arah (1) atau koordinat x kemudian juga mengakibatkan penyusutan pada arah perpendikular yaitu y dan z atau (2) dan (3) yang dapat dituliskan:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1' &= \frac{1}{E} \sigma_1, \\
\varepsilon_2' &= -\frac{\nu}{E} \sigma_1, \\
\varepsilon_3' &= -\frac{\nu}{E} \sigma_1,
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

Persamaan yang sama juga didapatkan pada arah pembebanan koordinat y dan z. Pembebanan pada koordinat z atau (3) yaitu:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1'' &= -\frac{\nu}{E} \sigma_2, \\
\varepsilon_2'' &= \frac{1}{E} \sigma_2, \\
\varepsilon_3'' &= -\frac{\nu}{E} \sigma_2,
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

Pembebanan pada koordinat z (3) yaitu:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1''' &= -\frac{\nu}{E} \sigma_3, \\
\varepsilon_2''' &= -\frac{\nu}{E} \sigma_3, \\
\varepsilon_3''' &= \frac{1}{E} \sigma_3.
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

Dengan menjumlahkan ketiga kasus pembebanan pada persamaan tersebut ($\varepsilon_i = \varepsilon_i' + \varepsilon_i'' + \varepsilon_i'''$) regangan normal didapatkan:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{1}{E} (\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)), \\
\varepsilon_2 &= \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)), \\
\varepsilon_3 &= \frac{1}{E} (\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)),
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

Tegangan normal tidak mengakibatkan regangan geser pada komponen pada material isotropis. Regangan geser hanya diakibatkan oleh tegangan geser sebagaimana yang dirumuskan dalam persamaan:

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy}/G \quad (2.16)$$

Hubungan antara Modulus Elastisitas (E), Modulus Geser (G) dan *Poisson ratio* (ν) dirumuskan oleh persamaan:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.17)$$

Substitusi Persamaan (2.16) ke persamaan (2.17) didapatkan regangan geser :

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E} \quad (2.18)$$

Persamaan yang sama juga digunakan untuk mendapatkan regangan geser γ_{yz} dan γ_{zx} sehingga dengan menggabungkan semua persamaan regangan normal pada persamaan (2.15) dan regangan geser pada persamaan (2.18), dapat dibuat dalam bentuk matrix:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Invers pada matrix, didapat persamaan untuk tegangan:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Bahan pada *yarn* umumnya adalah bahan anisotropik namun sebenarnya tidak sepenuhnya anisotropik. Respon stress pada bidang dibagian penampangnya merupakan respon bahan isotropik sehingga bahan *yarn* dapat dianggap sebagai material isotropik secara melintang atau *transversely isotropic*. Stress-nya jika material diasumsikan sebagai material elastis linier bisa didefinisikan sebagai fungsi dari *strain* dengan 5 konstanta. Konstanta tersebut adalah modulus longitudinal (E_L), modulus melintang (E_T), Poisson rasio melintang (ν_{TT}), Poisson rasio transversal-longitudinal (ν_{TL}), dan modulus geser transversal-longitudinal (G_{TL}). Poisson rasio longitudinal- transversal (ν_{LT}) dan modulus geser transversal (G_{TT}) dari 5 konstanta ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \nu_{LT} &= \frac{\nu_{TL}E_L}{E_T} \\ G_{TT} &= \frac{E_T}{2(1+\nu_{TT})} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Matriks kekakuan dari properti isotropik transversal dapat ditentukan dengan mengasumsikan bahwa sumbu z adalah arah dari garis jalur *yarn* dan sumbu x, y adalah dua arah orthogonal yang tegak lurus terhadap sumbu z. Matriks kekakuan keseluruhannya kemudian dapat dinyatakan oleh persamaan berikut ini:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_T(1-\nu_{TL}\nu_{LT})}{\Delta} & \frac{E_T(\nu_{TT}+\nu_{TL}\nu_{LT})}{\Delta} & \frac{E_L(\nu_{TL}+\nu_{TT}\nu_{TL})}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_T(\nu_{TT}+\nu_{TL}\nu_{LT})}{\Delta} & \frac{E_T(1-\nu_{TL}\nu_{LT})}{\Delta} & \frac{E_L(\nu_{TL}+\nu_{TT}\nu_{TL})}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_T(\nu_{LT}+\nu_{TT}\nu_{LT})}{\Delta} & \frac{E_T(\nu_{LT}+\nu_{TT}\nu_{LT})}{\Delta} & \frac{E_L(1-\nu_{TT}^2)}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{TT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{TL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{TL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}$$

$$\Delta = (1 + \nu_{TT})(1 - \nu_{TT} - 2\nu_{TL}\nu_{LT}) \quad (2.22)$$

Yarn pada karung plastik merupakan monofilamen diaman setiap *yarn* yang dibentuk terdistribusi secara merata dengan mengekstrusi Polipropilen (*PP*) di seluruh *yarn*. Cukup masuk akal untuk mengasumsikan bahwa *yarn* dari karung plastik merupakan material homogen isotropik. Selanjutnya untuk menyederhanakan deskripsi sifat mekanik dari *yarn*, pemodelan *yarn* akan didefinisikan sebagai material isotropik homogen yang hanya memiliki dua variabel independen (E untuk modulus dan ν untuk poisson rasio). Ekspresi hubungan antara tegangan dan regangan kemudian disederhanakan dari persamaan (2.22) menjadi persamaan (2.23).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Proses homogenisasi biasanya diperlukan sebagai langkah akhir dalam tahap ini untuk memperoleh properti keseluruhan dari *yarn* jika *yarn* berupa multifilamen yang dirakit oleh banyak serat. Keseluruhan properti *yarn* pada penelitian ini cukup dijelaskan sendiri dengan modulus dan *Poisson Rasio* karena *yarn*-nya adalah monofilamen homogen dengan sifat isotropik.

2.2.6.2 Meso-Mechanical Modelling

Tahap pemodelan meso-mekanis adalah tahap menganalisis sifat mekanis dari unit sel. Menurut konsep model multi-skala, perilaku medium mikro yang heterogen dapat dideskripsikan sebagai suatu medium homogen yang ekuivalen

dengan menetapkan suatu kondisi batas yang sesuai dengan geometri makroskopik dan batasannya. *Fabric* secara khusus adalah material yang heterogen, namun strukturnya dapat juga dipertimbangkan sebagai bahan yang homogen dimana bahan tersebut terbuat dari pengulangan unit sel yang identik dan memiliki sifat yang sama persis. Perilaku struktur dari *fabric* dalam penelitian ini dapat dijelaskan dengan mendeskripsikan struktur unit sel yang berulang melalui kondisi batas yang tepat (*boundary condition*).

Perilaku deformasi sederhana dari *fabric* secara keseluruhan yang disebabkan oleh tegangan tarik searah dan geser dapat diketahui dengan menghitung sifat mekanis unit selnya. Sifat tarik longitudinal dan transversal unit sel diperoleh melalui *FEM* melalui geometri unit sel tersebut dengan modulus dan *Poisson rasio* sebagai sebagai input datanya. Kondisi batas yang tepat diterapkan pada unit sel untuk mensimulasikan kondisi fisik sebenarnya dan yang lebih penting untuk menyeragamkan sifat mekanik seluruh unit sel.

2.2.7 Prosedur Standar untuk Pemodelan *FE* Unit Sel.

Prosedur yang digunakan untuk pemodelan *FE* unit sel dapat dipecah menjadi tujuh langkah yaitu:

1. Geometrical Modeling and meshing.

Tahap pertama adalah geometri unit sel harus dijelaskan dengan jelas dan model CAD-nya harus disiapkan untuk didiskritisasikan menjadi elemen - elemen terhingga. Menentukan elemen perwakilan dari volume atau *Representative Volume Element (RVE)* hendaknya tidak terlalu rumit dimana

dapat meningkatkan biaya komputasi ataupun terlalu sederhana sehingga mengabaikan detail dari analisis atau kesimpulan lain yang sangat penting. Geometri dari setiap *yarn* dan asumsi parameter yang menentukan pengaturan dari *yarn* juga penting. Perhatian harus diberikan dalam mendefinisikan geometri tersebut seperti halnya posisi *yarn* dalam unit sel demi memastikan konsistensi geometri dalam pemodelan *CAD* (Hivet dan Boisse, 2005).

2. *Assign Material Properties.*

Asumsi sebuah bahan homogen yang solid pada *yarn* hanyalah penyederhanaan agar pemodelan layak secara komputasi. Ada beberapa pendekatan yang menggunakan model bahan konstitutif bagi *yarn* untuk memperhitungkan efek dari serat pada skala mikro (Gasser, *et al.*, 2000) dan ada juga peneliti yang menggunakan sifat material elastis klasik pada prosedur elemen hingga biasa (Peng dan Cao, 2000). Sifat material dapat ditentukan dengan menggunakan pengukuran secara eksperimental langsung pada *yarn* yaitu sebuah metode karakterisasi invers pada hasil eksperimen (Gasser, *et al.*, 2000) maupun menggunakan homogenisasi dari sifat material di tingkat mikro (Takano, *et al.*, 1999).

3. *Periodicity Boundary Condition.*

Unit sel dimodelkan sebagai suatu sistem yang diambil dari sebuah sistem yang lebih besar dan diasumsikan mewakili seluruh *fabric* tersebut dikarenakan respon mekanis tidak dapat dianggap hanya dengan menggunakan struktur yang terisolasi. Seperangkat persamaan dan syarat pada batas-batas unit sel

dibutuhkan untuk membuatnya berperilaku sebagai *RVE* dalam struktur periodik. Seperangkat kondisi batas ini harus diterapkan pada unit sel apa pun terlepas dari kondisi pembebanannya.

4. *Loading Boundary Conditions.*

Tergantung pada jenis pembebanannya yang diterapkan pada model di skala makro (aksial, geser, gabungan dan lainnya), kondisi batas seharusnya diterapkan pada unit sel untuk mensimulasikan pembebanan dari *fabric*. Homogenisasi kurva tegangan-regangan biasanya penting untuk menganalisis kontrol pembebanan yang dilakukan pada model untuk menemukan gaya reaksi pada batas-batas tersebut .

5. *Nonlinearity Sources.*

Sifat material yang nonlinier dan interaksi kontak antar *yarn* dapat diidentifikasi sebagai sumber dari perilaku nonlinier. Lebih dari itu dikarenakan adanya undulasi *yarn* di bawah pembebanan aksial dan *displacement* yang besar di bawah pembebanan geser, teori regangan yang terbatas harus digunakan pada analisis elemen hingga untuk mendapatkan hasil yang akurat.

6. *Finite Element Solver.*

Penggunaan *software* penyelesaian elemen hingga yang baik adalah salah satu langkah untuk mendapatkan hasil yang dapat diandalkan dan untuk mengurangi biaya komputasi. Opsi penulisan kode elemen hingga yang dapat disesuaikan merupakan poin tambahan. Berbagai *software* komersial yang tersedia diantaranya seperti ANSYS, ABAQUS, dan lain - lain. Pilihan yang

membedakan masing-masing *software* tersebut berdasarkan pada kemampuannya, metode dan penyelesaian numerik tertentu. *Software* Abaqus 6.14-2 dipilih untuk pemodelan elemen hingga unit sel pada penelitian ini.

7. *Post processing.*

Software elemen hingga dapat melaporkan banyaknya variabel yang berbeda sebagai output dari sebuah analisis. Variabel-variabel ini dapat dipilih dari daftar variabel bawaan atau dari variabel yang disesuaikan seperti tegangan dan regangan (*stress and strain*) yang dapat menjadi pilihan pertama dari output pasca pemrosesan untuk menilai respon dari unit sel.

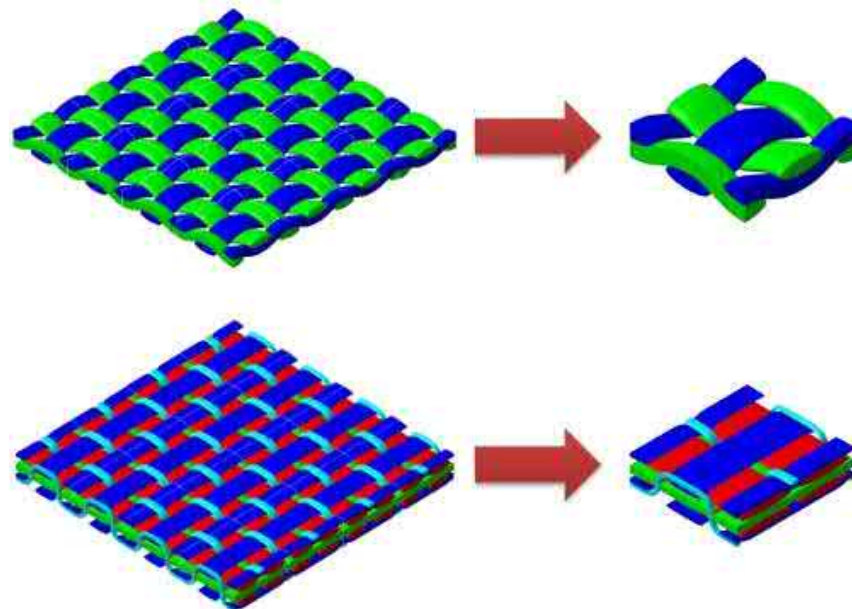
2.2.8 *Geometric Modelling*

Analisis numerik yang dapat diandalkan pada kinerja mekanik komposit membutuhkan deskripsi akurat dari geometri penguatnya. Pemodelan rinci spesimen *fabric* ukuran penuh adalah tidak realistis, arsitektur dari *fabric* dapat diwakili oleh sel satuan dengan definisi unit berulang terkecil dalam *fabric*. Semua tekstil cenderung menunjukkan beberapa derajat variabilitas stokastik karena *yarn* di kain tidak sempurna tetapi memiliki beberapa mobilitas. Pemodelan unit sel selalu mengimplikasikan pendekatan ideal geometri yang tepat.

Keakuratan sifat yang diprediksi dan dikarakterisasi menggunakan model analisis numerik sangat bergantung pada kualitas deskripsi geometrinya. Seringkali model bergantung pada informasi yang akurat dari parameter geometri *yarn* seperti bentuk *cross-sectional*, jalur dan posisinya dalam struktur tekstil, fungsi undulasi dan lain-lain. Pemodelan *yarn* mungkin tidak akan mereplikasi

model yang sebenarnya dalam kasus-kasus praktis, dikarenakan berbagai parameter manufaktur yang ditemui mulai dari proses pembuatan serat, pencetakan dan proses *curing*. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa asumsi dasar yang digunakan dalam pemodelan sudah cukup memadai untuk mengkarakterisasi sifat ke tingkat yang dapat diterima (Adumitroaie, *et al.*, 2011).

Pemilihan *RVE* adalah tugas yang sedikit rumit. *RVE* harus cukup besar untuk mewakili struktur mikro tanpa memperkenalkan properti yang tidak ada pada saat yang sama. *RVE* juga harus cukup kecil untuk memungkinkan pemodelan komputasi yang efisien dan dapat didefinisikan sebagai volume mikro terkecil yang mewakili keseluruhan sifat makroskopik dari bahan dengan cukup akurat. Gambar 2.15 menunjukkan contoh pemilihan *RVE* sesuai dengan definisi sebelumnya untuk komposit plain *woven* dan 3D orthogonal.



Gambar 2.15 Pemilihan *RVE* pada Plain *Woven* dan 3D Orthogonal (Sumber :

Baccareza, *et al.*, 2013; 4).

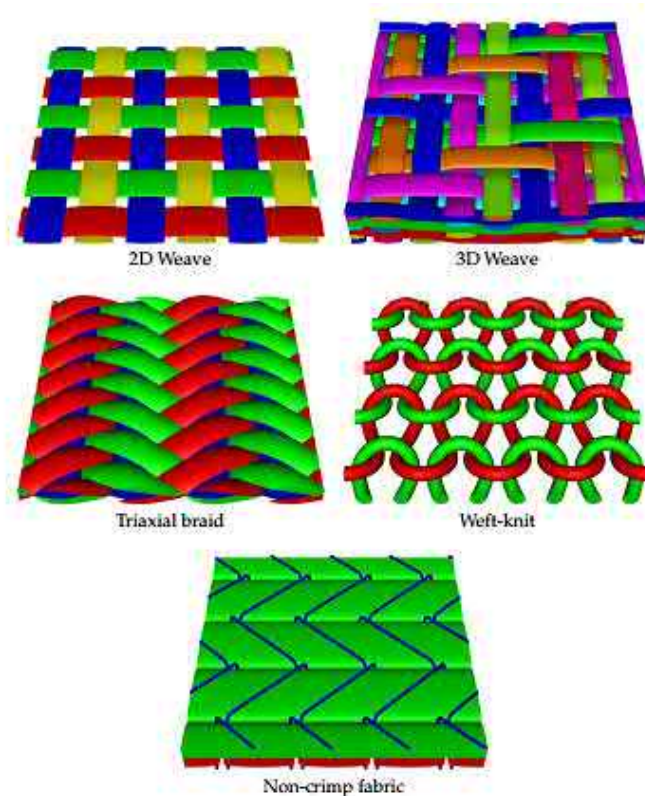
Kompleksnya geometri *woven fabric* sulit dimodelkan menggunakan perangkat lunak *pre-processing* standar yang digunakan untuk *FEM*. Untuk menciptakan arsitektur ini, direkomendasikan menggunakan *software CAD*. Beberapa *software CAD* bahkan menyediakan antarmuka yang asosiatif dengan *software FEM* komersial. Fitur ini tentunya sangat bagus dan berguna saat melakukan iterasi pada desain.

2.2.9 TexGen

TexGen adalah perangkat lunak *open source* berlisensi di bawah *General Public License* yang dikembangkan oleh Martin Sherburn (2010) dan kelompok peneliti komposit dari Universitas Nottingham untuk pemodelan geometri struktur tekstil. TexGen telah digunakan sebagai model dasar tekstil untuk analisis berbagai properti termasuk mekanika tekstil, permeabilitas dan perilaku mekanis komposit. TexGen digunakan untuk menghasilkan model unit sel geometri tekstil pada skala meso yang kemudian memungkinkannya untuk memprediksi sifat makroskopis mekanis komposit tekstil secara efektif menggunakan analisis elemen hingga.

TexGen telah diprogram untuk memberikan fleksibilitas maksimum pada model tekstil yang dapat diproduksi, sehingga memungkinkan pemodelan secara akurat dari berbagai jenis tekstil. Geometri dari setiap tekstil dihasilkan dengan metode yang umum yaitu dari spesifikasi jalur *yarn (yarn path)* dan *yarn cross section*. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan dilakukan dengan mudah untuk setiap struktur tekstil misalnya anyaman (*woven*), rajutan (*knitted*),

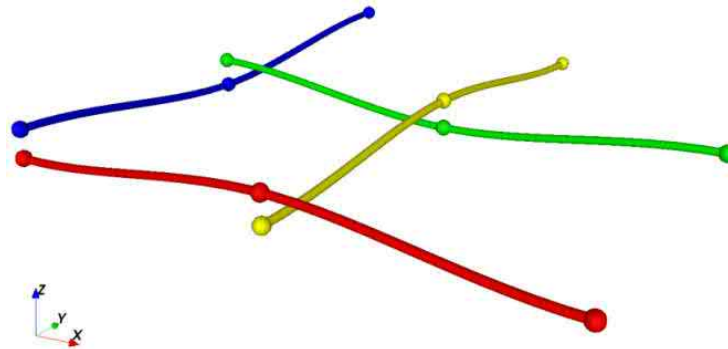
kepangan (*braided*), dan lain-lain seperti yang ditunjukkan Gambar 2.16 Deskripsi yang komprehensif mengenai hal ini merujuk pada *PhD Thesis* yang ditulis oleh Martin Sherburn berjudul *Geometric and Mechanical Modelling of Textile*. .



Gambar 2.16 Pemodelan Berbagai Struktur *Textile* oleh *Software* Texgen.

2.2.9.1 *Yarn Paths*

Yarn Paths atau jalur dari *yarn* dapat dianggap sebagai garis satu dimensi yang mempresentasikan titik tengah dari panjang *yarn*. Panjang dari *yarn* juga diasumsikan kontinu pada pemodelan geometri unit sel. Jalur dari *yarn* dimodelkan dalam TexGen dengan melakukan interpolasi sejumlah posisi yang tepat pada sebuah titik atau *node* untuk memastikan jalur *yarn* secara kontinu dalam unit sel sebagaimana yang digambarkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Titik-Titik Control (*Nodes*) pada Texgen yang Mendefinisikan Jalur dari *Yarn* pada *Plain Woven Fabric*.

2.2.9.2 *Yarn Cross Section*

Cross section atau penampang melintang *yarn* didefinisikan sebagai bentuk 2D dari *yarn* ketika dipotong pada bidang yang tegak lurus terhadap garis panjangnya.

2.2.9.3 *Interpolation Between Yarn Sections*

Bentuk *yarn* mudah sekali untuk berubah bahkan di bawah beban yang rendah pada titik-titik persilangan antar *yarn*. Kemampuan untuk memodelkan *yarn* dengan penampang yang tidak seimbang dan menciptakan transisi yang mulus antara penampang melintang pada titik-titik persilangan tersebut merupakan hal yang sangat penting. Fungsi interpolasi baik halus atau polar tersedia pada TexGen.

2.2.9.4 *Yarn Properties*

Sifat dapat ditetapkan pada setiap *yarn* seperti Modulus Young dan *Poisson ratio*. Kepadatan (*density*) juga dapat digunakan dalam perhitungan fraksi volume dan dalam properti komposit sesuai kebutuhan untuk model yang relevan.

2.2.9.5 Domain

Di TexGen hanya bagian terkecil berulang dari *yarn* yang dideskripsikan, tetapi dengan menggabungkan vektor yang berulang maka ukuran tekstil menjadi tidak terbatas. Model dalam aplikasinya perlu dibatasi menjadi daerah ruang terbatas yang disebut *domain*. *Domain* merupakan daerah yang mempresentasikan unit sel pada tekstil. *Domain* pada beberapa kasus dapat berupa satu unit sel dari tekstil namun jika diinginkan dapat dibuat representasi dari dua atau lebih unit sel untuk memverifikasi apakah *periodic boundary condition* sudah diterapkan dengan benar. *Domain* dispesifikasi oleh bidang dimana ruang negatif pada bidang tersebut dianggap berada diluar dari domain. Tiap bidang tersebut didefinisikan sebagai:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2.24)$$

Vektor (A, B, C) mewakili unit normal dari bidang, sedangkan D merupakan jarak dari bidang ke daerah asal. Untuk menentukan kotak pembatas sumbu sejajar dengan minimum $(x1, y1, z1)$ dan dan maksimum $(x2, y2, z2)$, enam bidang P perlu didefinisikan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Bidang yang Mendefinisikan Domain dari P.

	A	B	C	D
P ₀	1	0	0	x ₁
P ₁	-1	0	0	-x ₂
P ₂	0	1	0	y ₁
P ₃	0	-1	0	-y ₂
P ₄	0	0	1	z ₁
P ₅	0	0	-1	-z ₂

Dengan menggunakan definisi bidang ini, jelaslah bahwa sumbu sederhana kotak pembatas mudah direpresentasikan dan memberikan fleksibilitas untuk mendekati ukuran bentuk apapun.

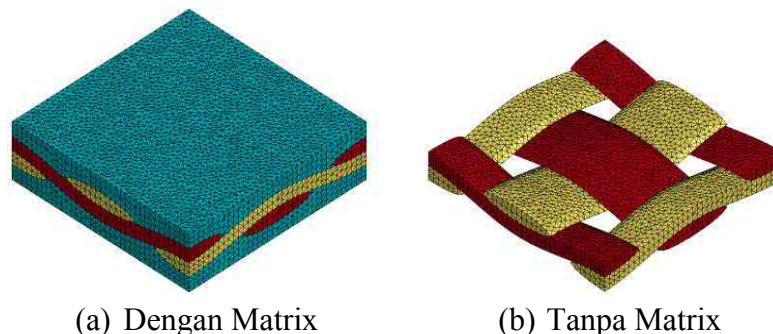
2.2.9.6 Surface Mesh

Cara termudah dan paling efisien untuk membuat objek tiga dimensi adalah dengan memprentasikan permukaannya dengan poligon dan kemudian merender poligon tersebut. Pekerjaan rendering poligon ke layar dua dimensi dapat dicapai dengan menggunakan perangkat keras yang sudah matang seperti *OpenGL* atau *Direct3D*. Satu-satunya perhatian pada rendering adalah untuk mendapatkan representasi poligon pada permukaan yang kemudian dirujuk sebagai *mesh* permukaan (*surface mesh*).

2.2.9.7 Volume Mesh

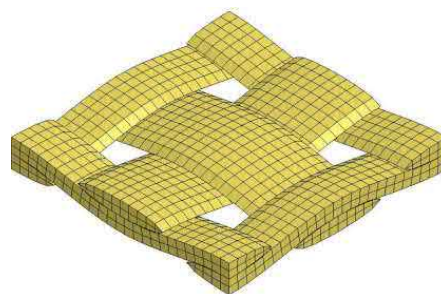
Surface mesh tidak cukup pada analisis elemen hingga untuk mendefinisikan batas-batas dari volume. *Volume mesh* yang dibangun dari elemen 3D kontinyu diperlukan. Sudah banyak algoritma untuk *volume meshing* baik geometri yang sepenuhnya berubah-ubah hingga geometri yang semi berubah. Volume dalam kasus *yarn* tekstil relatif mudah untuk dibuat *mesh*. *meshing* dapat dipisahkan menjadi dua langkah. Pertama adalah membuat *mesh* pada penampang melintang dalam dua dimensi untuk memastikan bahwa *mesh* pada *cross-section* telah kompatibel. Setelah itu hanya perlu untuk menghubungkan *mesh* dari *cross-section* yang berdekatan untuk membentuk elemen 3D.

Setelah parameter dari model ditentukan, proses selanjutnya yaitu mendeskritisasi model untuk dapat melanjutkan analisis FEM. *Dry fiber volume meshes* dapat dibuat di TexGen menggunakan elemen tetrahedral dan hexahedral. Ketika *yarn* dan matriks diperlukan untuk dibuat *mesh*-nya maka elemen tetrahedral dibuat. *Yarn* dan gabungan antara *yarn* dan matrix yang dideskritisasi menggunakan elemen tetrahedral ditampilkan oleh Gambar 2.18.

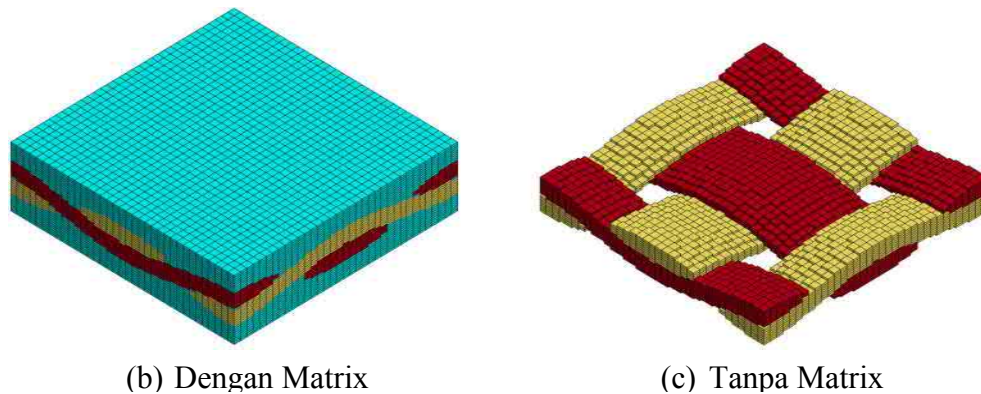


Gambar 2.18 *Tetrahedral Element Volume Meshes.*

Geometri model dapat didiskritisasi dengan pola elemen *8-node* hexahedral. Pola ini dikenal sebagai *voxel mesh (volume and pixel)* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Elemen ini kemudian juga dapat digunakan untuk mendeskritisasi *RVE* dari *yarn* dan matrixnya seperti yang ditunjukkan Gambar 2.20.



Gambar 2.19 *Yarn Hexahedral Elemen Mesh.*



Gambar 2.20 *Hexahedral Element Volume Meshes.*

Batas antara set elemen matriks dan set elemen *yarn* dalam sebuah *voxel mesh* merupakan bidang persegi panjang yang sejajar dengan salah satu wajah *RVE*. Hal ini kemudian dianggap sebagai pendekatan yang kurang akurat terhadap permukaan bagian dalam *RVE* dibanding pendekatan diskritisasi dengan *mesh tetrahedral* biasa yang dengannya *node* bisa terdapat di permukaan. Pendekatan ini masih lebih kuat dari alternatif sebelumnya yang dapat menyebabkan elemen tetrahedral terbentuk secara buruk di daerah antara *yarn* atau daerah dekat persilangan antar *yarn*.

Stiffness matrix dari elemen hingga yang dihasilkan juga akan memiliki ukuran yang lebih kecil dan nomor pengkondisian yang lebih baik daripada dengan *mesh* konvensional (*tetrahedral*). Sistem linear yang harus dipecahkan juga sangat cocok dengan solusi iteratif dan membuat komputasi dalam pekerjaan ini menjadi lebih efisien dimana elemen kecil pada ujung-ujung model sudah mewakili geometri dengan cukup baik sehingga perhitungan dapat diselesaikan secara cepat.

2.2.9.8 Rendering and Export of Model

Setelah model ditetapkan seperti yang dijelaskan di atas, maka kemudian model dapat disatukan untuk memvisualisasikan tekstil dan memungkinkannya untuk menjadi output dalam berbagai format yang diperlukan untuk diproses lebih lanjut. *Dry fibre volume mesh* atau *mesh volume* dari tekstil dapat dibuat di TexGen menggunakan elemen heksahedral dan irisannya seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.20. *Mesh* ini dapat diekspor ke paket eksternal untuk diproses lebih lanjut dalam memprediksi tingkah laku mekanis tekstil.

2.2.10 Material Properties

2.2.10.1 Karung Plastik

Karung plastik termasuk kategori bahan non-organik yang banyak dipakai sebagai bahan pengemas seperti karung beras, pupuk, dan makanan ternak. Kebanyakan karung plastik yang sudah tak dipakai hanya digunakan untuk kepentingan yang kurang bermanfaat atau bahkan hanya dibuang menjadi limbah yang mencemari tanah. Padahal bahan ini mempunyai kekuatan yang cukup tinggi sehingga dapat digunakan sebagai penguat bahan komposit. Hasil pengukuran kekuatan tarik serat karung plastik tunggal adalah 493,68 MPa (Diharjo, 2006),

Karung plastik memiliki struktur bentuk anyaman polos dua dimensi (*2D plain woven*). Serat karung plastik atau *yarn*-nya dibuat dari polimer *polypropylene (PP)* yang bersifat termoplastik. Bahan baku polipropilen didapat dengan menguraikan petroleum (*naftan*). Polypropilen ini dibentuk oleh n satuan monomer propilen. Molekul rantai *polypropylene* akan memberikan sifat

termoplastik seiring dengan kenaikan temperatur, serta dapat mencair dan mengalir. *PP* memiliki massa jenis yang rendah yaitu sekitar 0.9007 gr/cm^3 (ASTM D 792). *PP* termasuk golongan polimer yang paling ringan dan dapat terbakar kalau dinyalakan. Titik leleh *PP* adalah sekitar 1760C (Surdia, T., 2000).

Polypropylene adalah komoditas polimer yang murah, dapat didaur ulang, dan dapat diproduksi dalam volume besar. Kelebihan dari *polypropylene* dibandingkan komoditas plastik yang lain antara lain: kepadatannya lebih rendah, lebih tahan terhadap distorsi panas, kekuatan leleh yang sangat baik, peningkatan retakan tegangan lingkungan resistensi, tahan terhadap degradasi yang disebabkan oleh sebagian besar asam organik dan mineral dan garamnya, serta alkalinya yang kuat dan lemah. *Polypropylene* juga memiliki kemampuan mesin yang baik dan dapat digunakan untuk *injection molding* dan ekstrusi.

Yarn pada karung plastik merupakan monofilamen yang berarti bahwa setiap *yarn* dibentuk terdistribusi secara merata dengan mengekstrusi polipropilen (*PP*) di seluruh *yarn*. Cukup masuk akal untuk mengasumsikan bahwa *yarn* dari karung plastik merupakan material homogen isotropik. Selanjutnya untuk menyederhanakan deskripsi sifat mekanik dari *yarn*, maka pemodelan *yarn* akan didefinisikan sebagai material isotropik homogen hanya memiliki dua variabel independen (E untuk modulus dan ν untuk poisson rasio).

2.2.10.2 Resin *Unsaturated Polyester (UP)*

Unsaturated Polyester (UP) merupakan jenis resin *thermoset*. Resin *UP* memiliki sifat encer dan fluiditasnya baik sehingga dapat diaplikasikan mulai dari

proses *hand lay up* yang sederhana sampai dengan proses yang kompleks. Banyaknya penggunaan resin ini didasarkan pada pertimbangan harga yang relatif murah, pengerasan cairan (*curing*) yang cepat, dan mudah penanganannya (Billmeyer, 1984). Resin poliester banyak mengandung monomer stiren sehingga suhu deformasi termal lebih rendah dari pada resin thermoset lainnya dan memiliki ketahanan panas jangka panjang sekitar 110° – 140° C. Katalis yang sering digunakan sebagai media untuk mempercepat pengerasan cairan resin adalah hardener *metyl etyl keton peroksida (MEKPO)*. Kadar penggunaan standard hardener *MEKPO* adalah 1% pada suhu kamar. Tabel 2.2 menunjukkan spesifikasi dari *unsaturated polyester* resin seri Yukalac 157.

Tabel 2.2 Spesifikasi *Unssaturated Polyester Resin* Seri Yukalac 157 BQTN-EX (Sumber: Justus, 2001).

Item	Satuan	Nilai Tipikal	Catatan
Berat jenis	-	1,215	25°C
Kekerasan	-	40	Barcol/GYZJ 934-1
Suhu distorsi panas	°C	70	
Penyerapan air	%	0,188	24 jam
Suhu ruang	%	0,466	7 hari
Kekuatan Fleksural	Kg/mm ²	9,4	-
Modulus Fleksural	Kg/mm ²	300	-
Daya rentang	Kg/mm ²	5,5	-
Modulus rentang	Kg/mm ²	300	-
Elongasi	%	2,1	-

2.2.11 *Boundary Condition*

Pemodelan unit sel didasarkan pada asumsi bahwa deformasi terjadi secara seragam pada skala meso. Kondisi batas periodik atau *Periodic Boundary*

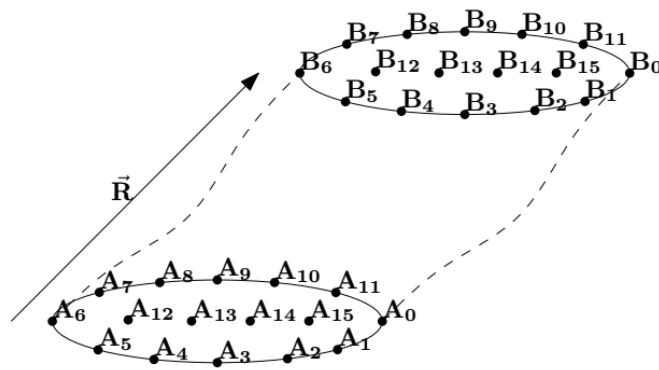
Condition (PBC) perlu diterapkan untuk mereplikasi pengulangan sifat *textile*. karena *plain woven* dapat diperlakukan sebagai susunan periodik dalam unit sel, maka *PBC* diterapkan pada unit sel untuk memastikan bahwa ada kesinambungan antara sel-sel yang lain sebagaimana yang dirancang oleh Shuguang Li dan Anchana Wongsto (2004).

Pola unit sel mewakili tubuh fisik yang berulang secara terus menerus, ada dua kondisi pengulangan yang harus terpenuhi pada batas unit sel yang lain. Pertama adalah *displacement* harus terjadi secara kontinyu. Unit sel yang satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan atau tumpang tindih setelah terjadinya deformasi. Kondisi kedua menyiratkan bahwa distribusi tegangan pada batas sejajar yang berlawanan dari unit sel juga harus sama sehingga satuan unit sel dapat dirakit menjadi suatu tubuh yang berulang.

Solusi yang diperoleh dengan menerapkan kondisi batas periodik *displacement-difference* terpadu dalam analisis elemen hingga berbasis-*displacement*, juga akan memenuhi kondisi kontinuitas traksi. Semua pasangan batas harus cocok satu sama lain, yang mana adalah kondisi yang diperlukan untuk menerapkan kondisi batas periodik. Ketika menghasilkan *mesh*, perhatian khusus diberikan pada lokasi *node* pada semua pasangan batas bahwa pasangan *node* dapat ditemukan dan dibatasi.

Simulasi model unit sel dengan perilaku tekstil keseluruhan yang berkali-kali ukuran dari satu unit sel satuan perlu untuk menerapkan kondisi batas periodik. Penerapan kondisi batas pada model unit sel akan membuat tekstil

mengalami deformasi yang seragam. Model unit sel sendiri masih bisa digunakan. jika luasan tekstil perlu dimodelkan dengan deformasi yang tidak seragam. Sedangkan untuk model unit sel pada skala makroskopis memerlukan sifat efektif dari model sel unit yang diambil dari pendekatan pemodelan multiskala (*multiscale*). Vektor berulang $\bar{\mathbf{R}}$ digunakan untuk menegaskan kondisi batas periodik. Gambar 2.21 mengilustrasikan penampang melintang dari *yarn* secara periodik dimana *yarn* berulang sepanjang vektor $\bar{\mathbf{R}}$.



Gambar 2.21 Kondisi Batasan Periodik pada *Yarn*.

Titik A_i dan B_i terletak di sisi yang saling berlawanan dari bagian dalam *yarn*. Posisi keduanya terikat dengan persamaan berikut:

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{A}_i + \bar{\mathbf{R}} \quad (2.25)$$

Persyaratan ini diterapkan pada kondisi batas periodik sebagai pertimbangan yang perlu diperhitungkan ketika nantinya *mesh* dibuat pada *yarn*. Agar *yarn* tetap periodik selama proses simulasi, persamaan (2.25) harus tetap valid dan diberlakukan pada setiap akhir iterasi. Misalkan posisi *node* A_i dan B_i

menjadi A'_i dan B'_i pada akhir iterasi. Vektor kesalahan \bar{E} antar node dapat dinyatakan sebagai:

$$\bar{E}_i = A'_i + \bar{R} - B'_i \quad (2.26)$$

\bar{E}_i merepresentasikan seberapa jauh *nodes* telah bergeser sehingga membatalkan kondisi periodisitas. \bar{E}_i jika sama dengan nol maka tidak ada tindakan lebih lanjut yang diperlukan namun jika tidak, maka posisi A'_i dan B'_i harus disesuaikan untuk mengembalikan periodisitas dengan cara memindahkan kedua *node* dengan

jarak yang sama, posisi yang disesuaikan tersebut A''_i dan B''_i dihitung sebagai:

$$\begin{aligned} A''_i &= A'_i - \frac{\bar{E}_i}{2} \\ B''_i &= B'_i + \frac{\bar{E}_i}{2} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Metode penerapan kondisi batas seperti ini sangat nyaman ketika deformasi tertentu diterapkan. Misalnya anggap vektor \bar{R} sejajar dengan sumbu \bar{X} , Untuk menerapkan regangan tarik longitudinal ϵ_x vektor \bar{R} dapat didefinisikan ulang sebagai \bar{R}' :

$$\bar{R}' = \epsilon_x \bar{R} \quad (2.28)$$

Regangan geser juga dapat dimodelkan menggunakan vektor yang berulang. Misalnya diberikan satu unit sel dengan dua pengulangan vektor \bar{R}_1 dan

$\bar{\mathbf{R}}_2$ yang sejajar dengan sumbu $\bar{\mathbf{X}}$ dan $\bar{\mathbf{Y}}$. Vektor $\bar{\mathbf{R}}'_1$ dan $\bar{\mathbf{R}}'_2$ dapat didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{R}}'_1 &= \bar{\mathbf{R}}_1 + \varepsilon_{xy} \|\bar{\mathbf{R}}_1\| \bar{\mathbf{Y}} \\ \bar{\mathbf{R}}'_2 &= \bar{\mathbf{R}}_2 + \varepsilon_{xy} \|\bar{\mathbf{R}}_2\| \bar{\mathbf{X}}\end{aligned}\quad (2.29)$$

Vektor yang berulang tersebut dapat tidak dibatasi dalam beberapa kasus misalnya untuk memodelkan tegangan tarik dari unit sel dengan dua vektor yang berulang $\bar{\mathbf{R}}_1$ dan $\bar{\mathbf{R}}_2$. Tegangan tarik yang terjadi dapat diterapkan hanya pada vektor $\bar{\mathbf{R}}_1$ dan vektor $\bar{\mathbf{R}}_2$ tidak dibatasi sehingga memungkinkan tekstil untuk menyusut sepanjang $\bar{\mathbf{R}}_2$ disaat $\bar{\mathbf{R}}_1$ bertumbuh. Hal ini dapat dicapai dengan menghitung vektor pengulangan baru $\bar{\mathbf{R}}'_1$ berdasarkan vektor kesalahan $\bar{\mathbf{E}}_{2i}$ melalui persamaan berikut dimana n adalah pasangan *nodes* yang dibatasi.

$$\bar{\mathbf{R}}'_2 = \bar{\mathbf{R}}_2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{\mathbf{E}}_{2i}\quad (2.30)$$

2.2.12 Analisis Mikromekanis dengan Pendekatan Unit Sel.

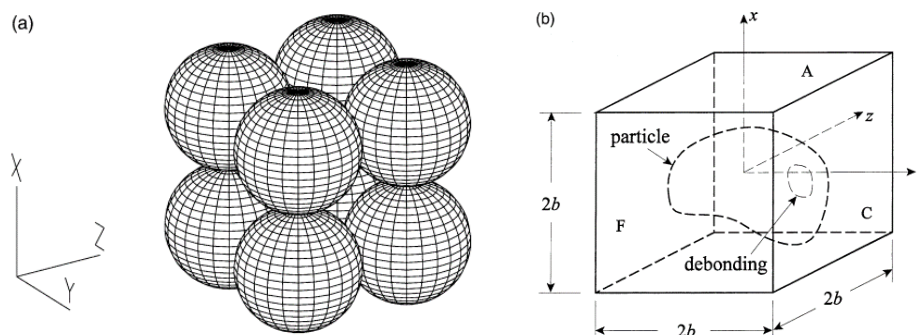
Analisis mikromekanis dari komposit dengan menggunakan unit sel telah menarik perhatian dari ilmuwan bahan untuk mencapai pemahaman yang lebih baik tentang perilaku bahan komposit. Kajian komprehensif mengenai mikromekanik dapat ditemukan di beberapa monograf Nemat-Nasser dan Hori (1999). Pendekatan klasik terdapat pada Eshelby (1957), Hashin dan Shtrikman (1963), Hill (1965) dan Budiansky (1965). Perkembangan yang pesat daya komputasi membuat metode elemen hingga telah menemukan lebih banyak

aplikasi dalam analisis terperinci untuk menemukan distribusi tegangan yang akurat dan regangan didalam material komposit.

Unit sel dalam pendekatannya diperkenalkan dengan asumsi serat penyusunnya teratur. Idealisasi susunan serat dalam matriks komposit ini cenderung memunculkan beragam bentuk unit sel karena sifat tiga dimensinya. Studi tentang kristal (Nye, 1985) ditemukan sangat membantu dalam mengklasifikasikannya. Sistem pengepakan unit sel dapat ditransplantasikan dari kristal dengan cara langsung seperti *simple cubic*, *body centred cubic*, *face centred cubic* and *close packed hexagonal packings*. Beberapa unit sel tersebut telah digunakan dalam pemodelan mikromekanis diantaranya oleh Agarwal dan Broutman (1974), dan Weissenbek *et al.* (1994).

2.2.12.1 Simple Cubic Packing System and Voronoi Cell.

Simple cubic packing system ditunjukkan pada Gambar. 2.22 (a). Semua bidang yang terlibat bisa diganti dengan partikel yang berbeda namun harus identik. Sel Voronoi adalah kubus yang ditunjukkan pada Gambar. 2.22 (b) di mana berbentuk lain partikel ditunjukkan didalamnya.



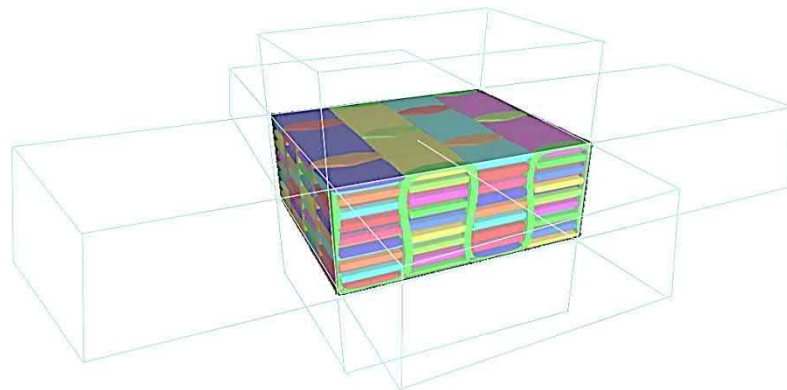
Gambar 2.22 Simple Cubic Packing System (A) dan Cubic Voronoi Cell (B).

(Sumber : Li dan Wongsto, 2004; 546)

Voronoi cell dibatasi oleh tiga pasang sisi atau disebut sebagai “*cell faces*” pada koordinat x , y dan z . pasangan sisi – sisi tersebut sejajar dan saling berlawanan dengan satu sama lain. Volume dari unit tersebut sel adalah $V = 8b^3$.

2.2.12.2 Displacements Fields Under Uniform Macroscopic Strains.

Menetapkan unit sel dengan menggunakan transformasi simetri translasional dan menghindari keterlibatan transformasi simetri reflektif atau rotasi adalah langkah pertama dalam proses ini. Dalam pengepakannya jika sel berulang seperti sel Voronoi atau sel yang didefinisikan secara berbeda, dapat memulihkan atau mempresentasikan semua sel lain dibawah translasi transformasi simetri maka sel tersebut dapat digunakan sebagai unit sel pada metode ini. Unit sel yang digunakan pada penelitian ini dimana dibuat menggunakan TexGen memenuhi syarat simetri ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Model *Unit Cell TexGen* dari Komposit *Textile*.

Dibawah transformasi simetri translasional, tegangan dan regangan ditransformasikan secara identik dari satu unit sel ke unit sel lainnya. *Displacement* ditransformasikan dengan cara yang sama seperti regangan karena

relative displacement memiliki sifat yang sama dengan regangan. Hal ini mengarah pada hubungan antara regangan makroskopik dan *relative displacement* pada titik P di unit sel ke titik P' yang merupakan gambaran dari titik P di unit sel yang lain. Hubungan tersebut dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} u' - u &= (x' - x)\varepsilon_x^0 + (y' - y)\gamma_{xy}^0 + (z' - z)\gamma_{xz}^0, \\ v' - v &= (y' - y)\varepsilon_y^0 + (z' - z)\gamma_{yz}^0, \\ w' - w &= (z' - z)\varepsilon_z^0, \end{aligned} \quad (2.31)$$

Notasi x , y dan z adalah koordinat titik P sedangkan u , v dan w adalah *displacement* pada titik tersebut. Notasi dengan aksen dikaitkan dengan titik P' . sedangkan ε_x^0 , ε_y^0 , ε_z^0 , γ_{yz}^0 , γ_{xz}^0 , dan γ_{xy}^0 adalah regangan makroskopik. *Rigid body motion* telah dibatasi dengan cara tiga bagian translasi dari *rigid body* dieliminasi melalui pembatasan *displacement*-nya dalam memperoleh persamaan. (2.31), yaitu:

$$u = v = w = 0 \quad (2.32)$$

Di titik sembarang atau pusat salah satu simpul dari unit sel, untuk mendapatkan *displacement* bidang pada persamaan (2.31), rotasi sumbu x dengan sumbu y dan z dan rotasi sumbu y dengan sumbu x dibatasi sebagai berikut:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad \text{at } x = y = z = 0. \quad (2.33)$$

Displacement pada persamaan (2.31) saat digunakan untuk memperoleh kondisi batas *displacement* untuk unit-unit sel, *rigid body rotation* yang diperoleh oleh unit sel akan dibatasi secara otomatis. Hubungan dalam persamaan. (2.31) akan benar dan tepat asalkan keteraturan pengepakan unit sel selalu dijaga. Selanjutnya penggunaan *relative displacement* akan digunakan untuk menurunkan kondisi batas *displacement* untuk unit-unit sel. Regangan makroskopis ϵ_x^0 , ϵ_y^0 , ϵ_z^0 , γ_{yz}^0 , γ_{xz}^0 , dan γ_{xy}^0 yang terlibat dalam persamaan (2.31) diperlakukan sebagai enam tambahan derajat kebebasan atau *degree of freedom (DoF)* yang darinya pembebanan pada unit sel dapat ditentukan baik dari segi tegangan makroskopis atau regangan seperti yang akan dijelaskan bagian selanjutnya.

2.2.12.3 *Translational Symmetries and The Unit Cell.*

Setelah pengepakan unit sel berbentuk kubik sederhana telah diteselakan menjadi sel Voronoi, setiap sel Voronoi di dalam packing dapat diperoleh dari sel Voronoi yang lain dengan translasi tertentu pada arah x , y dan z . Setiap sel Voronoi dapat dipilih sebagai unit sel. Titik P' (x',y',z') pada material luar unit sel dapat ditemukan sebagai gambaran dari titik P (x,y,z) tertentu dalam unit sel dibawah transformasi simetri translasional yang terdiri dari tiga arah x , y dan z . Koordinat dari dua titik tersebut saling berhubung satu sama lain dalam persamaan:

$$(x',y',z') = (x + 2ib, y + 2jb, z + 2kb), \quad (2.34)$$

Notasi i , j dan k adalah nomor dari sel Voronoi dimana merupakan jauhnya titik P' dari titik P pada arah x , y dan z . Satu set dari tiga angka integer i , j dan k

dengan cara ini dapat mendefinisikan transformasi simetri translational secara unik.

2.2.12.4 *Displacement Boundary Condition For The Cubic Unit Cell.*

Dua sisi berbeda dari tiga pasang sisi pada unit sel yang sudah didefinisikan sebelumnya dapat diubah dari satu ke yang lainnya melalui transformasi berikut:

$$\begin{aligned}
 x &= \pm b \quad (+ \text{ for face A and } - \text{ for B}) : \\
 &\quad (i = 1, j = 0, k = 0), \\
 y &= \pm b \quad (+ \text{ for face C and } - \text{ for D}) : \\
 &\quad (i = 0, j = 1, k = 0), \\
 z &= \pm b \quad (+ \text{ for face E and } - \text{ for F}) : \\
 &\quad (i = 0, j = 0, k = 1).
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Sisi - sisi dengan tanda positif untuk tiga pasang sisinya pada persamaan (2.35) diatas dianggap sebagai gambaran yang sesuai dengan tanda minus pada transformasi dan konversinya akan digunakan untuk seterusnya. Tiga sisi yang terlihat, *A*, *C* dan *F* ditunjukkan pada Gambar. 2.22 (b), sisi lainnya yang berlawanan tidak diperlihatkan tapi dapat dengan mudah diidentifikasi pada gambar untuk menjaga sketsa tetap rapi .

Transformasi simetri translasional di atas akan mengarah pada suatu kondisi batas pada sisi unit sel. Dengan seperangkat nilai *i*, *j* dan *k* yang diberikan pada persamaan (2.35) dari sepasang sisinya, persamaan (2.34) dapat disubstitusikan ke persamaan (2.31) sehingga tiga persamaan *displacement* relatif antar titik-titik yang bersangkutan pada sepasang sisi bisa didapatkan. Persamaan

tersebut adalah *displacement boundary condition* untuk pasangan dari sisi sel satuan. Kondisi batas seperti ini harus disediakan untuk masing-masing dari tiga pasang sisi unit sel sebelum analisis mikromekanis pada unit sel dapat dilakukan dimana persamaannya diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}(u|_{x=b} - u|_{x=-b})|_{y,z} &= 2b\varepsilon_x^0 \\ (v|_{x=b} - v|_{x=-b})|_{y,z} &= 0 \\ (w|_{x=b} - w|_{x=-b})|_{y,z} &= 0\end{aligned}$$

$$\text{Disingkat } U_A - U_B = F_{AB} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned}(u|_{y=b} - u|_{y=-b})|_{x,z} &= 2b\gamma_{xy}^0 \\ (v|_{y=b} - v|_{y=-b})|_{x,z} &= 2b\varepsilon_y^0 \\ (w|_{y=b} - w|_{y=-b})|_{x,z} &= 0\end{aligned}$$

$$\text{Disingkat } U_C - U_D = F_{CD} \quad (2.37)$$

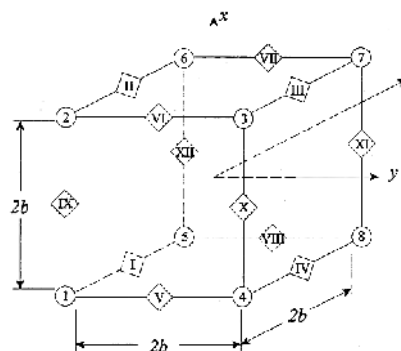
$$\begin{aligned}(u|_{z=b} - u|_{z=-b})|_{x,y} &= 2b\gamma_{xz}^0 \\ (v|_{z=b} - v|_{z=-b})|_{x,y} &= 2b\gamma_{yz}^0 \\ (w|_{z=b} - w|_{z=-b})|_{x,y} &= 2b\varepsilon_z^0\end{aligned}$$

$$\text{Disingkat } U_E - U_F = F_{EF} \quad (2.38)$$

Notasi $|_{x=b}$ dan $|_{x=-b}$ pada persamaan di atas menunjukkan sisi, sementara $|_{y,z}$ dan seterusnya menunjukkan koordinat umum bersama dari titik-titik yang bersangkutan pada sepasang sisi. Bentuk notasi ini kemudian juga digunakan untuk seterusnya. *Displacement boundary condition* untuk unit sel telah didefinisikan pada enam sisi unit sel yang semuanya dalam bentuk

persamaan (2.36, 2.37, 2.38). Semua persamaan ini independen untuk titik yang sesuai pada pasangan sisi seperti yang ditunjukkan kecuali titik disepanjang tepi masing-masing sisi. Kondisi yang berlebihan akan muncul jika Persamaan (2.36, 2.37, 2.38) diterapkan pada sisi termasuk rusuk-rusuk tersebut karena rusuknya dibagi oleh dua sisi. Pencantuman *dependent boundary constraints* dalam bentuk persamaan dapat menyebabkan masalah mikromekanis yang berlanjut pada analisis elemen hingga dari unit sel sebagian besar kode *software* komersial seperti ABAQUS (HKS, 2001).

Untuk dapat mengekstrak kondisi independen antara rusuk-rusuk ini, perlu memilih satu set rusuk yang masing-masing rusuk tersebut independen. Satu set rusuk tersebut harus tidak dapat diperoleh melalui transformasi simetri translasional dan rusuk manapun di luar set ini masih saling terkait dengan salah satu rusuk dalam set yang diatur oleh transformasi simetri translasional. Gambar 2.24 menunjukkan bahwa dua belas rusuk unit sel terdapat ditiga arah yang sejajar dengan koordinat sumbu dan satu rusuk dari setiap orientasi tersebut membentuk suatu set independen, yaitu rusuk dengan notasi bernomor romawi I, V dan IX.



Gambar 2.24 Rusuk – Rusuk dan *Vertices* pada Unit Sel Berbentuk Kubus.

(Sumber : Li dan Wongsto, 2004; 551)

Satu set *displacement boundary conditions* yang independen untuk rusuk-rusuk tersebut kemudian dapat diperoleh. Ketika rusuk yang sejajar dengan sumbu z yaitu rusuk I dianggap sebagai gambar rusuk II, III dan IV dalam transformasi simetri ($i = 1, j = 0, k = 0$), ($i = 1, j = 1, k = 0$) dan ($i = 0, j = 1, k = 0$), tiga set relasi dapat diperoleh dengan menggunakan menggunakan singkatan yang diberikan pada persamaan (2.36, 2.37, 2.38) yaitu:

$$\begin{aligned} U_{II} - U_I &= F_{AB}, \\ U_{IV} - U_I &= F_{CD}, \\ U_{III} - U_I &= F_{AB} + F_{CD}, \end{aligned} \tag{2.39}$$

F_{AB} dan lain-lain adalah sebagaimana yang didefinisikan dalam persamaan (2.36, 2.37, 2.38). Notasi romawi menunjukkan *displacement* rusuk yang terasosiasi. Dua *displacement* diatas berada pada titik yang saling berkaitan sebagai acuan dan gambaran dibawah transformasi simetri translasional diantara dua rusuk. Independensi timbal balik dan kesempurnaan dari persamaan di atas dapat dibuktikan karena setiap persamaan memperkenalkan sesuatu yang baru atau tidak diketahui sebelumnya ke dalam sistem persamaan sehingga independensi menjadi jelas. Hubungan lain di antara rusuk I, II, III dan IV dapat direproduksi dari persamaan (2.39) dengan mengeliminasi U_I yang kemudian akan melengkapi *boundary condition* untuk kelompok dari rusuk-rusuk unit sel. Hubungan antara *displacement* pada rusuk untuk dua kelompok rusuk parallel lainnya ke sumbu y dan z dapat diperoleh dengan cara yang sama seperti berikut:

$$\begin{aligned}
U_{VI} - U_V &= F_{AB}, \\
U_{VIII} - U_V &= F_{EF}, \\
U_{VII} - U_V &= F_{AB} + F_{EF},
\end{aligned}
\tag{2.40}$$

$$\begin{aligned}
U_X - U_{IX} &= F_{CD}, \\
U_{XII} - U_{IX} &= F_{EF}, \\
U_{XI} - U_{IX} &= F_{CD} + F_{EF},
\end{aligned}
\tag{2.41}$$

Hubungan di atas harus diterapkan pada rusuk tetapi dengan pengecualian akhiran dari rusuk-rusuknya (*vertices*). Akhiran dari rusuk-rusuk tersebut bertemu pada *vertex* atau titik sudut unit sel dan hubungan dependen muncul ketika sebuah *vertex* dibagi oleh tiga rusuk. Seperangkat persamaan independen untuk *vertex* dapat diperoleh dari observasi. Setiap *vertex* dapat dianggap sebagai gambaran dari titik lainnya dibawah transformasi translasi yang tepat. *Vertex - vertex* dari unit sel tersebut diberi nomor dalam angka Arab barat tertutup dalam lingkaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.24.

Tanpa kehilangan keumumannya, anggap 1 sebagai master *vertex* misalnya. *Vertex 2* ditransformasi dari *vertex 1* dengan $(i = 1, j = k = 0)$, *vertex 3* dengan $(i = j = 1, k = 0)$ dan *vertex 7* dengan $(i = j = k = 1)$ dan lain sebagainya. Satu set hubungan independen dan lengkap dapat diperoleh untuk *vertices* tersebut dengan :

$$\begin{aligned}
U_2 - U_1 &= F_{AB}, & U_3 - U_1 &= F_{AB} + F_{CD}, \\
U_4 - U_1 &= F_{CD}, & U_5 - U_1 &= F_{EF}, \\
U_6 - U_1 &= F_{AB} + F_{EF},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_7 - U_1 &= F_{AB} + F_{CD} + F_{EF}, \\
 U_8 - U_1 &= F_{CD} + F_{EF},
 \end{aligned}
 \tag{2.42}$$

Batas *displacement* kondisi pada sisi dari unit sel dari persamaan - persamaan yang ada tidak termasuk rusuknya diberikan oleh persamaan (2.36, 2.37, 2.38). Rusuk - rusuk tersebut tidak termasuk *vertex* yang diberikan oleh persamaan (2.39, 2.40, 2.41) dimana untuk kondisi *vertices* sendiri diberikan oleh persamaan (2.42). Dengan menerapkan *boundary conditions* dalam hubungannya dengan *constraints* pada *rigid body translation* seperti yang diberikan oleh persamaan. (2.32) dan *rigid body rotation* oleh persamaan. (2.33), *displacement field* pada persamaan (31) secara langsung diberlakukan sehingga unit sel dapat dianalisis menggunakan elemen hingga tiga dimensi. Adapun pembebanan terhadap unit sel dapat diterapkan melalui tambahan *degree of freedom (DoF)* seperti yang akan dibahas dalam bagian selanjutnya.

2.2.12.5 Application of Loads in Terms of Macroscopic Stresses and Effective Elastic Material Properties.

Regangan makroskopik yang sudah dijelaskan sebelumnya dalam *boundary condition* dapat diperlakukan sebagai *DoF* yang independen terhadap sistem (Li, 1999, 2001). *DoF* yang independen ini kemudian dapat ditetapkan untuk memberlakukan regangan makroskopis sebagai beban dan sebagai alternatifnya gaya yang terkonsentrasi (digeneralisasi dengan dimensi kekuatan \times panjang) juga dapat diterapkan pada *DoF* ini secara efektif. Tegangan makroskopis diterapkan pada unit sel (Li, 1999, 2001). Tegangan makroskopik

saling berkaitan dengan gaya yang terkonsentrasi sebelumnya berdasarkan pertimbangan kesetaraan energi sederhana. Misalnya, jika gaya F_x diterapkan pada $DoF \ \varepsilon_x^0$ unit sel sementara semua DoF ekstra lainnya bebas dari *constraints*, kerja yang dilakukan oleh gaya tersebut adalah:

$$W = \frac{1}{2} F_x \varepsilon_x^0. \quad (2.43)$$

Energi regangan yang disimpan dalam unit sel dapat dinyatakan dalam hal tekanan makroskopis dan regangan sebagai:

$$E = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x^0 \varepsilon_x^0 dV = \frac{1}{2} V \sigma_x^0 \varepsilon_x^0, \quad (2.44)$$

V adalah volume unit sel dan dengan menyamakan W ke E menghasilkan hubungan antara gaya terkonsentrasi F_x yang diterapkan dengan tegangan makroskopis σ_x^0 . Hubungan sederhana berikut ini bisa diperoleh dengan menerapkan prosedur untuk setiap DoF :

$$\begin{aligned} \sigma_x^0 &= F_x/V, & \sigma_y^0 &= F_y/V, & \sigma_z^0 &= F_z/V, \\ \tau_{yz}^0 &= F_{yz}/V, & \tau_{zx}^0 &= F_{zx}/V, & \tau_{xy}^0 &= F_{xy}/V. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Beban ke unit sel juga bisa diaplikasikan dalam bentuk pembebanan termal, misalnya perubahan suhu ΔT dan dengan mengaplikasikan jenis pembebanan ini, tekanan termal dapat dianalisis menggunakan *boundary condition* seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Analisis seperti ini mungkin merupakan hal khusus dalam memahami residu tekanan termal mikroskopis dalam

sebuah bahan dimana memiliki hubungan yang erat dengan perkembangan awal dari banyaknya mode kerusakan pada material komposit. Properti termoelastik suatu bahan seperti koefisien ekspansi dapat dievaluasi dari analisis ini.

Tekanan makroskopis diekspresikan dalam bentuk gaya yang diterapkan pada unit sel untuk memudahkan mendapatkan semua properti efektif dari bahan yang diwakili oleh unit sel pada *DoF* yang independen $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \varepsilon_z^0, \gamma_{yz}^0, \gamma_{xz}^0, \gamma_{xy}^0$, dan beban yang diterapkan $F_x, F_y, F_z, F_{yz}, F_{zx}, F_{xy}$. Beberapa sifat bahan yang paling umum digunakan adalah sebagai berikut:

$$E_x^0 = \sigma_x^0 / \varepsilon_x^0 = F_x / V \varepsilon_x^0$$

$$\text{dimana } F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$v_{xy}^0 = -\varepsilon_y^0 / \varepsilon_x^0$$

$$\text{dimana } F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$v_{xz}^0 = -\varepsilon_z^0 / \varepsilon_x^0$$

$$\text{dimana } F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$E_y^0 = \sigma_y^0 / \varepsilon_y^0 = F_y / V \varepsilon_y^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$v_{yx}^0 = -\varepsilon_x^0 / \varepsilon_y^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$v_{yz}^0 = -\varepsilon_z^0 / \varepsilon_y^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$E_z^0 = \sigma_z^0 / \varepsilon_z^0 = F_z / V \varepsilon_z^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$v_{zx}^0 = -\varepsilon_x^0 / \varepsilon_z^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$v_{zy}^0 = -\varepsilon_y^0 / \varepsilon_z^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = \Delta T = 0,$$

$$G_{xy}^0 = \tau_{xy}^0 / \gamma_{xy}^0 = F_{xy} / V \gamma_{xy}^0$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = \Delta T = 0,$$

$$\alpha_x^0 = \varepsilon_x^0 / \Delta T$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = 0,$$

$$\alpha_y^0 = \varepsilon_y^0 / \Delta T$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = 0,$$

$$\alpha_z^0 = \varepsilon_z^0 / \Delta T$$

$$\text{dimana } F_x = F_y = F_z = F_{yz} = F_{zx} = F_{xy} = 0.$$

(2. 46)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan disimpulkan bahwa:

1. Hasil simulasi *material properties* menggunakan FEM terhadap komposit berpenguat *woven bag polypropylene* menunjukkan nilai modulus elastisitas E_{11} dan E_{22} sebesar 1,615 GPa, E_{33} sebesar 1,500 GPa, modulus geser G_{12} sebesar 0,7863 GPa, G_{23} dan G_{31} sebesar 0,7648, Poisson ratio ν_{12} , ν_{21} , ν_{31} , ν_{32} sebesar 0,36 dan ν_{13} , ν_{23} sebesar 0,39.
2. Hasil simulasi modulus elastisitas komposit menggunakan FEM menunjukkan hasil yang akurat terhadap hasil eksperimen pengujian tarik dengan presentase sebesar 84,1%.
3. Hasil penelitian skala meso dari parameter *yarn width*, *yarn spacing* dan *fabric thickness* terhadap *material properties* dari komposit berpenguat *woven bag polypropylene* menunjukkan bahwa dengan bertambahnya ukuran *yarn width* dan *fabric thickness* akan menyebabkan modulus dari komposit menurun, sedangkan dengan bertambahnya ukuran *yarn spacing* mengakibatkan nilai modulus naik.

5.2 Saran

Berdasarkan eksperimen dan simulasi yang telah dilakukan, beberapa hal penting yang menjadi catatan untuk penelitian ini dan seterusnya adalah:

1. Dalam pembuatan spesimen uji tarik komposit, hendaknya lebih presisi lagi dalam mengukur dan dalam menyusun susunan komposit secara merata sehingga dapat menghasilkan spesimen dengan propertis yang konsisten. Susunan komposit yang rata dan teknik pembuatan komposit yang lebih baik, dapat meminimalisir *void* atau udara terjebak pada komposit sehingga menghasilkan hasil *material properties* yang lebih akurat.
2. Dalam pemodelan dari komposit, perlu perhatian lebih terhadap *domain* dari model. *Domain* pada model merupakan representasi dari dimensi komposit. Untuk itu diperlukan pengukuran yang lebih presisi terhadap serat dan matrix pada komposit untuk dapat memodelkan komposit secara akurat.
3. Dalam mensimulasikan model komposit yang telah dibuat dari *software* TexGen ke *software* ABAQUS, harus melalui *command prompt* dari *folder* dimana *file - file* model tersebut berada. Hal ini karena output dari *software* TexGen berjumlah tiga file yang tidak dapat di-*import* secara keseluruhan kecuali melalui *submit job* dari *command prompt*. Untuk itu peneliti sarankan untuk mengikuti prosedur standar sebagaimana metode pada penelitian ini atau merujuk secara langsung prosedur standar yang telah dibuat oleh developer TexGen.

DAFTAR PUSTAKA

- Adanur, S., and T. Liao. 1998. 3D Modeling of Textile Composite Preforms. *Composites. Part B: Engineering* 29B: 787-793.
- Adumitroaie, A., and E.J. Barbero. 2011. Beyond plain weave fabrics—I. Geometrical model. *Composite Structures* 93(5): 1424-1432.
- Agarwal, B.D., L.J Broutman. 1974. Three-dimensional finite element analysis of spherical particle composites. *Fibre Sci. Technol* 7: 63–77.
- Anonim, 1998. *Annual Book ASTM Standart*. USA.
- Arikunto, S. 2003. *Prosedur Penelitian, Suatu Praktek*. Jakarta: Bina Aksara.
- Baccareza, O., D. Abe, M.H. Aliabadi, N. K. Ragavan. 2013. Micromechanical modelling of advanced composites. *Journal of Multiscale Modelling*: 4 - 5.
- Banerjee, P.K., 2014. *Principles of Fabric Formation*. 1st ed. Boca Raton : Taylor & Francis.
- Billmeyer, F. 1984. *Text Book Of Polymer Science*. John Wiley & Sons. New York.
- Bogdanovich, A.E. 2006. Multi-Scale Modeling, Stress and Failure Analyses of 3-D woven Composites. *Journal of Materials Science* 41(20): 6547-6590.
- Budiansky, B. 1965. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *J. Mech. Phys. Solids* 13: 223–227.
- Champbell, F.C. 2010. *Structural Composite Materials*. ASM international.
- Diharjo, K. 2006. Kajian Pengaruh Teknik Pembuatan Lubang Terhadap Kekuatan Tarik Komposit. *TEKNOIN* 11(1): 55-64.
- Dixit, A., H. S. Mali. 2013. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a review. *Mechanics of Composite Materials* 49(1).
- Drach, B., I. Tsykrov, A. Trofimov, T. Gross, A. Drach. 2018. Comparison of stress-based failure criteria for prediction of curing induced damage in 3D woven composites. *Composites Structures* 185: 368.

- Eshelby, C.C. 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proc. R. Soc. Lond.* 241A: 376–396.
- Gasser, A., P Boisse., and S. Hanklar. 2000. Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements 3D simulations versus biaxial tests. *Computational Materials Science* 17: 7–20.
- Gibson, R. F. 1994. *Principles of Composites Material Mechanics*. Mc Graw Hill. New York.
- Guagliano, M., and E Riva. 2001. Mechanical behaviour prediction in plain weave composites. *Journal of strain analysis for engineering design* 36: 153-162.
- Hashin, Z., S Shtrikman. 1963. A variational approach to the theory of elastic behaviour of multiphase materials. *J. Mech. Phys. Solids* 11:127–140.
- Hill, R. 1965. A self-consistent mechanics of composite materials. *J. Mech. Phys. Solids* 13: 213–222.
- Hivet, G., and P Boisse. 2005. Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis. *Finite Elements in Analysis and Design* 42: 25-49.
- HKS. 2001. *ABAQUS/Standard Users Manual*. Version 6.2.
- Hofstee, J., H. De Boer, and F. van Keulen. 2000. Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite. *Pt. I: Geometry, Compos. Sci. Technology* 60: 1041–1053.
- Hu, J.L., and J.G. Teng. 1996. Computational fabric mechanics: Present status and future trends. *Finite Elements in Analysis and Design* 21: 225–237.
- Ivanov, I., and A. Tabiei. 2002. Flexible woven Fabric Micromechanical Material Model with Fiber Reorientation. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*: 37 - 51.
- Justus Kimia Raya. 2001. *Technical Data Sheet*. Jakarta.
- Komeili, M. 2010. Mechanical behavior of woven fabric composites under meso-level uncertainties: modeling and sensitivity analysis. *Master Thesis*. The College of Graduate Study (Mechanical Engineering) University of British Columbia. Okanagan.

- Kumar, B. J. Hu. 2018. woven fabric structures and properties. *Engineering of high performance textile*: 135.
- Lebrun, G., M. Bureau, and J. Denault. 2003. Evaluation of bias-extension and pictureframe test methods for the measurement of intraply shear properties of PP/glass commingled fabrics. *Composite Structures* 61: 341-352.
- Li, S. 1999. On the unit cell for micromechanical analysis of fibre-reinforced composites. *Proc. R. Soc. Lond* 455A: 815–838.
- Li, S. 2001. General unit cells for micromechanical analyses of unidirectional composites. *Composites A* 32: 815–826.
- Li, S., A. Wongsto. 2004. Unit cells for micromechanical analyses of particle-reinforced composites. *Mechanics of Materials* 36: 543–572.
- Li, S., C. Zhou, H. Yu, L. Li. 2011. Formulation of a unit cell of a reduced size for plainweave textile composites. *Computational Materials Science* 50:1770-1780.
- Li, W. and A. E. Shiekh. 1988. *The effect of processes and processing parameters on 3 D braided preforms for composites*. 33th Int. SAMPE Symp., 104-115.
- Lim, T., and S. Ramakrishna. 2002. Modelling of composite sheet forming: a review. *Composites Part A* 33: 515–537.
- Lomov, S.V., D. S. Ivanov, I. Verpoest, M. Zako, T. Kurashiki, H. Nakai, and S. Hirose. 2007. Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. *Composites Science and Technology* 67: 1870-1891.
- Nasser, N. S., M. Hori. 1999. *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. 1st ed. Netherland: Elsevier.
- Nye, J.F. 1985. *Physical Properties of Crystals*. 1st ed. New York: Clarendon Press Oxford.
- Ojahan R. Tumpal., C. Tri. 2015. Analisis Serat Pelepah Batang Pisang Kepok Material Fiber Komposit Matriks Recycled Polypropylene (RPP) Terhadap Sifat Mekanik Dan SEM. *Jurnal Mechanical*, 6 (2) : 64-70 (b)
- Page, J., and J. Wang. 2002. Prediction of shear force using 3D non-linear FEM analyses for a plain weave carbon fabric in a bias extension state. *Finite Elements in Analysis and Design* 38: 755-764.

- Pehlivan, E., S. Ünal, B. Tunçsiper. 2004. The location of packaging material in our lives and the modern methods of recycling and reductions of these. *Polymer Processing and Recycling Symposium*, Mersin, Turkey. p.114–28.
- Peng, X, and J. Cao J. 2000. Numerical determination of mechanical elastic constants of textile composites. *PROCEEDINGS-AMERICAN SOCIETY FOR COMPOSITES*: 677–688.
- Pierce, F.T. 1937. The geometry of cloth structure. *Text. Inst* 28: 45–97.
- Postle, J.R., and R. Postle. 1996. Modelling Fabric Deformation as a Nonlinear Dynamical System Using Bäcklund Transformations. *International Journal of Clothing Science and Technology* 8(3): 22-42.
- Potluri, P., D Perezciurezu, and R. Ramagulam. 2006. Measurement of meso-scale shear deformations for modelling textile composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37: 303-314.
- Robitaille, F., B.R Clayton, A.C. Long, B.J Souter, and C. D. Rudd. 1999. Geometric modeling of industrial preforms: woven and braided textiles. *Proc. Inst. Mech. Engrs, Pt L: J. Materials: Design and Applications* 213: 69–84.
- Ruijter, W. 2009. Analysis of mechanical properties of woven textile composites as a function of textile geometry. *PhD Thesis*. University of Nottingham. UK
- Shen, Y. 2013. Modelling of Tensile Properties of Woven Fabrics and Auxetic Braided Structures by Multi-Scale Finite Element Method. *Master Thesis*. Master of Science Faculty of Auburn University. Alabama.
- Shen, Y., A. J. Meir, Y. Chao, S. Adanur. 2014. Finite element analysis of monofilament woven fabrics under uniaxial tension. *The Journal of The Textile Institute* 106(1): 90–100.
- Sherburn, M. 2007. *Geometric and Mechanical Modelling of Textiles*. *Phd Thesis*. University of Nottingham. UK.
- Sumaryono, 2012. Perilaku Pengujian Tarik Pada Polimer Polistiren dan Polipropilen. *Jurnal garden*, 1 (1) : 66-80
- Surdia, T. 2000. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Edisi Pertama. Jakarta: Pradnya Paramita.

- Tabiei, A, and I. Ivanov. 2003. Fiber Reorientation in Laminated and woven Composites for Finite Element Simulations. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 16: 457-474.
- Tabiei, A., and Y. Jiang. 1999. Woven-fabric composite material model with material nonlinearity for nonlinear finite element simulation. *Int. J. of Solids and Structures* 25: 1646-1660.
- Takano, N., Y. Uetsuji, Y. Kashiwagi, and M. Zako, 1999. Hierarchical modelling of textile composite materials and structures by the homogenization method. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 7: 207-231.
- Weissenbek, E., H.J. Bohm, F.G Rammerstorfer. 1994. Micromechanical investigations of arrangement effects in particle reinforced metal matrix composites. *Comput. Mater. Sci* 3: 263–278.
- Xue, P., X. Peng, and J. Cao. 2003. A non-orthogonal constitutive model for characterizing woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34: 183-193.
- Yudiono, H. 2016. Pemanfaatan Karung Plastik Bekas Untuk Panel Komposit Lamina Sebagai Material Alternatif Kuat Dan Tangguh. *Laporan Akhir Penelitian Pusat Kajian. Tidak Dipublikasikan. Universitas Negeri Semarang.*