



TESIS (RC14 2501)

STUDI EKSPERIMEN PANEL SANDWICH FIBER
GLASS - *FOAM* UNTUK DINDING STRUKTURAL
RUMAH TINGGAL

PUPUT WIYONO
3112 202 901

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Faimun M.Sc., Ph.D.
Prof. Ir. Priyo Suprobo M.S. Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS (RC14 2501)

EXPERIMENTAL STUDY OF FIBER GLASS - FOAM SANDWICH PANEL FOR STRUCTURAL WALL OF RESIDENCE BUILDING

PUPUT WIYONO
3112 202 901

SUPERVISOR
Ir. Faimun M.Sc., Ph.D.
Prof. Ir. Priyo Suprobo M.S. Ph.D

MASTER PROGRAM
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

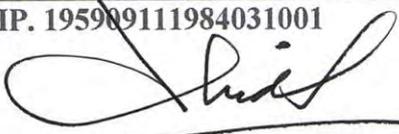
oleh :
Puput Wiyono
Nrp. 3112202901

Tanggal Ujian : 20 April 2016
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh :


1. Ir. Faimun, M.Sc, Ph.D (Pembimbing I)
NIP. 196306051989031004


2. Prof. Ir. Priyo Suprobo M.S Ph.D (Pembimbing II)
NIP. 195909111984031001


3. Dr. Ir. Hidayat Soegihardjo M.S (Penguji)
NIP 195503251980031004


4. Dr.Tech. Pujo Aji S.T, M.T (Penguji)
NIP. 197302081998021001



Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji bagi Allah yang Maha Pengasih dan Penyayang karena hanya dengan rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “STUDI EKSPERIMEN PANEL SANDWICH FIBER GLASS - *FOAM* UNTUK DINDING STRUKTURAL RUMAH TINGGAL”.

Disadari bahwa dalam penyusunan tesis ini tidak akan berhasil tanpa adanya keterlibatan orang-orang atau pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini. Untuk itu dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Faimun, M.Sc, Ph.D dan Prof. Ir. Priyo Suprobo M.S Ph.D selaku dosen konsultasi yang telah banyak membantu memberikan arahan dalam menyusun tesis ini
2. Dr. Ir. Hidayat Soegihardjo M.S, dan Dr.Tech. Pujo Aji S.T, M.T selaku dosen-dosen penguji yang telah memberikan berbagai macam masukan dalam rangka kesempurnaan penelitian ini.
3. DIKTI yang telah memberikan sokongan dana penelitian melalui skema Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) tahun 2015 untuk judul penelitian “Panel Sandwich Fiberglass – Foam sebagai Dinding Struktural Rumah Tinggal”.
4. DIKTI melalui beasiswa FAST TRACK yang telah membantu penulis dalam hal finansial studi selama 4 semester.
5. Ibu Endah Wahyuni, ST, MT, Ph.D selaku ketua program studi pasca sarjana Teknik Sipil ITS yang telah banyak membantu, penulis ucapkan terima kasih.
6. Seluruh dosen pasca sarjana Teknik Sipil, ITS yang telah mencurahkan ilmunya kepada penulis selama menempuh studi.
7. Kepada orang tua saya yang terus memberikan dukungan materi dan moral sampai selesainya tesis ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan tesis ini masih banyak kekurangan, sehingga saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata, semoga usulan penelitian ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, April 2016
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Batasan Masalah	8
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Fiber	9
2.2 Fiber Glass (Fiber Kaca)	10
2.3 Struktur Sandwich	11
2.4 Teori stuktur sandwich	13
2.4.1 Hubungan tegangan – regangan elastis linear struktur laminasi	13
2.4.2 Konstanta elastis berdasarkan Mikromekanik	15
2.4.3 Tegangan bidang (<i>plane stress</i>)	17
2.4.4 Analisa lamina	17
2.4.5 Tekuk pada Sandwich	21
2.4.6 Kerutan dan ketidakstabilan lokal akibat tekan	21
2.5 Metode pabrikasi fiberglass menggunakan Proses cetakan terbuka	26
2.5.1 Proses Wet lay – up	26
2.5.2 <i>Bag Moulding</i> dan Proses Perawatan (<i>Curing</i>)	33
2.5.3 Proses Cetakan Otoklaf (<i>Autoclave Moulding</i>)	35
2.5.4 <i>Vacuum Resin Infusion</i>	45
2.5.5 Perbandingan beberapa metode pabrikasi fiberglass	49
2.6 Penggunaan panel Sandwich pada Bangunan	50
2.7 Tinjauan terhadap Penelitian Terdahulu	51
2.7.1 Pengujian Tekan Foam	51
2.7.2 Pengujian Tarik Foam	52
2.7.3 Perbandingan nilai <i>mechanical properties</i> foam dari beberapa peneliti	54
2.7.4 Perbandingan nilai <i>mechanical properties</i> fiber dari beberapa peneliti	55
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	57

3.1	Diagram alir penelitian	57
3.2	Karakterisasi bahan	58
3.2.1	Bahan Skin Panel	58
3.2.2	Bahan core panel	61
3.3	Konfigurasi gedung yang ditinjau	61
3.4	Beban pada panel	63
3.5	Analisa elemen hingga penentuan tebal skin dan core panel	63
3.6	Pabrikasi panel	63
3.7	Pengujian Tekan panel	64
3.8	Simulasi numerik pengujian tekan panel	65
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		67
4.1	Skin Panel	67
4.1.1	Pengujian Gel time dan Peak Exothermic	67
4.1.2	Pengujian <i>Peak Exothermic</i> Resin	67
4.1.3	Pabrikasi fiberglass <i>sheet</i>	68
4.1.4	Pengujian Tarik fiberglass	73
4.1.5	Penentuan Poisson's ratio	76
4.1.6	Pengujian Tekan Fiberglass	76
4.1.7	Pengujian Geser Fiberglass	77
4.2	<i>Core</i> Panel	79
4.2.1	Pabrikasi Spesimen Rigid Polyurethane <i>Foam</i>	79
4.2.2	Micro CT – Imaging Sel Rigid Polyurethane Foam	80
4.2.3	Pengujian Tekan Rigid Polyurethane <i>foam</i>	81
4.2.4	Pengujian tarik dan penentuan <i>poisson's ratio Rigid Polyurethane Foam</i>	83
4.2.5	Pengujian Geser Rigid Polyurethane <i>Foam</i>	84
4.3	Rekapitulasi Nilai Hasil Pengujian <i>Skin</i> dan <i>Core</i>	86
4.4	Analisa Numerik Penentuan Dimensi Panel	87
4.4.1	Beban-beban yang bekerja	88
4.4.2	Beban –beban pada tipe panel yang lain	92
4.4.3	Pemodelan Panel	92
4.4.4	Analisa Ketahanan Panel Terhadap Beban Gravitasi	95
4.4.5	Analisa Ketahanan Panel Terhadap Beban Angin	97
4.4.6	Analisa Ketahanan Panel Terhadap Beban Gempa	100
4.5	Pabrikasi panel	103
4.6	Pengujian tekan panel	105
4.6.1	Persiapan pengujian	105
4.6.2	Analisa Hasil Pengujian	106
4.6.3	Perbandingan grafik tegangan skin eksperimen dengan simulasi ABAQUS	108
BAB 5 PENUTUP		111
5.1	Kesimpulan	111
5.2	Saran	111
DAFTAR PUSTAKA		113

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta Jumlah Kerusakan Rumah Akibat Gempa di Provinsi Sumatera Barat (sumber : PUSDALOPS BNPB, 2009)	1
Gambar 1.2 Kehancuran dinding depan rumah sederhana pasca gempa Bengkulu (2007) (sumber : Build Change, 2007).....	2
Gambar 1.3 Panel Sandwich Concrete-Foam (sumber : Reinhardt, 1990)	5
Gambar 2.1. Pola anyaman (a) anyaman datar, (b) <i>twill weave</i> , (c) <i>crowfoot weave</i> , (d) <i>long shaft weave</i> (sumber : Akovali, 2001).....	10
Gambar 2.2 Panel sandwich dengan (a) expanded plastic core, (b) core “sarang lebah”, (c) <i>core</i> bergelombang.....	12
Gambar 2.3 Tipe-tipe dari <i>core</i> “sarang lebah”.....	13
Gambar 2.4 Sebuah lamina yang menggambarkan sistem koordinat material (sumber : Voyiadjis dan Kattan, 2005).....	14
Gambar 2.5 Sebuah unit sel dalam paket <i>array</i> persegi dari material <i>fiber reinforced composite</i>	16
Gambar 2.6 Skema ilustrasi dari laminasi dengan empat lapisan	17
Gambar 2.7 Skema ilustrasi yang menunjukkan gambar penampang dan bidang	18
Gambar 2.8 Skema ilustrasi menunjukkan kinematika deformasi laminasi.....	19
Gambar 2.9 Skema sederhana <i>long strut</i>	22
Gambar 2.10 Gaya tarik $b\sigma_z$ per satuan panjang antara strut dan medium pendukung elastis	23
Gambar 2.11 Variasi khas tegangan kritis dengan l/t (persamaan (2.32). Garis putus-putus menggambarkan dua istilah di sisi kanan persamaan (2.32).....	24
Gambar 2.12 Tipe-tipe kasus pada ketidakstabilan kerutan.	25
Gambar 2.13 Tipe cetakan terbuka (a) positive (b) negative	26
Gambar 2.14 Prosedur <i>Hand lay-up</i> : (1) cetakan dibersihkan dan dilapisi dengan <i>mold release agent</i> ; (2) lapisan tipis <i>gel coat</i> (resin, kemungkinan berpigmen untuk memberi warna) diaplikasikan, yang akan menjadi permukaan luar produk; (3) ketika <i>gel coat</i> telah sebagian <i>setting</i> , lapisan-lapisan resin dan serat dapat diberikan, serat biasanya dalam bentuk <i>mat</i> atau <i>cloth</i> ; setiap lapisan dirol untuk sepenuhnya membuat serat terisi oleh resin dan menghilangkan gelembung udara; (4) produk di- <i>curing</i> ; dan (5) produk yang sepenuhnya mengeras dilepas dari cetakan. (sumber : Groover, 1996).....	27
Gambar 2.15 Metode <i>Spray – up</i> (sumber : Groover, 1996).....	30
Gambar 2.16 Prosedur <i>bag moulding</i> (a) <i>vacuum bag moulding</i> (b) <i>pressure bag moulding</i> (sumber : Groover, 1996)	34
Gambar 2.17 Sistem otoklaf tipikal.....	36
Gambar 2.18 <i>Vacuum bag lay up</i>	38
Gambar 2.19 Dua langkah siklus <i>curing</i> untuk prepreg carbon fiber/epoxy.....	40
Gambar 2.20 Perlengkapan <i>Vacuum Infussion</i>	46
Gambar 2.21 Konfigurasi dasar resin infusion (sumber : easycomposites.co.uk, 2010)	48
Gambar 2.22 Beberapa penggunaan panel sandwich pada bangunan (a) aplikasi pada bangunan komersial (b) panel atap.....	51
Gambar 2.23 Kurva tegangan – regangan dari foam di bawah beban tekan (Gibson dkk, 1997).....	52

Gambar 2.24 Kurva tegangan – regangan foam di bawah pembebanan tarik (Gibson dkk, 1997).....	53
Gambar 3.1 Alur penelitian	57
Gambar 3.2 Alur penelitian (lanjutan).....	58
Gambar 3.3 Material matriks fiberglass (a) Vynil Ester Resin EVERPOL 324 VE I, (b) katalis Akperox A60 MEKP (c) Cobalt 1% solution	59
Gambar 3.4 (a) Serat fiber Combo mat (b) serat fiber tipe <i>cloth</i>	60
Gambar 3.5 (a) Rumah tinggal <i>knock down</i> 1 lantai (b) Rumah tinggal terangkai	62
Gambar 3.6 Model bekisting untuk pembuatan panel	64
Gambar 3.7 Model panel rencana.....	64
Gambar 3.8 Rencana posisi perlengkapan panel ketika diuji (a) posisi LVDT, tampak samping (b) posisi <i>strain gauge</i> tampak depan	65
Gambar 4.1 Spesimen pengujian gel time dan <i>peak</i> eksotermik resin <i>vynilester</i>	67
Gambar 4.2 Grafik hubungan prosentase katalis dan <i>geltime</i> resin.....	68
Gambar 4.3 Grafik hubungan prosentase katalis dengan <i>peak</i> eksotermal resin	68
Gambar 4.4 Skema proses <i>vacuum infusion</i>	69
Gambar 4.5 Hasil pengujian tarik fiberglass dengan serat kaca tipe <i>cloth</i> (a) 1 lapis (b) 2 lapis (c) 3 lapis (d) 4 lapis	73
Gambar 4.6 Grafik hubungan jumlah lapis dalam fiberglass terhadap beban tarik P maksimum yang dapat ditahan	74
Gambar 4.7 (a) Grafik hubungan jumlah lapis serat terhadap kekuatan tarik fiberglass (b) Grafik hubungan jumlah lapis <i>fiber (ply)</i> terhadap tensile modulus fiberglass	74
Gambar 4.8 (a) hasil pengujian tarik fiberglass combo mat (b) model kegagalan benda uji fiberglass tipe combo mat	75
Gambar 4.9 (a) Grafik hubungan tegangan – regangan fiberglass combo mat (b) Penentuan modulus tarik fiberglass.....	75
Gambar 4.10 Pengujian poisson’ ratio fiberglass melalui mekanisme tarik	76
Gambar 4.11 (a) Grafik hubungan tegangan - regangan fiberglass arah vertical.....	76
Gambar 4.12 Pengujian tekan fiberglass	77
Gambar 4.13 (a) Keadaan spesimen ketika pengujian tekan fiberglass (b) Penentuan modulus tekan fiberglass.....	77
Gambar 4.14 (a) Pengujian geser fiberglass (b) Mode kegagalan geser fiberglass.....	78
Gambar 4.15 Grafik hubungan beban dan deformasi pengujian geser fiberglass	78
Gambar 4.16 Pabrikasi specimen Rigid PU <i>foam</i> untuk pengujian kerapatan dan pengujian tekan.....	79
Gambar 4.17 Media pabrikasi Rigid PU <i>foam</i> (a) cetakan beton kubus untuk specimen tarik (b) bekisting kayu untuk specimen geser.	79
Gambar 4.18 Citra sel 2D (a) potongan memanjang (<i>foam rise dir.</i>) dengan pembesaran (M) 50X (b) Potongan memanjang M222.5X (c) potongan melintang M50X (d) potongan melintang M222.5X.....	80
Gambar 4.19 Perilaku Rigid PU <i>foam</i> ketika dikenai beban tekan, dihentikansebelum hardening	81
Gambar 4.20 Tipikal kurva elastic – plastic Rigid PU <i>foam</i> dalam kondisi tekan, dilanjutkan sampai hardening.....	81
Gambar 4.21 Hasil pengujian tes tekan (a) Kurva hubungan tegangan dan regangan Rigid PU <i>foam</i> dalam mode tekan (b) Penentuan modulus tekan	82
Gambar 4.22 Perbandingan kekuatan tekan dari beberapa Rigid PU <i>foam</i>	82
Gambar 4.23 Perbandingan modulus tekan dari beberapa Rigid PU <i>foam</i>	83

Gambar 4.24 (a) Model kegagalan RPU <i>foam</i> setelah pengujian tarik (b) Kurva hubungan tegangan dan regangan tarik RPU <i>foam</i>	83
Gambar 4.25 (a) Posisi strain gauge pada spesimen longitudinal (b) Kurva hubungan tegangan – regangan <i>foam</i> RPU <i>foam</i> untuk arah vertikal dan horizontal	84
Gambar 4.26 Penentuan <i>poisson's ratio</i> RPU <i>foam</i>	84
Gambar 4.27 Spesimen pengujian geser dan peralatannya	85
Gambar 4.28 (a) Grafik hubungan tegangan – regangan geser RPU <i>foam</i> (b) penentuan modulus geser RPU <i>foam</i>	85
Gambar 4.29 S_s , Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget (MCE_R) kelas situs SB.....	89
Gambar 4.30 S_1 , Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget (MCE_R) kelas situs SB.....	89
Gambar 4.31 (a) Panel sandwich rencana (b) Definisi <i>skin</i> dan <i>core</i> panel.....	93
Gambar 4.32 (a) Jenis pemodelan yang dipakai (b) Definisi <i>section</i> panel	93
Gambar 4.33 Pendefinisian material GFRP dan PU <i>foam</i> : <i>mass density</i>	95
Gambar 4.34 Pendefinisian material (a) GFRP dan (b) PU <i>foam</i>	95
Gambar 4.35 Skema pabrikasi panel	104
Gambar 4.36 Perlengkapan pabrikasi panel (a) bekisting (b) RPUF cair A dan B	105
Gambar 4.37 Panel sandwich yang telah dirapihkan bagian tepinya	105
Gambar 4.38 Setting alat pengujian (a) Pemasangan LVDT (b) Pemasangan <i>strain gauge</i>	106
Gambar 4.39 Step – step menuju kegagalan panel (a) kondisi panel saat $P = 100$ kg (b) kondisi panel saat $P = 1000$ kg, (c) kondisi panel saat $P = 1400$ kg, muncul delaminasi	107
Gambar 4.40 Step – step menuju kegagalan dari panel yang diuji (d) kondisi panel saat $P = 1800$ kg, lapisan <i>skin</i> benar – benar terkelupas dari lapisan <i>core</i> . (e) kondisi panel ketika pengujian dilanjutkan, kapasitas aksial panel turun ke 250 kg (f) panel yang telah diuji (dilihat dari sisi lain).	107
Gambar 4.41 (a) Grafik hubungan beban aksial – defleksi lateral dari panel sandwich fiberglass – foam (b) Grafik hubungan beban dan tegangan skin dari panel yang dites.	107
Gambar 4.42 Pemodelan beban pada panel.....	109
Gambar 4.43 Grafik Hubungan Tegangan skin menurut fungsi beban simulasi.....	110
Gambar 4.44 Grafik Perbandingan Tegangan Skin terhadap Penambahan Beban Tekan Simulasi vs Eksperimen	110

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbandingan Beberapa Fiber	6
Tabel 2.1 Material Properties Fiber Glass	11
Tabel 2.2 Konstanta B dan C	25
Tabel 2.3 Material <i>vacuum bag</i> tipikal	38
Tabel 2.4 Sifat material <i>tooling</i> komposit	43
Tabel 2.5 Perlengkapan <i>Vacuum Infussion</i>	46
Tabel 2.6 Perbandingan nilai <i>mechanical properties</i> foam dari beberapa peneliti	54
Tabel 2.7 Perbandingan nilai <i>mechanical properties</i> fiber dari beberapa referensi	55
Tabel 3.1 Kebutuhan resin untuk beberapa ukuran produk	60
Tabel 3.2 <i>Cure time</i> menurut temperatur	61
Tabel 3.3 Dimensi rumah – rumah yang dipertimbangkan	62
Tabel 4.1 Proses <i>Vacuum Infussion</i> di workshop	70
Tabel 4.2 Dimensi benda uji Tarik fiberglass tipe <i>cloth</i>	74
Tabel 4.3 Data pengujian tarik fiberglass combo mat 1 lapis	75
Tabel 4.4 Kuat tekan dan modulus tekan fiberglass	77
Tabel 4.5 Kuat geser fiberglass	78
Tabel 4.6 Rekapitulasi nilai hasil pengujian	86
Tabel 4.7 Tipe dan ukuran rumah - rumah sederhana yang ditinjau	87
Tabel 4.8 Koefisien Situs (F_a)	90
Tabel 4.9 Koefisien Situs (F_v)	90
Tabel 4.10 Nilai – nilai beban pada bangunan	92
Tabel 4.11 Pemodelan panel pada program ABAQUS	93
Tabel 4.12 Input material properties	94
Tabel 4.13 Hasil analisa panel terhadap beban gravitasi	96
Tabel 4.14 Kontrol Tegangan Panel terhadap Beban Gravitasi	97
Tabel 4.15 Kontrol Tegangan Panel terhadap Beban Angin	97
Tabel 4.16 Hasil analisa panel terhadap beban angin	98
Tabel 4.17 Hasil analisa panel terhadap beban gempa	100
Tabel 4.18 Kontrol Tegangan Panel terhadap Beban Gempa	102
Tabel 4.19 Kontrol deformasi panel terhadap beban gempa	103
Tabel 4.20 Pengujian tekan	106
Tabel 4.21 Perbandingan kapasitas panel hasil pengujian dengan beban gravitasi rencana panel berdasarkan tipe panel	108
Tabel 4.22 Tegangan skin panel menurut penambahan beban uji tekan	109

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

STUDI EKSPERIMEN PANEL SANDWICH FIBER GLASS - FOAM UNTUK DINDING STRUKTURAL RUMAH TINGGAL

Nama Mahasiswa : Puput Wiyono
NRP : 3112202901
Dosen Pembimbing : Ir. Faimun, M.Sc, Ph.D
: Prof. Priyo Suprobo M.S PhD

ABSTRAK

Gempa Mentawai (2010) dan gempa Sumatera Barat (2009) telah menewaskan lebih dari 400 orang dan menghancurkan setidaknya 88.000 rumah. Melalui penyelidikan yang mendalam, ditemukan bahwa tingkat kematian yang tinggi disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah dari berat dari dinding batu bata. Karena kekuatan dan kerapatan yang rendah, panel sandwich fiberglass foam diprediksi mampu untuk mengurangi dampak negatif pada struktur, serta orang-orang di dalamnya. Beberapa pengujian untuk masing-masing komponen dari panel sandwich seperti pengujian tekan, geser dan tarik, dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanik sebagai data masukan dalam program elemen hingga. Program elemen hingga menghasilkan dimensi panel yang secara teoritis dapat menahan beban rencana seperti beban gravitasi, beban angin dan beban gempa. Verifikasi melalui studi eksperimental dalam mode kompresi dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang perilaku panel yang mungkin diluar prediksi dalam analisis elemen hingga sebelumnya. Pengujian menunjukkan bahwa kegagalan panel itu tidak ditentukan oleh momen sekunder pada puncak pertengahan panel, tapi oleh delaminasi dari kulit di daerah tertentu. Dalam hal ini, delaminasi terjadi pada daerah atas panel, dekat dengan rangka baja. Pengujian tersebut mengarah pada kesimpulan bahwa panel sandwich fiberglass-foam dengan 2 lapis fiberglass combo mat untuk masing – masing skin dan dengan ketebalan total 80 mm, memadai untuk menahan beban rencana dari rumah, terutama dari beban tekan.

Kata kunci: sifat mekanis material; metode pabrikan panel; program elemen hingga; rumah tahan gempa.

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

EXPERIMENTAL STUDY OF FIBER GLASS - *FOAM SANDWICH* PANEL FOR STRUCTURAL WALL OF RESIDENCE BUILDING

Student name : Puput Wiyono
ID number : 3112202901
Supervisor : Ir. Faimun, M.Sc, Ph.D
: Prof. Priyo Suprobo M.S PhD

ABSTRACT

Mentawai earthquake (2010) and earlier West Sumatera earthquake (2009) have killed more than 400 people and destroyed at least 88,000 homes. Through deep investigation, it is found that the high death rate were caused by several factors, one was by the heaviness of the brick wal. Due to its strength and low density, fiber glass-foam sandwich panel is predicted enable to reduce the negative impacts on structures, as well as the people inside. Various tests of each component of the sandwich panel such as compressive test, shear test and tensile test, were conducted to obtain mechanical properties as input data in finite element program. The finite element program generated the panel dimension that teoritically be able to resist the applied loads such as gravity load, wind load and earthquake load. Verification through experimental study in compression mode was conducted to get an information about the behavior of the panel that may be out of prediction in previous finite element analysis. The test showed that the failure of the panel was not determined by the secondary moment at the mid height of the panel, but by the delamination of the skin at a particular area. In this case, delamination occurred at the upper region of the panel, near the upper steel frame. The test led to a conclusion that panel sandwich fiberglass-foam with 2 layers combo mat fiberglass for each skin and with total thickness of 80 mm was adequate to resist the applied loads of one story residential building, particularly from compressive loads.

Keywords: mechanical properties; panel fabrication method; finite element program; earthquake-proof building.

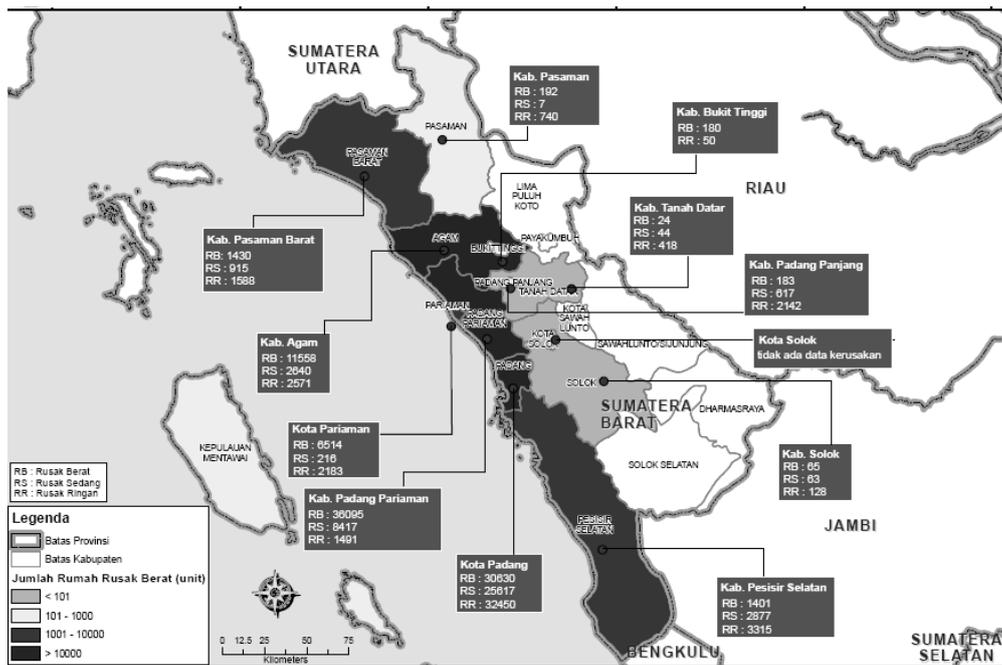
“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gempa Mentawai berskala 7.2 SR yang terjadi pada 25 Oktober 2010 menewaskan lebih dari 400 jiwa (OCHA, 2010)¹ setelah sebelumnya gempa bumi berskala 7.6 SR di Sumatera Barat tahun 2009 menewaskan lebih dari 1000 jiwa (OCHA, 2009). Korban tewas terbanyak adalah mereka yang tertimpa reruntuhan rumah – rumah sederhana satu sampai tiga lantai. PUSDALOPS BNPB (2009)² menyebutkan akibat gempa bumi Sumatera Barat 2009 terdapat 88.272 rumah dalam kondisi rusak berat, 40.813 rumah dalam kondisi rusak sedang dan 46.886 rumah rusak ringan. Kerusakan tersebut merupakan angka akumulasi dari seluruh kabupaten di Sumatera Barat dengan detail persebaran sebagaimana ditunjukkan Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta Jumlah Kerusakan Rumah Akibat Gempa di Provinsi Sumatera Barat (sumber : PUSDALOPS BNPB, 2009)

¹ OCHA merupakan bagian dari Sekretariat PBB yang bergerak dalam bidang kemanusiaan dan turut serta dalam merespon keadaan darurat di berbagai negara. (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs)

² PUSDALOP BNPB (Pusat Pengendalian Operasi Badan Penanggulangan Bencana) merupakan badan negara yang bertugas melakukan usaha penanggulangan bencana termasuk melaporkan penyelenggaraan penanggulangan bencana secara reliabel.

Sementara akibat Gempa Mentawai, di desa-desa di bagian paling selatan Kepulauan Mentawai, Pagai Utara dan Pagai Selatan, antara 25 sampai 90% rumah hancur atau tidak bisa ditempati. Di daratan Sumatra, kerusakan rumah menjalar di sepanjang pantai baik ke arah utara dari Bengkulu atau ke arah selatan dari Padang ke Kabupaten Pasisir Selatan (WHO Indonesia,2010).

Sistem dinding dari rumah-rumah yang terkena dampak gempa di daratan Sumatra meliputi jenis-jenis struktur (1) Ikatan bata atau setengah ikatan bata tanpa tulangan (2) Semi permanen dengan rangka kayu (terdapat pasangan bata di bagian bawah dan anyaman bambu yang diplester atau kayu di bagian atasnya) dan (3) Rangka kayu. Jenis dinding setengah bata sedikit lebih banyak dipakai di daerah perkotaan Sumatera (97.46%), sementara jenis semi permanen dan rangka sedikit lebih sering dijumpai di daerah pedesaan (4.40%). Namun secara keseluruhan, dinding setengah bata lebih mendominasi (96.21%) dibandingkan dua jenis struktur yang lain (BPS, 2011).

Jenis struktur ikatan bata dibangun di atas pondasi menerus dangkal dari pasangan batu sungai, dan mungkin memiliki *sloof* dari beton bertulang. Menurut Build Change (2007)³ ada dua jenis batu bata yang umum dipakai, bata bakar konvensional (dengan tangan) dan bata berlubang dengan mesin (jenis ini banyak digunakan di daerah Bengkulu). Jenis struktur ikatan bata runtuh karena kurangnya kekakuan pada struktur dinding jenis ini. Pilihan arsitektural yang umum dijumpai adalah banyaknya bukaan berukuran besar pada bagian depan rumah sehingga memicu keruntuhan dinding-dinding rumah yang lain seperti yang terlihat pada Gambar 1.2.



(a)



(b)

Gambar 1.2 Kehancuran dinding depan rumah sederhana pasca gempa Bengkulu (2007) (sumber : Build Change, 2007)

³ Build Change merupakan perusahaan sosial non-profit berskala internasional yang membantu mendesain rumah tahan gempa di negara-negara berkembang. Selama menjalankan tugasnya, perusahaan ini juga melakukan observasi terhadap kondisi bangunan-bangunan pasca gempa. Perusahaan ini dapat diakses melalui situs <http://www.buildchange.org>.

Banyak rumah semi permanen dengan pasangan bata di bagian bawah setinggi 40 cm sampai 1 m memiliki kinerja yang baik selama terjadinya gempa. Seperti rumah ikatan bata, jenis rumah ini didukung oleh pondasi menerus dangkal dari pasangan batu, akan tetapi, jarang ada sambungan antara kolom dan pondasi, atau antara kolom dengan pasangan bata. Build Change (2007) menyebutkan kerusakan pada rumah semi permanen ini terdiri dari keretakan pada pasangan bata, tidak berfungsinya pasangan bata sebagai bagian yang seharusnya kokoh dan tidak bergerak, serta pergeseran atau kerusakan pada rangka kayu.

Selain menghancurkan bangunan, gempa bumi juga berhasil memutus jalur transportasi darat. Tercatat 15 titik jalan di Kabupaten Agam rusak berat akibat gempa Sumatera Barat 2009 (BNPB, 2009), mengakibatkan beberapa desa terisolir dan mengalami keterlambatan bantuan. Kondisi jalan inilah yang juga menjadi penyebab lambatnya pembangunan pemukiman akibat truk pembawa material tertahan di Bengkulu. Maka jalur udara merupakan satu-satunya akses dalam rangka pemberian bantuan, termasuk dalam hal pengangkutan material bangunan terutama material dinding karena dinding memiliki volume yang paling besar dibandingkan dengan bagian lain dalam struktur rumah, sehingga kesulitan terbesar dalam rangka membangun rumah pasca bencana adalah pada pengangkutan bahan material tersebut.

Keterbatasan moda transportasi udara seperti helikopter pada kapasitas angkutnya menjadikan proses tersebut tidak efektif. Helikopter tipe NBO 105 yang merupakan jenis helikopter yang biasa dioperasikan Basarnas (Badan SAR Nasional) ketika terjadi bencana, hanya memiliki daya angkut sebesar 1.2 ton (Eurocopter Canada, 1987) atau hanya setara dengan berat 6 m² dinding setengah bata. Dengan keterbatasan tersebut, membangun sebuah rumah dalam keadaan darurat memerlukan waktu pengangkutan material yang lama, kecuali mengganti dinding bata tersebut dengan material yang lebih ringan.

Sebagaimana diketahui, dinding merupakan salah satu elemen bangunan yang berfungsi memisahkan sekaligus membentuk ruangan. Namun akibat beratnya, dinding bata konvensional menjadi salah satu komponen penyumbang gaya gempa yang cukup besar di mana gaya gravitasi (W_t) dan gaya horizontal gempa (V) memiliki hubungan linear dalam formula gempa statik ekuivalen $V = \frac{CI}{R} \times W_t$. Di samping itu, untuk rumah

satu atau dua lantai, pondasi batu kali perlu dipasang di bawah dinding lantai 1 untuk memikul berat dinding konvensional yang terpasang.

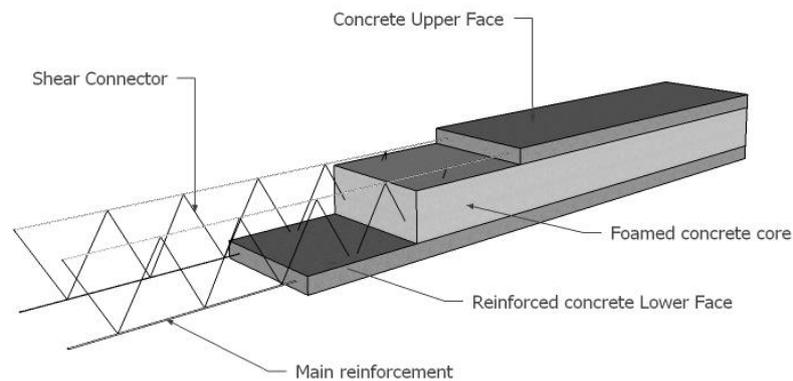
Dibutuhkan satu solusi untuk mengatasi tingginya berat jenis dinding konvensional untuk dapat mengurangi gaya gempa sekaligus mengurangi resiko kematian akibat tertimpa dinding konvensional yang berat. Mengganti dinding bata konvensional dengan panel *sandwich* dan membuatnya menjadi komponen structural sebagai dinding geser merupakan salah satu solusi. Penggunaan panel *sandwich* (Gambar 1.3) dalam konstruksi struktur bangunan menawarkan banyak keuntungan karena beberapa alasan seperti beratnya yang ringan, biaya yang efektif dan ketahanannya terhadap gempa. Aplikasi panel *sandwich* paling besar adalah pada bangunan-bangunan industri dan komersial dengan prosentase penggunaan sekitar 80% dari panel sandwich yang diproduksi (Dedecker, 2006)⁴. Penggunaannya dapat ditemukan di banyak negara, seperti Amerika Serikat, negara-negara EAME (Europe, Africa, Middle East). dan dalam beberapa tahun terakhir diikuti oleh beberapa negara Asia dengan intensitas gempa yang tinggi seperti China, Jepang dan Taiwan. Konsumsi panel sandwich di region EAME mengalami peningkatan dari 100 ktpa di tahun 1995 menjadi 325 ktpa di tahun 2006 dan diprediksi akan terus mengalami peningkatan dengan laju sebesar 11% per tahun (Dedecker, 2006).

Sampai saat ini, keberadaan panel *sandwich* di Indonesia sangat terbatas karena belum adanya metode desain mengenai hal ini. Beberapa bangunan yang telah menggunakan panel *sandwich* di Indonesia ternyata merupakan hasil suplai langsung dari China. Peraturan perencanaan bangunan yang dipakai di China seperti GB 500011-2001 tentang *Seismic Design of Buildings* ataupun GB 50223-2008 tentang *Standard for Classification of Seismic Protection of Building Constructions*, ternyata juga belum memuat tata cara desain panel tersebut karena sebagian besar peraturan China mengacu pada peraturan Amerika Serikat (McGraw_Hill Construction, 2003)⁵ di mana

⁴ Kristof Dedecker merupakan seorang Doktor di bidang Kimia Polimer yang juga manager Marketing dan Technology Huntsman Polyurethanes, sebuah perusahaan Sandwich Panel di Belgium, menulis sebuah paper berjudul "Sandwich Panels Supporting Growth with an Established and Proven Technology" yang kemudian dipublikasikan oleh perusahaan tempatnya bekerja.

⁵ Mc Graw Hill Construction merupakan majalah konstruksi terkemuka di Amerika Serikat yang memiliki data-data mengenai dunia konstruksi yang reliable dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Artikel yang dicatut dalam bagian ini merupakan tulisan dari Randolph W. Tucker, seorang wakil presiden The RJA Group Inc, sebuah perusahaan yang berpengalaman menangani proyek di lebih dari 60

ketidakberadaan prosedur desain tersebut direpresentasikan oleh peraturan-peraturan gedung di Indonesia. Maka untuk dapat mendesain panel *sandwich*, perlu dilakukan penelitian terlebih dahulu mengenai perilaku-perilaku bahan-bahan penyusun panel kemudian batasan-batasan desain perlu diadopsi dari peraturan-peraturan yang ada yang mengatur bahan-bahan penyusunnya secara tunggal dan terpisah.



Gambar 1.3 Panel Sandwich Concrete-Foam (sumber : Reinhardt, 1990)

Berbagai penelitian tentang panel *sandwich* maupun plat laminasi (panel *sandwich* merupakan salah satu jenis plat laminasi) dilakukan oleh beberapa peneliti seperti oleh Sharaf, Tarek (2011) tentang panel GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer), Mohammadi (2011) tentang multilayer panel infill gabungan bata dan beton, Amadio (2011) tentang Buckling of Laminated Glass Elements in Compression dan masih banyak lagi. Penelitian untuk material yang berbeda tentu akan memberikan hasil yang berbeda pula. Oleh karena itu pemilihan material yang tepat untuk dapat menghasilkan kombinasi yang kuat, ringan, dan tahan terhadap gempa sangat diperlukan. Pengetahuan yang benar mengenai transfer tegangan di dalam panel *sandwich* secara umum akan sangat membantu, bahwa diperlukan material yang mampu menahan momen dengan baik pada lapisan kulit (*skin*) dan pada lapisan inti (*core*) diperlukan material yang mampu menahan geser yang terjadi.

Fiber merupakan salah satu material yang secara luas digunakan di berbagai bidang termasuk sebagai material utama pada daerah-daerah ekstrim, yaitu daerah – daerah dengan tingkat korositas yang tinggi atau pada komponen-komponen pesawat luar angkasa. Jika dibandingkan dengan material lain yang biasa digunakan sebagai

baik dan akurat sesuai nilai solusi eksak dan nilai eksperimental. Oleh karena itu pendekatan numerik menggunakan finite element (teori lamina) dirasa cukup mampu mewakili kondisi-kondisi ini.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama dalam hal ini adalah bagaimana cara mendesain dinding dan sambungan panel *sandwich* berbahan fiber glass dan *foam* terhadap gaya-gaya struktural, terutama ketahanannya terhadap gaya gempa. Permasalahan utama tersebut kemudian dijabarkan sebagai berikut:

- a. Bagaimana permodelan pembebanan pada panel sandwich?
- b. Bagaimana permodelan panel pada program finite element?
- c. Bagaimana perilaku dan kemampuan komponen bahan bangunan terhadap lentur akibat gaya angin?
- d. Bagaimana perilaku dan kemampuan komponen bahan bangunan terhadap beban gravitasi dan gempa?
- e. Berapa tebal *skin* dan *core* yang dibutuhkan untuk bisa menahan gaya-gaya yang bekerja pada modul rencana?

1.3 Tujuan Penelitian

Karena masalah di atas, maka penelitian ini, diperlukan untuk:

- a. Mendapatkan permodelan pembebanan pada panel sandwich
- b. Mendapatkan permodelan panel dan sambungan pada program finite element
- c. Mengetahui perilaku dan kemampuan komponen bahan bangunan terhadap lentur akibat gaya angin
- d. Mengetahui perilaku dan kemampuan komponen bahan bangunan terhadap aksial beban gravitasi dan gempa
- e. Mengetahui perilaku kemampuan komponen bahan bangunan terhadap geser akibat gaya angin dan gempa
- f. Mendapatkan tebal *skin* dan *core* yang dibutuhkan untuk bisa menahan gaya-gaya yang bekerja pada panel.

1.4 Batasan Masalah

- a. Analisa didasarkan pada struktur bangunan sederhana 1, 2 dan 3 lantai.
- b. Fiber Glass yang digunakan adalah jenis E-Glass
- c. Bangunan menggunakan sistem dinding penumpu
- d. Struktur yang ditinjau fokus pada shearwall
- e. Beban gempa didesain berdasarkan wilayah zona gempa kuat (Sumatera Barat)
- f. Analisa numerik dilakukan dengan program bantu Abaqus v.10
- g. Panel dianalisa dalam kondisi elastis.
- h. Desain menggunakan metode ASD (Allowable Stress Design)

1.5 Manfaat Penelitian

- a. Hasil Penelitian dapat digunakan sebagai komponen penting dalam prosedur desain lanjutan sandwich berbahan fiber-foam.
- b. Menciptakan komponen bangunan ringan tahan gempa sehingga mempermudah pengangkutan.
- c. Menciptakan komponen bangunan tahan gempa yang memiliki kemampuan instalasi yang relative mudah dan cepat, serta
- d. Dinding *sandwich* flexible digunakan untuk berbagai keperluan, termasuk untuk partisi gedung tinggi.

BAB 2

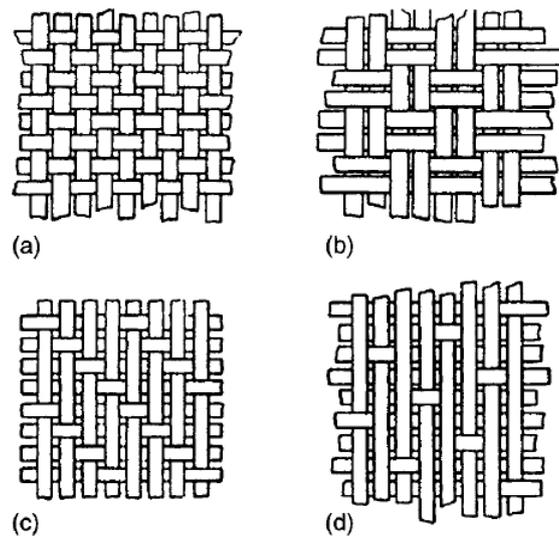
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fiber

Kata fiber berarti tunggal, merujuk pada material memanjang yang memiliki panjang minimal 200 kali lebar atau diameternya (Manziona dan Gillham, 1981 dalam Akovali, 2001). Sementara komposit fiber didefinisikan sebagai sebuah kombinasi dari dua atau lebih komponen yang berbeda dalam bentuk atau komposisi pada skala makro (Peplly, 1987 dalam Akovali, 2001) dan memiliki dua atau lebih fase (lapis), di mana fase ke-n bertindak sebagai penguat fase ke n+1 (Herakovich, 1998).

Komposit fiber, juga berlaku untuk struktur komposit secara umum, biasanya terdiri dari material penguat yang berada dalam sebuah matriks (lem/binder). Metode untuk meningkatkan kekuatan dan sifat material secara keseluruhan adalah dengan menambahkan fase terdispersi (menyebar) ke dalam matriks yang dapat berupa keramik, metal atau polimer. Oleh karena itu berkembanglah *ceramic matrix composites*, *metal matrix composites (MMC)* atau *polymer matrix composites (PMC)* atau komposit keramik/metal/polimer, *carbon matrix composites (CMC)*, atau bahkan *hybrid composites*. Dalam sebuah komposit, secara umum matriks memiliki nilai modulus yang rendah, sementara materi penguat biasanya 50 kali lebih kuat dan 20-150 kali lebih kaku (Akovali 2001).

Materi penguat dalam sebuah komposit dapat berupa penguat particular (*particular reinforcing agents* seperti bubuk selulosa, bubuk karet) atau fiber (fiber kaca, fiber carbon, aramid/kevlar, boron, keramik maupun metal). Materi penguat tersebut kemudian dikombinasikan dengan matriks polimer dalam beberapa bentuk, antara lain filament (fiber menerus), *chopped strands*, *roving* (strand menerus parallel), *yarn* (filament yang diplintir), *woven rovings* (*roving* yang dianyam), *woving yarn*, ataupun dalam bentuk mat, yaitu lembaran tipis yang merupakan hasil kombinasi fiber menerus maupun *chopped strands* dengan matriks (Grooven, 1996). Berbagai pola anyaman yang ada pada fiber ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Pola anyaman (a) anyaman datar, (b) *twill weave*, (c) *crowfoot weave*, (d) *long shaft weave* (sumber : Akovali, 2001)

Sistem kerja material fiber secara umum dikenal sebagai sistem Fiber Reinforced Composite (FRC). Dalam sistem ini, serat menahan beban utama sementara fungsi matriks terutama untuk memuat distribusi dan transfer beban ke serat sekaligus sebagai pengikat di antara serat-serat yang ada (Akovali, 2001), selain juga berperan : (1) menentukan stabilitas termo-mekanika komposit, (2) menciptakan durabilitas yang baik, dan (3) memungkinkan spasi dan orientasi fiber berdasarkan kebutuhan. Matriks tersebut biasanya menyumbang volume sebesar 30-40% dari volume total struktur komposit (Uyanik, 2001).

2.2 Fiber Glass (Fiber Kaca)

Kaca merupakan material yang terdiri dari jaringan silica. Kaynak (2001) menyebutkan ada empat klasifikasi kaca yang digunakan secara komersial, diantaranya alkali tinggi (soda-lime-silica : A glass), *electrical grade* (calcium alumino boro-silicate dengan alkali oxide rendah : E glass), *chemically-resistant modified E glass grade* (dengan kalsium alumino silikat : ECR glass), *high strength grade* (dengan magnesium alumino silikat tanpa boron oksida: S glass). Dari keempat jenis fiber glass yang ada, jenis E glass merupakan jenis yang paling banyak digunakan meskipun S glass memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas paling tinggi (lihat Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Material Properties Fiber Glass

Material	Kerapatan	Kekuatan Tarik	Modulus Young	CTE	Strain to Failure
	(kg/m ³)	(Mpa)	(Gpa)	(10 ⁻⁶ /K)	(%)
E-Glass	2620	3450	81	5	4.9
S-Glass	2500	4590	89	5.6	5.7
A-Glass	2500	3050	69	8.6	5

(sumber : Akovali, 2001)

2.3 Struktur Sandwich

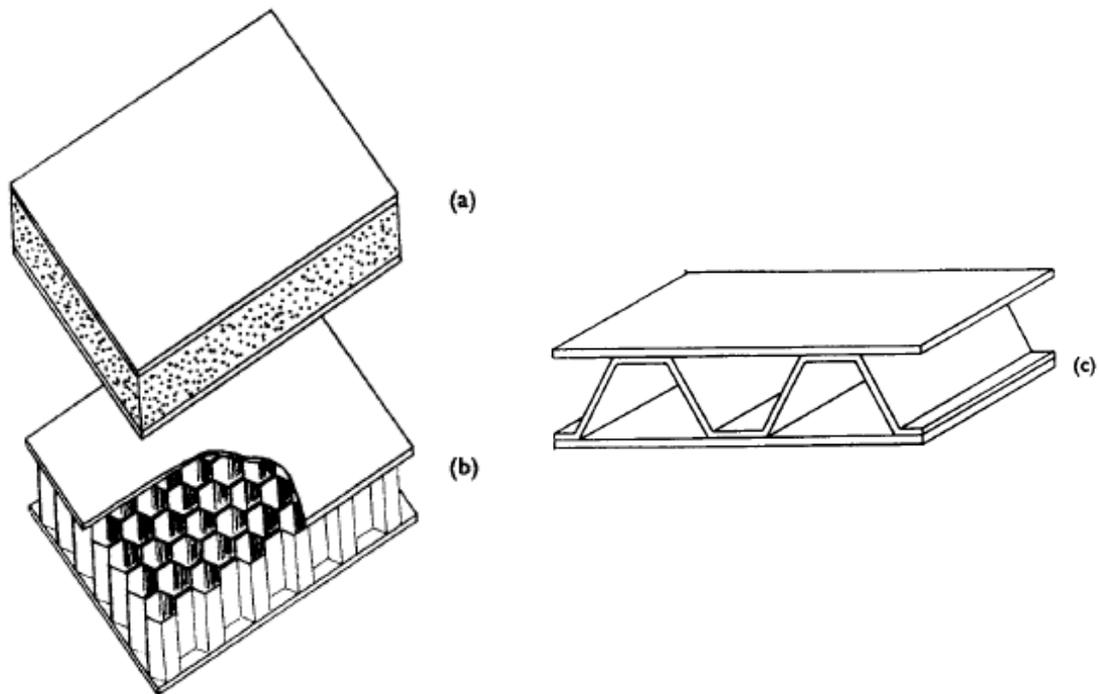
Struktur sandwich merupakan salah satu tipe struktur komposit. Penampangnya terdiri dari dua buah lapisan kulit (*skin*) yang kuat dan kaku yang dihubungkan dengan inti (*core*) dengan kerapatan kecil. Dibandingkan dengan struktur homogen, kombinasi rangkaian tersebut mampu menghasilkan struktur baru yang memiliki rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi dengan kemampuan insulasi panas yang baik (Salet, 1990). Secara struktural, momen lentur ditahan oleh bagian kulit sementara beban geser ditahan oleh bagian inti. Oleh karena itu, struktur sandwich mewakili sebuah contoh optimum dari penggunaan material berbeda yang berperilaku sebagai suatu struktur komposit baru.

Menurut Allen dan Neal (1969), ada beberapa tipe sandwich. Sandwich dengan tipe paling sederhana terdiri atas dua lembaran material padat yang tipis, kaku, dan kuat yang dipisahkan oleh lapisan tebal dari material dengan kepadatan rendah yang tidak sekuat material tipis di atas. (Gambar 2.2a). Sebagai perbandingan kasar, sandwich yang efisien diperoleh saat berat inti kurang lebih sama dengan gabungan berat dari lapisan permukaan. Jelas bahwa dengan berat total yang sama, kekuatan lentur dari kombinasi ini sangat jauh lebih besar daripada kekuatan lentur pelat solid tunggal dari material *skin sandwich* tersebut.

Bagian tengah memiliki beberapa fungsi vital. Bagian ini harus cukup kuat pada arah tegak lurus terhadap lapisan permukaan untuk tetap menjaga jarak pemisah yang sama antar lapisan. Bagian ini harus cukup kuat terhadap geser agar ketika panel dibengkokkan, lapisan permukaan tidak meluncur satu sama lain. Jika syarat terakhir tidak terpenuhi, lapisan permukaan hanya akan berperilaku sebagai dua pelat atau panel independen dan efek sandwich akan hilang. Bagian tengah ini juga harus cukup kuat untuk menjaga permukaan tetap datar; jika tidak, sangat mungkin bagi permukaan terjadi gesper lokal (kerut) karena pengaruh tegangan tekan dalam alat ini. Bagian

tengah harus memenuhi semua persyaratan di atas dan juga penting bahwa perekat tidak boleh cukup fleksibel untuk mengizinkan gerakan yang relatif besar antara bagian tengah dan permukaan

Jika core cukup kuat dan kaku, ini akan memiliki kontribusi yang berguna bagi kekuatan lentur panel secara keseluruhan. Kontribusi ini sedikit lebih kecil pada kasus core dengan kepadatan rendah yang biasanya digunakan dan akan sangat baik untuk mengabaikannya. Ini juga mengarah pada penyederhanaan analisis tekanan dan defleksi.

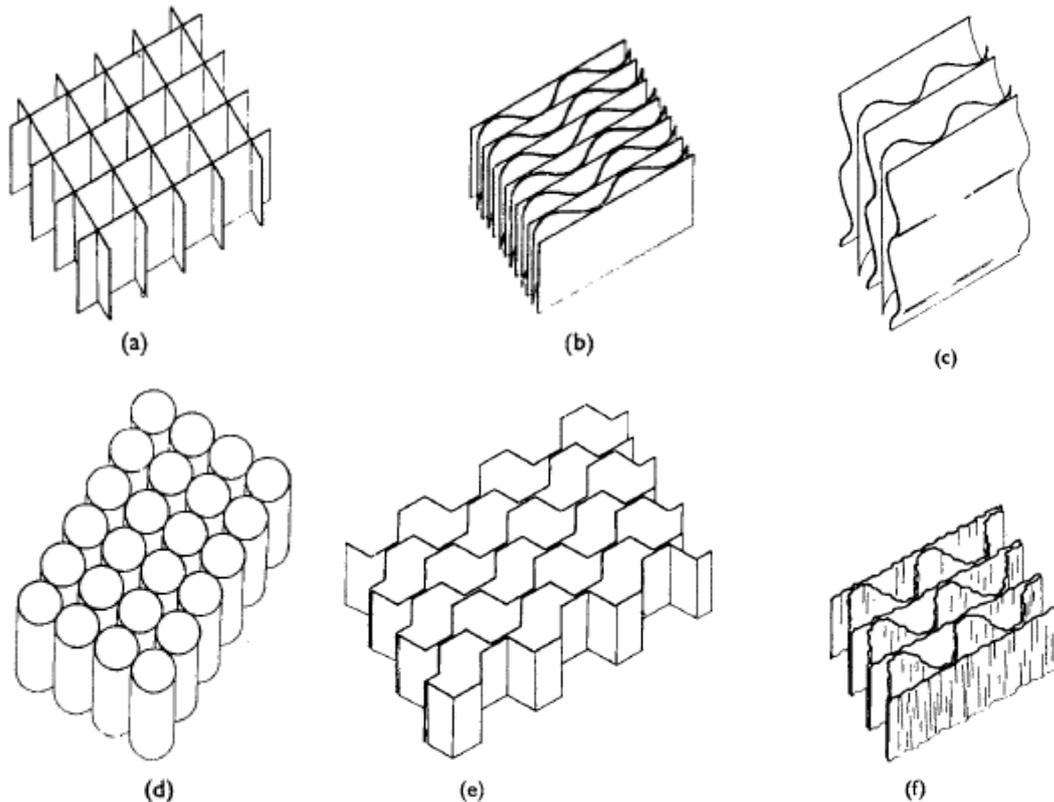


Gambar 2.2 Panel sandwich dengan (a) expanded plastic core, (b) core “sarang lebah”, (c) core bergelombang

Panel yang digunakan dalam industri bangunan yang sampai saat ini telah menjadi karakter utama semi-struktural, digunakan untuk memikul beban relatif kecil sepanjang bentang panjang. Panel bangunan, sama seperti panel pesawat, harus ringan tapi tidak mahal seperti panel pada pesawat. Semua panel logam belum menemukan aplikasi yang substansial dalam bangunan tetapi juga ada ruang lingkup yang besar bagi material lainnya. Untuk skin ada semen asbes, FRP, *plywood*, hardboard dan ferro-semen (sebagai pembeda dari beton bertulang biasa). ‘Sarang lebah’ non-logam dan core bergelombang terbuat dari kertas yang diresapi resin dan plastik yang diperkuat; “solid” core terbuat dari chipboard berlubang, kayu balsa, beberapa jenis plastik, kaca

busa, beton ringan dan produk tanah liat. Material baru dan kombinasi baru dari material lama yang terus-menerus diolah dan digunakan.

Beberapa variasi tipe dari core “sarang lebah” dapat dilihat pada Gambar 2.3 di bawah.



Gambar 2.3 Tipe-tipe dari core “sarang lebah”.

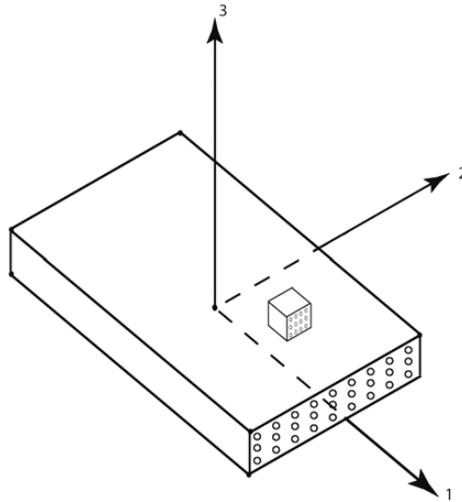
2.4 Teori stuktur sandwich

2.4.1 Hubungan tegangan – regangan elastis linear struktur laminasi

Secara umum, material komposit FRP 1 lapis (lamina) memiliki 3 sistem koordinat orthogonal 1,2,3 sebagai berikut:

1. Sumbu 1 sejajar dengan arah fiber.
2. Sumbu 2 pada bidang, tegak lurus dengan arah fiber
3. Sumbu 3 tegak lurus dengan bidang dan arah fiber

Arah 1 juga disebut sebagai arah serat (*fiber direction*), arah 2 dan 3 disebut sebagai arah matrix atau arah transversal. Sistem koordinat 1,2,3 ini disebut sebagai sistem koordinat material principal. Tegangan dan regangan pada layer (lamina) akan mengikuti sistem penamaan ini.



Gambar 2.4 Sebuah lamina yang menggambarkan sistem koordinat material (sumber : Voyiadjis dan Kattan, 2005)

Pada tahapan analisa ini, regangan atau tegangan dari serat atau elemen matiks tunggal tidak dipertimbangkan. Kita mengasumsikan gabungan matriks dan serat digantikan oleh sebuah material tunggal yang homogen, sehingga material tunggal baru ini tidak memiliki sifat yang tidak sama di semua koordinat 1,2, dan 3. Material dengan sifat seperti ini biasa disebut sebagai material *orthotropic*. Sehingga, layer (lamina) ini dipertimbangkan sebagai *orthotropic*.

Hubungan tegangan dan regangan material *orthotropic* dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Dalam persamaan di atas, E_1 , E_2 , dan E_3 adalah modulus elastisitas secara berurutan pada arah 1, 2, dan 3. Juga ν_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) adalah Poisson's ratios yang berbeda – beda, sedangkan G_{12} , G_{23} , dan G_{13} adalah tiga modulus geser.

Persamaan (2.1) dapat dituliskan dalam bentuk sederhana sebagai berikut:

$$\{\varepsilon\} = [S] \{\sigma\} \quad (2.2)$$

Perlu diingat bahwa masing – masing konstanta material dalam persaman (2.1) di atas tidak semuanya independen, melainkan memiliki keterkaitan sebagaimana

persamaan (2.3). Persamaan ini yang kemudian dikenal sebagai hubungan resiprositas (*reciprocity relations*).

$$\begin{aligned}\frac{\nu_{12}}{E_1} &= \frac{\nu_{21}}{E_2} \\ \frac{\nu_{13}}{E_1} &= \frac{\nu_{31}}{E_3} \\ \frac{\nu_{23}}{E_2} &= \frac{\nu_{32}}{E_3}\end{aligned}\quad (2.3)$$

Sebuah material disebut transversely isotropic jika perilakunya pada arah 2 identik dengan arah 3. Untuk kasus ini berlaku $E_2 = E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13}$, dan $G_{12} = G_{13}$. Sehingga sekarang kita memiliki hubungan sebagai berikut:

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})}\quad (2.4)$$

Sebuah material disebut isotropic perilakunya sama di semua arah 1, 2, dan 3. Pada kasus ini, $E_1 = E_2 = E_3 = E$, $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13} = \nu$, and $G_{12} = G_{23} = G_{13} = G$. Sehingga, kita memiliki persamaan sebagai berikut:

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

Terakhir, kita memiliki material anisotropic, yang mana material ini memiliki nilai tidak nol pada bagian kanan atas dan kiri bawah dalam matriks kekakuan (2.1).

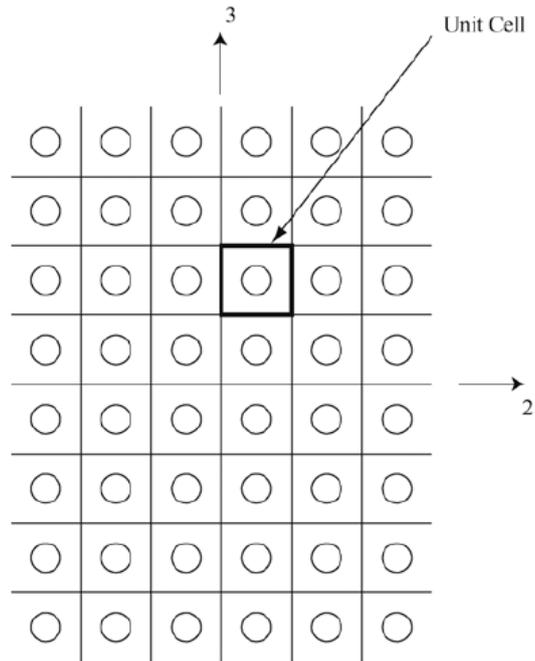
2.4.2 Konstanta elastis berdasarkan Mikromekanik

Secara mikro, sebuah fiberglass diperimbangkan sebagai gabungan dari beberapa unit sel dalam bentuk paket *array* persegi atau heksagonal. Rasio luas penampang dari fiber terhadap luas penampang unit sel disebut *fiber volume fraction* dan disimbolkan V^f . Volume fraksi serat memenuhi hubungan $0 < V^f < 1$ dan biasanya bernilai 0.5 atau lebih besar. Sama seperti serat, *matrix volume fraction* V^m , adalah rasio dari luas penampang matriks terhadap luas penampang unit sel. V^m juga memenuhi hubungan $0 < V^f < 1$. Kedua konstanta tersebut dapat dituliskan dalam hubungan sebagai berikut:

$$V^f + V^m = 1\quad (2.6)$$

Untuk modulus Young pada arah 1 (juga disebut sebagai kekakuan arah memanjang), kita memiliki hubungan berikut :

$$E_1 = E_1^f V^f + E^m V^m\quad (2.7)$$



Gambar 2.5 Sebuah unit sel dalam paket *array* persegi dari material *fiber reinforced composite*

Dimana E_1^f adalah modulus Young dari fiber pada arah 1, sementara E^m adalah modulus Young's dari matrix. Untuk Poisson's ratio ν_{12} , kita memiliki hubungan berikut :

$$\nu_{12} = \nu^f V^f + \nu^m V^m \quad (2.8)$$

Dimana ν^f dan ν^m adalah Poisson's rasio berturut – turut untuk fiber dan matrix.

Untuk modulus Young pada arah 2 (juga disebut kekakuan transversal), kita memiliki hubungan berikut :

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\eta^f V^f}{E_2^f} + \frac{\eta^m V^m}{E^m} \quad (2.9)$$

Dimana E_2^f adalah modulus Young dari fiber pada arah 2, sementara E^m adalah modulus Young's dari matrix, dimana faktor η^f dan η^m diberikan oleh :

$$\eta^f = \frac{E_1^f V^f + [(1 - \nu^f \nu_{12}^f) E^m + \nu^m \nu_{21}^f E_1^f] V^m}{E_1^f V^f + E^m V^m} \quad (2.10)$$

$$\eta^m = \frac{[(1 - \nu^m) E_1^f - (1 - \nu^m \nu_{12}^f) E^m] V^f + E^m V^m}{E_1^f V^f + E^m V^m}$$

Untuk modulus geser G_{12} , kita memiliki hubungan berikut :

$$G_{12} = G^m \left[\frac{(G^m + G_{12}^f) - V^f (G^m - G_{12}^f)}{(G^m + G_{12}^f) + V^f (G^m - G_{12}^f)} \right] \quad (2.11)$$

Dimana G_{12}^f dan G^m adalah modulus geser dari fiber dan matrix.

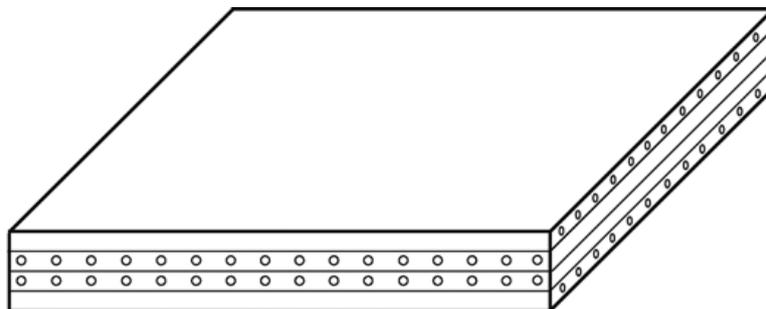
2.4.3 Tegangan bidang (*plane stress*)

Dalam analisa material komposit fiber, asumsi *plane stress* biasanya digunakan untuk masing – masing lapis (lamina). Ini karena material FRP biasanya hanya memiliki satu karakteristik pada satu bidang dari pada dua bidang yang lain. Pada kasus ini, komponen tegangan σ_3 , τ_{23} , dan τ_{13} dijadikan nol dengan asumsi bahwa bidang 1-2 sistem koordinat utama material adalah pada bidang layer (lamina). Karena itu, persamaan (2.1) menjadi seperti berikut:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

2.4.4 Analisa lamina

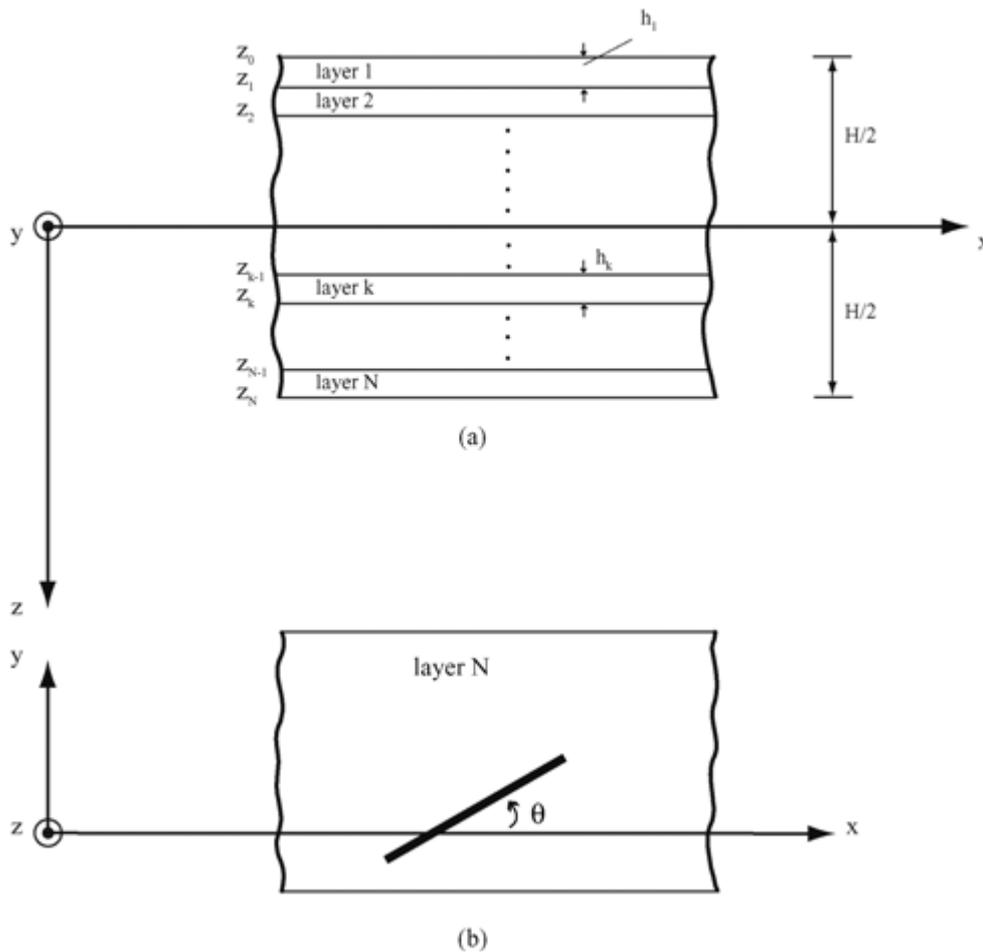
Material FRP biasanya terdiri dari beberapa lapisan bahan untuk membentuk sebuah laminasi. Setiap lapisan berupa lembaran tipis dan mungkin memiliki serat orientasi yang berbeda (lihat Gambar 2.6). Dua laminasi mungkin memiliki jumlah lapis yang sama dan sudut serat yang sama tetapi dua laminasi mungkin berbeda karena susunan lapisannya.



Gambar 2.6 Skema ilustrasi dari laminasi dengan empat lapisan

Gambar 2.7 menunjukkan sistem koordinat Cartesian global yang dan laminasi umum yang terdiri dari N lapisan. Ketebalan laminasi dilambangkan dengan H dan

ketebalan lapisan individual dengan h . Tidak semua lapisan tentu memiliki ketebalan yang sama, sehingga ketebalan lapisan ke- k dilambangkan dengan h_k .



Gambar 2.7 Skema ilustrasi yang menunjukkan gambar penampang dan bidang

Koordinat yang melewati sumbu ketebalan asli, z , terletak di tengah. Garis midplane ini mungkin ada pada lapisan tertentu atau pada pertemuan antarlapisan. Kita menganggap sumbu $+z$ mengarah ke bawah dan laminasi menjalar ke arah z dari $-H/2$ sampai $+H/2$. Kita menganggap lapisan di lokasi yang paling negatif sebagai layer 1, lapisan berikutnya sebagai layer 2, layer di sebarang lokasi sebagai lapisan k , dan lapisan pada posisi z yang paling positif sebagai lapisan N . Lokasi dari pertemuan lapisan dilambangkan oleh z subscript, lapisan pertama dibatasi oleh lokasi z_0 dan z_1 , lapisan kedua dengan z_1 dan z_2 , dan lapisan ke- k dibatasi oleh z_{k-1} dan z_k , dan lapisan ke- N oleh z_{N-1} dan z_N (Hyer, 1998).

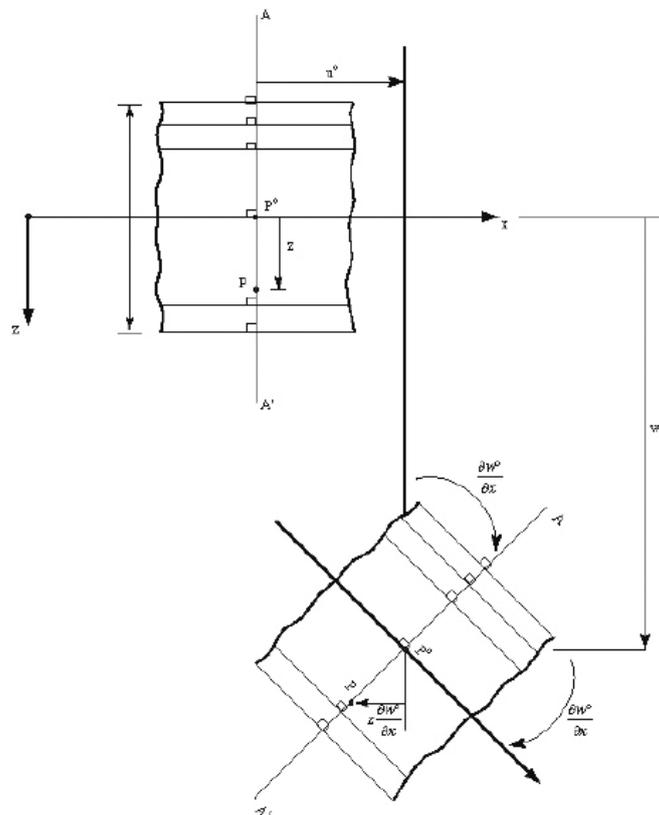
Gambar 2.8 menunjukkan secara rinci deformasi penampang, dan khususnya perpindahan titik P , titik yang terletak pada sebarang jarak z di bawah titik P^0 , titik pada

permukaan referensi, dengan poin P dan P^0 berada di garis AA' . *Superscript 0* ada untuk menunjukkan kinematika dari titik P^0 pada permukaan referensi. Perpindahan horizontal titik P^0 dalam arah x dilambangkan u^0 . Perpindahan vertikal dilambangkan dengan w^0 . Rotasi permukaan referensi terhadap sumbu y pada titik P^0 adalah $\partial w^0/\partial x$. Bagian penting dari hipotesis Kirchhoff adalah asumsi bahwa garis AA' tetap tegak lurus permukaan referensi. Karena itu, rotasi garis AA' adalah sama dengan rotasi permukaan referensi, dan dengan demikian rotasi garis AA' , seperti yang dilihat pada bidang x - z , adalah $\partial w^0/\partial x$. Hal ini diasumsikan bahwa :

$$\frac{\partial w^0}{\partial x} < 1 \quad (2.13)$$

Dengan kurang dari 1, ini berarti bahwa sinus dan tangen dari sudut rotasi digantikan oleh rotasi sendiri, dan cosinus dari sudut rotasi digantikan oleh 1. Dengan pendekatan ini, maka, rotasi titik P^0 menyebabkan titik P bertranslasi horizontal pada arah minus x dengan nilai yang sama dengan:

$$z = \frac{\partial w^0}{\partial x} \quad (2.14)$$



Gambar 2.8 Skema ilustrasi menunjukkan kinematika deformasi laminasi

Dengan demikian, translasi horizontal dari titik P dengan koordinat (x, y, z) pada arah sumbu x adalah:

$$u(x, y, z) = u^0(x, y) - z \frac{\partial w^0(x, y)}{\partial x} \quad (2.15)$$

Juga, translasi vertical dari titik P pada arah sumbu z diberikan oleh :

$$w(x, y, z) = w^0(x, y) \quad (2.16)$$

Translasi horizontal dari titik P pada arah sumbu y, sama seperti pada arah sumbu x, diberikan oleh :

$$v(x, y, z) = v^0(x, y) - z \frac{\partial w^0(x, y)}{\partial y} \quad (2.17)$$

Dengan menggunakan hubungan regangan-perpindahan dari teori elastisitas, dan persamaan (2.15), (2.16), dan (2.17) kita bisa menghitung regangan pada titik manapun di dalam laminasi, dan dengan menggunakan regangan laminasi ini dalam hubungan tegangan – regangan, kita bisa menghitung tegangan pada titik manapun dalam laminasi.

Dari hubungan regangan – perpindahan dan (2.15), regangan pada arah x, ε_x , diberikan oleh :

$$\varepsilon_x(x, y, z) \equiv \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial x} = \frac{\partial u^0(x, y)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^0(x, y)}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

Persamaan (2.18) dapat ditulis ulang sebagai berikut :

$$\varepsilon_x(x, y, z) = \varepsilon_x^0(x, y) + z \kappa_x^0(x, y) \quad (2.19)$$

Nilai dari ε_x^0 mengacu pada regangan dari permukaan referensi pada arah x, dan κ_x^0 mengacu pada regangan akibat *curvature* dari permukaan referensi, pada arah x.

Komponen regangan untuk lima yang lain adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_y(x, y, z) \equiv \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial y} = \varepsilon_y^0(x, y) + z \kappa_y^0(x, y) \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_z(x, y, z) \equiv \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial w^0(x, y, z)}{\partial z} = 0 \quad (2.21)$$

$$\gamma_{yz}(x, y, z) \equiv \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial w^0(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial v^0(x, y, z)}{\partial z} = 0 \quad (2.22)$$

$$\gamma_{xz}(x, y, z) \equiv \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial w^0(x, y, z)}{\partial x} - \frac{\partial u^0(x, y, z)}{\partial z} = 0 \quad (2.23)$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z) \equiv \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} = \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy}^0 \quad (2.24)$$

2.4.5 Tekuk pada Sandwich

Analisa standar dari stabilitas sandwich dengan ujung sendi yang dibebani secara merata, mengindikasikan bahwa panel tidak stabil ketika beban aksial sama dengan beban Euler, P_E , dimana :

$$P_E = \frac{\pi^2 D}{L^2} \quad (2.25)$$

Pada pernyataan ini, D adalah kekakuan lentur. P_E mewakili beban terkecil pada saat panel tidak akan kembali ke kondisi lurus setelah diberikan beberapa perpindahan lateral.

Pada kasus ini, dimungkinkan untuk deformasi geser terjadi pada *core*. Ini tentu mengurangi kekakuan dari panel sandwich dan beban kritisnya menjadi kurang dari beban Euler sebagaimana persamaan (2.25). Dengan mempertimbangkan sebuah sandwich dengan *core antiplane* dan kulit yang tipis, kekakuan lentur local dapat diabaikan. Kekakuan lentur sistem, dengan demikian, menjadi:

$$D = E_f b t d^2 / 2 \quad (2.26)$$

Dengan E_f adalah elastisitas skin, b adalah lebar panel, t adalah tebal skin, dan d adalah jarak pusat ke pusat dari dua skin panel.

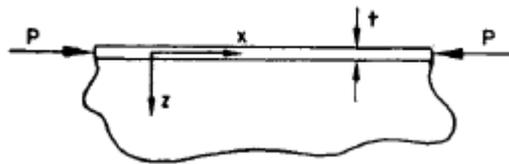
2.4.6 Kerutan dan ketidakstabilan lokal akibat tekan

Kompresi permukaan pada sandwich yang terkadang berperilaku tertentu sebagai bentuk dari ketidakstabilan dapat tepat dideskripsikan sebagai riakan atau kerutan, di mana panjang gelombang dari lekukan adalah sama dengan ketebalan core. Perhatikan, misalnya, sebuah pin-ended sandwich strut. Teori tekuk biasa menunjukkan bahwa beban kritis terendah sesuai dengan bentuk melengkung, di mana setengah panjang gelombang sama dengan panjang strut tersebut. Dalam keadaan yang cocok, bagaimanapun, gelombang pendek kerutan pada bagian permukaan dapat terjadi pada beban yang lebih rendah. Sebuah teori khusus diperlukan untuk memprediksi perilaku ini, dan analisa selanjutnya berdasarkan pada karya asli dari Gough, Elam and De Bruyne yang kemudian dilanjutkan oleh Hoff dan Mautner dan lainnya.

Teori dasar kerutan hanya memperhatikan lentur lokal pada permukaan sandwich; efek dari tarikan membran pada permukaan sama sekali diabaikan. Untuk alasan ini sangatlah berbeda dari teori tekuk biasa, yang terutama berkaitan dengan tarikan membran pada permukaan karena keseluruhan lentur dan tekuk sandwich. Hubungan antara teori dasar kerutan dan teori tekuk biasa ditemukan oleh Williams, Leggett dan Hopkins dengan analisis strut terpadu yang mereproduksi interaksi antara efek kerutan dan ketidakstabilan keseluruhan. Hasil karya dari penulis-penulis ini (yang akan disebut kemudian dalam bab ini) kemudian dikonfirmasi oleh Goodier pada sebuah studi menyeluruh dari masalah yang sama.

2.4.6.1 Long Strut yang Ditopang oleh Medium Isotropik Berkelanjutan

Mudah untuk memulai dengan masalah yang sangat sederhana dari sebuah long strut tak terbatas yang melekat pada medium elastis yang dihubungkan pada satu sisi strut (2.9). Strut dan media memiliki lebar b pada arah y ; b sangat kecil, sehingga sistem berada pada daerah tegangan ($\sigma_y = 0$). Strut berbentuk persegi panjang, dengan ketebalan t , dan merupakan permukaan membran sandwich dengan ketebalan core terbatas.



Gambar 2.9 Skema sederhana *long strut*

Persamaan diferensial dari strut adalah:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} = b \sigma_z \quad (2.27)$$

Di mana D adalah kekakuan lentur strut, P adalah dorongan aksial pada strut, w adalah perpindahan pada arah z dan σ_z adalah kesesuaian tegangan normal antara strut dan permukaan dari media pendukung (σ_z positif ketika tarik).

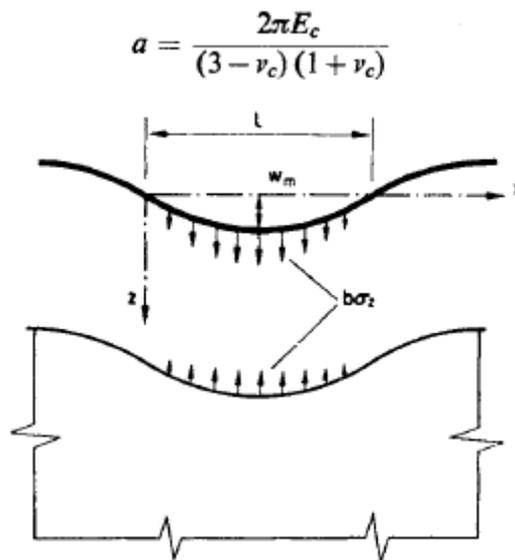
Misalkan bahwa strut mengembang menjadi gelombang sinusoidal dengan setengah panjang gelombang, seperti:

$$w = w_m \sin \frac{\pi x}{l} \quad (2.28)$$

Permukaan medium pendukung harus membagi perpindahan ini (diberikan permukaan tipis) dan akan ditunjukkan bahwa tegangan σ_z , yang dibutuhkan untuk mendeformasi media dalam perilaku ini dapat ditulis

$$\sigma_z = -\frac{a}{l} w_m \sin \frac{\pi x}{l} \quad (2.29)$$

Di mana



Gambar 2.10 Gaya tarik $b\sigma_z$ per satuan panjang antara strut dan medium pendukung elastis

dan E_c , ν_c adalah modulus elastisitas dan Poisson's ratio untuk core. Untuk setengah panjang gelombang l yang diberikan, tegangan σ_z sebanding dengan perpindahan w pada titik x (2.10).

Pergantian untuk w dan σ_z dari persamaan (2.28) dan (2.29) pada (2.27) menghasilkan ekspresi di mana $(w_m b \sin \pi x/l)$ dibatalkan, menghasilkan:

$$D \frac{\pi^4}{l^4} - P \frac{\pi^2}{l^2} = -\frac{a}{l} \quad (2.30)$$

Persamaan ini mendefinisikan nilai kritis dari P yang harus ada untuk mempertahankan strut dalam kondisi tekuk. Sehingga dapat ditulis

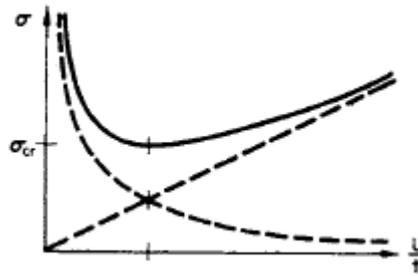
$$D = \frac{E_f t^3}{12}, P = \sigma b t, \quad (2.31)$$

Di mana E_f adalah modulus elastisitas strut dan σ adalah *tekanan* tegangan kritis pada permukaan. Persamaan (2.30) dapat ditulis ulang sebagai

$$\sigma = \frac{\pi^2 E_f}{12} \left(\frac{l}{t}\right)^2 + \frac{a}{\pi^2} \left(\frac{l}{t}\right) \quad (2.32)$$

Tegangan kritis merupakan fungsi dari l/t , seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.11. Mudah untuk ditunjukkan, dengan persamaan

$$\frac{d\sigma}{d(l/t)} = 0,$$



Gambar 2.11 Variasi khas tegangan kritis dengan l/t (persamaan (2.32)). Garis putus-putus menggambarkan dua istilah di sisi kanan persamaan (2.32).

Bahwa tegangan kritis minimum dan setengah panjang gelombang di mana itu terjadi diberikan:

$$\sigma_{cr} = B_1 E_f^{\frac{1}{3}} E_c^{\frac{2}{3}} \quad \text{where} \quad B_1 = 3[12(3 - \nu_c)^2 (1 + \nu_c)^2]^{-\frac{1}{3}}, \quad (2.33)$$

$$\left(\frac{l}{t}\right)_{cr} = C \left(\frac{E_f}{E_c}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{where} \quad C = \pi [(3 - \nu_c)(1 + \nu_c)/12]^{\frac{1}{3}}$$

$$\sigma_{cr} = B_1 E_f^{\frac{1}{3}} E_c^{\frac{2}{3}} \quad \text{dimana} \quad B_1 = 3[12(3 - \nu_c)^2 (1 + \nu_c)^2]^{-\frac{1}{3}} \quad (2.34)$$

$$\left(\frac{l}{t}\right)_{cr} = C \left(\frac{E_f}{E_c}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{dimana} \quad C = \pi [(3 - \nu_c)(1 + \nu_c)/12]^{\frac{1}{3}}$$

Beberapa nilai dari konstanta B_1 , C ditunjukkan pada Tabel 2.2 yang menunjukkan bahwa nilai-nilai tersebut hanya sedikit dipengaruhi oleh variasi Poisson's ratio dari media pendukung.

Tabel 2.2 Konstanta B dan C

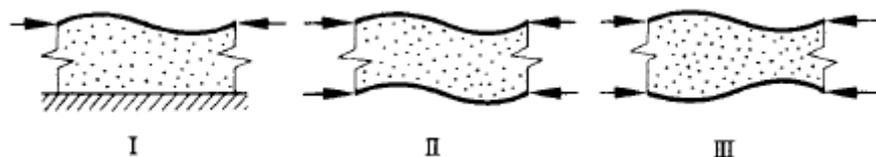
ν_c	B_1	C
0	0.630	1.98
0.25	0.575	2.07
0.30	0.570	2.09
0.5	0.545	2.13

Tegangan-tegangan pada core yang berkaitan dengan gangguan sinusoidal pada permukaan ($z = 0$) secara bertahap akan hancur seiring bertambahnya nilai z ; pada nilai z yang cukup besar tegangan-tegangan tersebut dapat diabaikan. Akibatnya, tekanan permukaan pada balok sandwich maupun permukaan strut sandwich dapat diidealisasi seperti Gambar 2.9 yang memberikan kedalaman core yang cukup besar untuk memungkinkan efek gangguan di salah satu penghubung sebelum dapat tersambung dengan penghubung lain. Oleh karena itu, persamaan (2.33) dapat dijadikan sebagai ukuran tegangan permukaan di mana terjadi kerutan, membuat core menjadi tebal.

Jika bagian core tidak tebal, ada beberapa interaksi antar permukaan yang menghadap sisi berlawanan pada core dan persamaan (2.33 dan 2.34) dapat dimodifikasi sampai batas tertentu. Modifikasi yang muncul dalam berbagai keadaan dibahas secara lebih dalam pada Allen (1965).

2.4.6.2 Kerutan pada Permukaan Sandwich dengan Core Isotropik dengan Ketebalan Terbatas

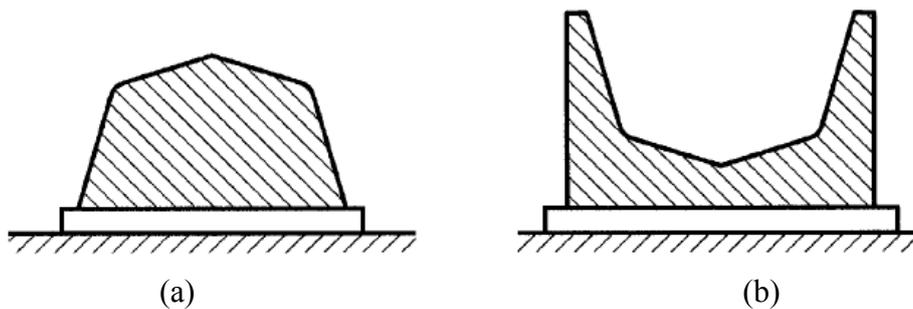
Tiga kasus utama yang menarik diilustrasikan pada Gambar 2.12. Kasus I menunjukkan sebuah balok sandwich di mana kerutan dapat terjadi hanya pada permukaan tekan; permukaan tarik diasumsikan benar-benar datar. Kasus II dan III secara berurutan menunjukkan kerutan anti simetris dan simetris pada strut sandwich di mana dua permukaan tersebut membawa gaya aksial P yang sama besar.

**Gambar 2.12** Tipe-tipe kasus pada ketidakstabilan kerutan.

2.5 Metode pabrikan fiberglass menggunakan Proses cetakan terbuka

Metode ini menggunakan hanya satu sisi permukaan cetakan, baik positif (*male plug*) maupun negatif (*female cavity*). Karena hanya menggunakan satu sisi, proses ini membutuhkan biaya yang lebih murah dibandingkan dengan proses *closed mold*. Keuntungan lain adalah struktur yang sangat kompleks dan besar memungkinkan untuk diproduksi dalam proses cetakan terbuka, yang akan sangat sulit jika menggunakan proses cetakan tertutup. Selain itu tersedia berbagai material (logam, plester, kayu, FRP) untuk proses cetakan terbuka yang lebih murah.

Kekurangan metode ini adalah bahwa hanya ada satu permukaan saja yang finished dan halus. Dibandingkan dengan metode lain, periode *curing* yang dibutuhkan untuk proses cetakan terbuka ini cenderung lebih lama. Secara normal, penggunaan panas akan mengurangi durasi *curing*. Namun, untuk ukuran yang besar, penggunaan panas sulit dilakukan.



Gambar 2.13 Tipe cetakan terbuka (a) positive (b) negative

(sumber : Groover, 1996)

Proses cetakan terbuka biasanya diklasifikasikan berdasarkan metode bagaimana resin dan *reinforcement* diaplikasikan pada cetakan. Jika matriks dan *reinforcement* diaplikasikan dengan tangan, maka ini disebut sebagai *hand lay-up*, jika digunakan *spray gun*, maka ini disebut *spray-up*. Jika proses *curing* melibatkan *bag*, maka ini disebut *bag moulding*. Jika digunakan *autoclave*, maka itu disebut *autoclave moulding*. Untuk mengkombinasikan keunggulan dari masing-masing metode – metode tersebut, biasanya dua atau lebih gabungan metode digunakan.

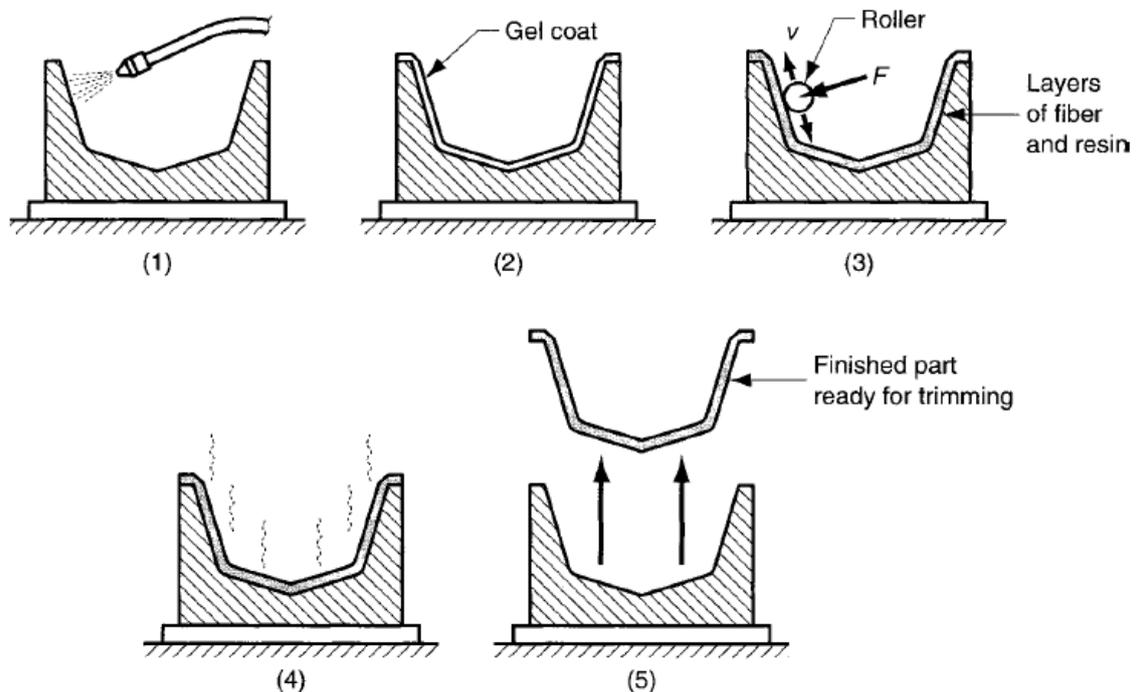
2.5.1 Proses Wet lay – up

2.5.1.1 *Hand lay – up*

Metode ini merupakan metode paling tua dalam proses produksi fiberglass. Secara umum ada 5 prosedur, diantaranya : *cleaning*, *gel coating*, *laying up*, *curing*,

part removal. Lima prosedur ini yang juga dibutuhkan untuk proses cetakan terbuka lain. Yang membedakan antara setiap proses cetakan terbuka yang satu dengan yang lain adalah pada prosedur ketiga (*laying up*) dan keempat (*curing*).

Langkah pertama dari proses *hand lay-up* adalah membersihkan permukaan cetakan, diikuti dengan penerapan *release agent* untuk mempermudah melepas produk dari cetakan. Pada langkah kedua, *gel coating tipis* akan diterapkan pada permukaan luar dari cetakan, jika kualitas permukaan produk menjadi pertimbangan penting. Resin *gel coat* biasanya berpigmen (untuk memberi warna pada permukaan), dan aplikasikan pada cetakan dengan menggunakan *spray gun*.



Gambar 2.14 Prosedur *Hand lay-up*: (1) cetakan dibersihkan dan dilapisi dengan *mold release agent* ; (2) lapisan tipis *gel coat* (resin, kemungkinan berpigmen untuk memberi warna) diaplikasikan, yang akan menjadi permukaan luar produk; (3) ketika *gel coat* telah sebagian *setting*, lapisan-lapisan resin dan serat dapat diberikan, serat biasanya dalam bentuk *mat* atau *cloth*; setiap lapisan dirol untuk sepenuhnya membuat serat terisi oleh resin dan menghilangkan gelembung udara; (4) produk di-*curing*; dan (5) produk yang sepenuhnya mengeras dilepas dari cetakan. (sumber : Groover, 1996).

Ada beberapa material yang digunakan di dalam produksi cetakan untuk proses hand lay-up, seperti metal, GFRP, atau plaster. Faktor yang mempengaruhi pemilihan material cetakan adalah jumlah produk yang akan dibuat, kualitas permukaan dari produk yang dibutuhkan, juga beberapa faktor teknis dan faktor ekonomis lainnya.

Jika hanya satu produk yang akan diproduksi, (misalnya untuk *prototype*), maka cetakan dapat dibuat dari *plaster of paris*. Untuk kuantitas menengah, lebih baik digunakan material GFRP. Untuk tingkat produksi dan ukuran yang tinggi, pilihan terbaik barangkali adalah cetakan logam, karena durabilitasnya. Keuntungan lain dari cetakan logam adalah konduktifitas panasnya yang baik. Konduktifitas yang lebih tinggi akan meningkatkan proses *heating* selama *curing*, atau ini akan membantu disipasi panas dari laminasi komposit selama curing pada suhu ruangan.

Hand lay-up biasanya sesuai untuk komponen yang sangat besar, namun untuk kuantitas produksi yang lebih kecil. Ada beberapa keuntungan dalam volume produksi yang rendah, seperti misalnya fleksibilitas dalam desain cetakan, penggunaan material cetakan yang lebih murah, ukuran cetakan yang hampir tanpa batas, biaya yang lebih rendah untuk peralatan penunjang lain. Metode ini juga memberikan kemudahan dalam perbaikan bagian yang rusak, tidak sempurna, atau cacat produksi selama periode awal proses produksi. Karena adanya kemungkinan perubahan desain ekonomis, hand lay-up juga cocok untuk pekerjaan yang kompleks.

Dewasa ini, *hand lay-up* secara ekstensif digunakan dalam proses produksi lambung kapal *boat*, tangki kontainer besar, perlengkapan panggung, kolam renang, dan juga berbagai pelat dan panel structural. Hand lay-up juga digunakan untuk beberapa bagian – bagian mesin. Namun, ini tidak ekonomis karena tingkat produksinya yang rendah.

2.5.1.2 Otomasi dalam proses *lay – up*

Cara terbaik untuk mengotomasi proses *hand lay – up* adalah dengan mengakselerasi proses laminasi pada langkah ketiga. Karena itu, para produsen peralatan telah mengembangkan *automated tape laying machines* untuk keperluan ini.

Automated tape-laying machines menggunakan beberapa rol *chopped strands*, *woven roving*, *yarn* atau *prepreg tape*. Pertama – tama, beberapa bentuk fiber ini dipasang pada *machine*, kemudian mereka disalurkan menuju resin yang telah diberi

katalis untuk pembasahan fiber (*fiber wetting*), kemudian fiber basah ini melewati beberapa roler. Celah antara roler disesuaikan dengan ketebalan laminasi yang dibutuhkan. Celah ini penting untuk menentukan jumlah resin yang diinginkan, dan ketika material melewati roler, kelebihan resin juga turut dihilangkan. Kemudian material ini diposisikan pada cetakan seketika setelah meninggalkan mesin.

Setiap laminasi ditempatkan dengan metode *back and forth* pada permukaan cetakan sampai semua lapisan selesai. Ada beberapa factor yang mempengaruhi tingkat kinerja *automated tape-laying machines*, meliputi ketebalan laminasi yang diinginkan, kerenggangan dan kerapatan fiber, dan juga jenis resin yang digunakan dalam proses ini.

Automated tape-laying machines ini efisien untuk mengontrol *matrix resin/reinforcement fiber content* berdasarkan rasio fiber/resin yang diinginkan. Karena itu, kualitas produk dan konsistensi dari metode ini jauh lebih baik dari pada *manual hand layup*.

Automated tape-laying machines tersedia dalam berbagai ukuran, dari model kecil portabel sampai model sangat besar yang digunakan untuk lambung kapal. Mesin ini mampu bergerak kesegala arah, rotasi penuh, dan *vertical telescoping*. *Vertical telescoping* adalah dimana bagian tubular atau bagian yang saling berhadapan (*colliding part*) dari mesin menekan atau mendorong bersama sama sehingga satu *slide* dengan yang lain seperti bagian dari sebuah *folding telescope*. Mesin ini telah banyak dikembangkan oleh industry pesawat terbang untuk mengurangi biaya pekerja dan juga untuk mencapai kualitas terbaik dan keseragaman dalam pabrikasi komponen. Satu – satunya kekurangan dari mesin CNC ini adalah bahwa ini harus diprogram, yang mana sangat menyita waktu.

Automated tape-laying machines didesain khusus untuk geometris komponen yang besar dan sederhana. Lingkup penerapan yang paling banyak adalah pada pabrikasi komponen pesawat terbang.

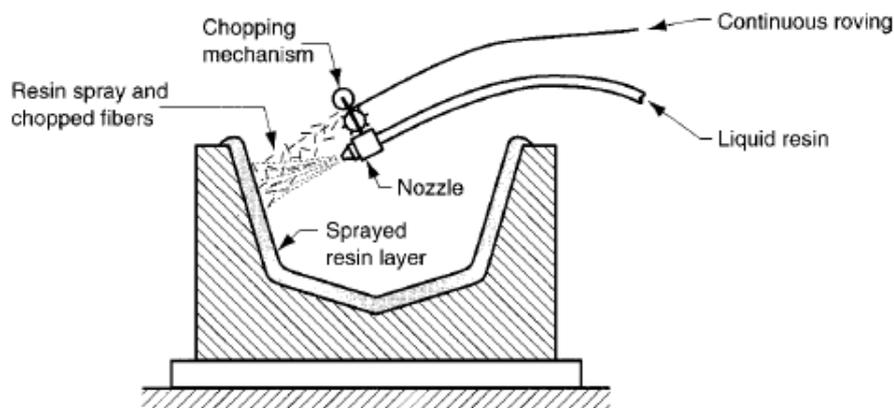
2.5.1.3 *Spray-up*

Spray –up adalah alternative lain dari langkah ketiga untuk proses *open mould wet lay-up*. Metode ini membantu untuk mengotomasi pengaplikasian lapisan matriks

resin dan *reinforcement* fiber, sehingga mengurangi waktu produksi pada prosedur *hand lay-up* manual.

Di dalam metode ini, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.15, fiber tipe *chopped*, bersama dengan cairan matrix resin, disebarkan (*sprayed*) pada permukaan cetakan terbuka, sampai ketebalan laminasi komposit yang diinginkan dicapai. *Spray up* juga terkadang digunakan untuk mengaplikasikan *gel coat* pada permukaan cetakan sebelum proses *hand lay – up* dan *spray – up*.

Perlengkapan yang dibutuhkan pada metode ini diantaranya : sebuah *spray gun*, a *glass fibre chopper attachment*, dan sistem perpompaan. *Chopper attachment* menyediakan *roving* terusan dan memotongnya menjadi fiber pendek-pendek. Secara umum, *chopped fiber* memiliki panjang antara 25 – 75 mm dan mereka ditambahkan pada aliran matriks resin seketika keluar dari *spray gun nozzle*. Jenis penyampuran seperti ini menghasilkan orientasi fiber acak pada lapisan komposit, yang mana pada proses *hand lay up* mungkin orientasi fiber mengikuti arah penerapan rol.



Gambar 2.15 Metode *Spray – up* (sumber : Groover, 1996)

Dalam *Plastic handbook* (1994), dikatakan bahwa industri manufacturing komposit menggunakan 4 tipe *spray gun*, diantaranya (1) *internal mix with air*, (2) *airless internal mix*, (3) *external mix with air*, dan (4) *airless external mix*.

- a) *Airless Internal Mix* : Pada tipe *spray gun* ini, matriks resin dan katalis pertama – tama mengalir pada dua aliran yang berbeda, yang akhirnya menuju pada sebuah tampungan tunggal di dalam kepala *gun*. Kemudian, resin dan katalis dicampur dan diaduk dalam wadah tersebut, kemudian disebarkan (*sprayed*) bersama melalui *gun nozzle*.

- b) *Airless External Mix* : Pada tipe *spray gun* ini, resin dan katalis dicampur dan diaduk di dalam *mid air*, bukan dalam wadah tertutup. Dalam pencampuran eksternal, satu kepala *gun* atau dua kepala *gun* terpisah biasanya digunakan. Oleh karena itu, keuntungan *external mix guns* dari pada *internal mix guns* bahwa ini tidak membutuhkan sistem larutan pembersih (*solvent flushing system*), sehingga pengoperasian lebih sederhana. Larutan pembersih hanya akan dibutuhkan untuk membersihkan peralatan setelah periode manufaktur yang lebih panjang. Namun kelemahannya adalah bahwa ini tidak dapat membuat resin dan katalis tercampur secara sempurna sebagaimana *internal mix method*, sehingga menyebabkan penggunaan katalis kurang efisien dan kelebihan *spray (overspray)*
- c) *Internal and External Mix with Air* : Jika udara diinjeksikan ke dalam aliran atau aliran katalis di dalam *spray gun*, maka pengoperasian *spray* menjadi lebih mudah. Namun, ada beberapa kelemahan dari *internal and external mix with air*, diantaranya kemungkinan *overspray* lebih banyak, gelembung berlebih, udara yang terjebak di dalam laminasi lebih banyak, meningkatkan porositas, dan lain-lain.

Setelah pengaplikasian campuran resin terkatalisasi dan *chopped fiber* melalui *spray gun* menuju permukaan cetakan terbuka, penerapan rol (*rolling*) dibutuhkan untuk memadatkan (*compacting*) laminasi sebagaimana proses *hand lay-up*. Para produsen menggunakan *roller* tangan atau sistem *rolling* otomatis. Biasanya *rolling* tangan mencukupi untuk komponen – komponen berukuran kecil, sementara sistem *rolling* otomatis lebih dipilih untuk komponen berukuran lebih besar dengan permukaan datar.

Spray up digunakan dalam proses manufaktur beragam komponen, meliputi : lambung kapal, *shower stall*, *bathtubs*, bagian *body* otomotif, tangki, container, panel structural, furniture dan lain-lain. Komponen – komponen ini juga diproduksi menggunakan metode *hand lay up*.

Perbedaan antara *spray – up* dan *hand lay up* adalah kekuatan produk yang diproduksi menggunakan metode – metode tersebut. Pada *spray up*, serat kecil berorientasi secara acak, sementara pada *hand lay up*, serat kemungkinan menerus dan menuju satu arah, yang mana akan menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi. Komposisi

fiber di dalam spray up dibatasi sekitar 30% - 35%, sementara pada *hand lay up*, komposisi ini bisa mencapai 65% - 70%.

Namun ada beberapa keuntungan dari metode *spray up* method dibandingkan *hand lay up method*. Pertama, spray up lebih cepat dan rendah pekerja dari pada *hand lay up*. Kedua, cetakan sederhana dan lebih murah biasanya dipakai. Bahkan, manufaktur di tempat (*on - site manufacturing*) mungkin untuk dilakukan menggunakan peralatan *spray up* portabel karena perlengkapan ini tersedia di pasaran. Oleh karena itu, *spray up* mungkin dipertimbangkan sebagai metode pabrikasi komposit paling mudah beradaptasi (*the most versatile method*) dibanding metode lain.

2.5.1.4 Otomatisasi dalam *spray up*

Dalam proses *spray-up*, penyemprotan ke permukaan cetakan terbuka umumnya dilakukan manual oleh operator yang menggunakan pistol semprot portabel genggam. Jenis penyemprotan ini harus dilakukan oleh seorang pekerja yang kompeten untuk mengoperasikan dan memelihara peralatan, dan juga untuk menghasilkan laminasi yang tepat untuk komponen yang sedang diproduksi. Oleh karena itu, karena ketergantungan kualitas dan konsistensi dari laminasi pada keterampilan operator, komponen yang diproduksi dengan cara ini akan bervariasi dalam berat dan kualitas.

Otomatisasi dalam *spray-up* akan mencegah pengaruh-pengaruh negatif pada komponen yang diproduksi. Otomatisasi atau mekanisasi dalam *spray-up* dicapai dengan menggunakan mesin yang terkomputerisasi di mana jalur pistol semprot diprogram dan dikendalikan. Dalam metode ini, pistol semprot melekat pada mesin operator - control atau dioperasikan oleh robot. Oleh karena itu, otomatisasi dalam proses *spray-up* mengurangi tenaga kerja dan menghasilkan konsistensi dan kualitas yang jauh lebih baik dibandingkan dengan penyemprotan manual.

Otomasi juga membuat proses *spray-up* menjadi lebih ramah lingkungan. Namun, jika peralatan *spray-up* tidak memadai, atau dioperasikan oleh personel non-kompeten, maka tempat kerja akan lebih berasap. Gas dan emisi yang mudah menguap lainnya dari resin cair sangat berbahaya bagi kesehatan. Oleh karena itu, menggunakan peralatan otomatis, tanpa seorang pekerja, akan sangat menguntungkan.

2.5.2 *Bag Moulding* dan Proses Perawatan (*Curing*)

Tujuan dari proses *bag moulding* pada teknik *wet lay-up* adalah untuk mengompakkan laminasi pada permukaan cetakan terbuka. Fungsi lainnya adalah untuk mengeluarkan volatil dengan menerapkan tekanan kepada resin. Oleh karena itu, di proses *hand lay-up* dan *spray-up*, *bag moulding* dapat digunakan sebagai proses tambahan untuk proses perawatan (*curing*). Seperti diilustrasikan dalam Gambar 2.16 ada dua metode dasar yang digunakan dalam industri: *vacuum bag moulding* dan *pressure bag moulding*.

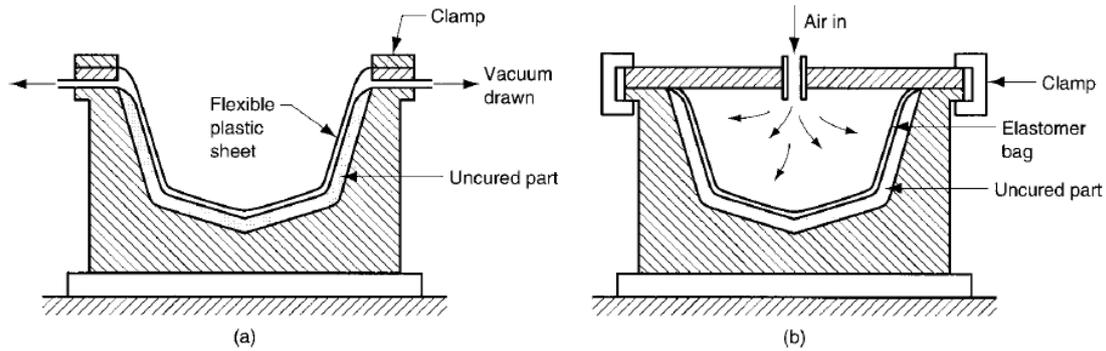
2.5.2.1 *Vacuum bag moulding*

Dalam *vacuum bag moulding*, komponen laminasi yang diproduksi dengan *hand lay-up* atau *spray-up* pada cetakan terbuka ditutupi oleh selebar plastik polimer. Plastik ini harus fleksibel dan tidak melekat ke laminasi: polivinil alkohol atau Nylon biasanya dipilih. Setelah tepi cetakan tertutup dan tersegel (*sealed*), vakum ditarik untuk memberikan tekanan oleh kantong plastic terhadap komponen laminasi selama *curing*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Dibandingkan dengan proses *lay-up* tanpa *bag moulding*, metode vakum menghasilkan produk dengan konten reinforcement dan adhesi yang lebih baik antara lapisan. Untuk mempercepat penyembuhan, Pemanasan dapat diterapkan dalam teknik tas vakum. Dibandingkan dengan tas tekanan molding, keterbatasan metode tas vakum adalah jumlah maksimum Tekanan yang diberikan, yang tidak dapat melebihi 98 (Schwartz, 1997).

2.5.2.2 *Pressure bag moulding*

Perbedaan antara *pressure bag* dan *vacuum bag moulding* adalah jenis tekanan yang diberikan. Dalam metode *vacuum bag*, tekanan diberikan karena vakum ditarik antara kantong plastik dan laminasi. Namun, dalam teknik *pressure bag*, tekanan udara positif diterapkan. Dalam metode ini, tekanan positif diberikan dengan meniupkan udara untuk mengembangkan kantong plastic elastis yang menutupi laminasi pada permukaan cetakan terbuka (Gambar 2.16b). Perbedaan lain adalah besarnya tekanan yang diberikan, yang dapat mencapai~ 300 kPa dalam *pressure bag moulding*, sementara kurang dari 98 kPa pada metode *vacuum bag*.



Gambar 2.16 Prosedur *bag moulding* (a) *vacuum bag moulding* (b) *pressure bag moulding* (sumber : Groover, 1996)

Pressure bag moulding juga diterapkan ketika proses *curing* berlangsung. Untuk mempercepat *curing*, pemanasan eksternal bisa ditambahkan, atau dari pada tekanan udara, uap bertekanan ditiupkan pada *bag*. *Pressure bag moulding* sangat cocok untuk komponen berongga kompleks, yang biasanya membutuhkan *core* dan sisipan.

2.5.2.3 *Curing*

Sebagaimana dinyatakan dalam Bagian 2.5.1, *curing* adalah langkah keempat dalam keseluruhan proses *wet lay-up*, dan diperlukan bagi semua resin matriks *thermosetting* untuk mengeras. Selama *curing*, cairan resin berubah menjadi kaku dan kerask karena pembentukan ruas saling silang dari struktur polimer tersebut.

Waktu, suhu dan tekanan adalah tiga parameter utama yang mempengaruhi derajat ruas silang dalam proses *curing*. Pada resin *thermosetting*, *curing* akan mulai pada suhu ruang, yang mana cenderung agak lambat. Peningkatan suhu akan mengurangi waktu yang diperlukan untuk proses *curing* selesai. Namun, pada proses *wet lay-up* (termasuk *hand lay-up* dan *spray-up*), ukuran cetakan biasanya sangat besar. Oleh karena itu, pemanasan bisa sangat sulit, dan kadang-kadang mungkin diperlukan beberapa hari untuk pengerasan yang cukup sebelum pelepasan produk dari cetakan.

Ada beberapa teknik pemanasan yang digunakan dalam proses *curing*, seperti *oven curing*, *infrared curing*, dan *autoclave curing* (*Engineered Materials Handbook*, 1998 dalam Akovali, 2001). Dalam *curing oven*, panas diterapkan pada suhu terkontrol, dan juga memungkinkan untuk menarik vakum secara parsial dalam beberapa *curing oven*. *Vacuum curing oven* tipikal (perangkat yang menyalurkan panas secara konveksi), biasanya terbuat logam besar, terisolasi panas, oven dengan sirkulasi udara dan dengan pintu besar pada satu atau kedua ujungnya. Ukuran standar tinggi, lebar dan panjang adalah 3 m, lebar 4 m, dan panjang 9 m. Pemanasan inframerah terutama digunakan

ketika laminasi pada cetakan terbuka dengan ukuran sangat besar, dan karena itu sangatlah tidak praktis untuk memanaskan dalam oven.

Pada *autoclave curing*, panas diterapkan dalam wadah tertutup, keduanya dalam suhu dan tekanan terkontrol, dimana keduanya merupakan parameter paling penting terutama pada proses *bag moulding*. *Autoclave* adalah bejana tekan logam berbentuk silinder besar yang diberikan tekanan udara dan/atau CO₂. Bejana ini terisolasi panas, dengan sirkulasi udara panas dan pintu bundar besar di satu atau kedua ujungnya. Ukuran diameter standarnya adalah 4 m dengan panjang 17 m. *Autoclave* secara luas digunakan dalam industri pesawat terbang.

2.5.3 Proses Cetakan Otoklaf (*Autoclave Moulding*)

2.5.3.1 Sistem *cure* otoklaf

Proses cetakan otoklaf digunakan terutama dalam industri pesawat terbang di mana tingkat produksi yang tinggi bukan merupakan pertimbangan penting. Hal ini digunakan terutama untuk pembuatan komponen komposit, selain berbagai aplikasi lain seperti vulkanisasi produk karet.

Sistem *autoclave* adalah sebuah sistem dengan bejana bertekanan di mana reaksi kimia yang kompleks terjadi di dalamnya sesuai dengan jadwal yang ditentukan (siklus *curing/cure cycle*) untuk memproses berbagai bahan. Dengan perkembangan material dan proses, kondisi operasi *autoclave* bisa mencapai 700 ° C dan 15 MPa. Bahan yang diproses di otoklaf diantaranya lem perekat untuk logam, laminasi termoplastik, logam, bahan matriks keramik dan karbon, serta komponen pesawat terbang dan elektronik lain. Pada Gambar 3.5 merupakan ilustrasi dari sistem *autoclave*. Unsur-unsur penting dari sistem *autoclave* adalah:

- a. bejana bertekanan
- b. sumber panas (*heat source*)
- c. kipas untuk menyeragamkan sirkulasi udara di dalam bejana
- d. sistem tekan bejana
- e. sistem untuk mengaplikasikan vakum pada produk yang dilingkupi *vacuum bag*.
- f. sistem untuk mengontrol parameter operasi, dan
- g. sistem untuk memuat cetakan ke dalam *autoclave*.



Gambar 2.17 Sistem otoklaf tipikal

Otoklaf biasanya diberikan tekanan dengan nitrogen atau karbon dioksida dari tangki penyimpanan cairan dan divaporasi sebelum digunakan. Dahulu, otoklaf menggunakan tekanan dari *plant air*, tetapi pengaturan ini membawa resiko kebakaran. Namun, saat ini beberapa perusahaan lebih memilih untuk menggunakan gabungan udara dan nitrogen dalam rasio tertentu untuk alasan ekonomis.

Ketika merancang dan fabrikasi bejana tekan, merupakan sebuah kewajiban untuk mematuhi *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) persyaratan, dan semua bejana diuji berdasarkan kriteria tersebut.

Otoklaf dipanaskan melalui sistem penukar panas dengan pembakar gas atau sistem pemanas elektrik.

Sistem kontrol umumnya dikendalikan komputer, ditambah dengan cadangan sistem manual. Dengan menggunakan sistem komputer kontrol di dalam produksi, siklus curing otoklaf menjadi lebih baik dan pemantauan *curing* secara internal (dan karena itu mencapai siklus optimum) menjadi mungkin.

2.5.3.2 Analisa Proses

Bahan awal untuk proses cetakan otoklaf adalah *prepreg* yang mengandung serat di dalam *partially cured resin*. Biasanya, *prepreg* mengandung resin sekitar 42% berat. Jika *prepreg* ini di-*curing* tanpa kehilangan resin sama sekali, laminasi yang telah *cured* akan mengandung sekitar 50% volume serat. Karena hampir 10 persen berat resin mengalir keluar selama proses pencetakan, konten serat sebenarnya dalam *cured*

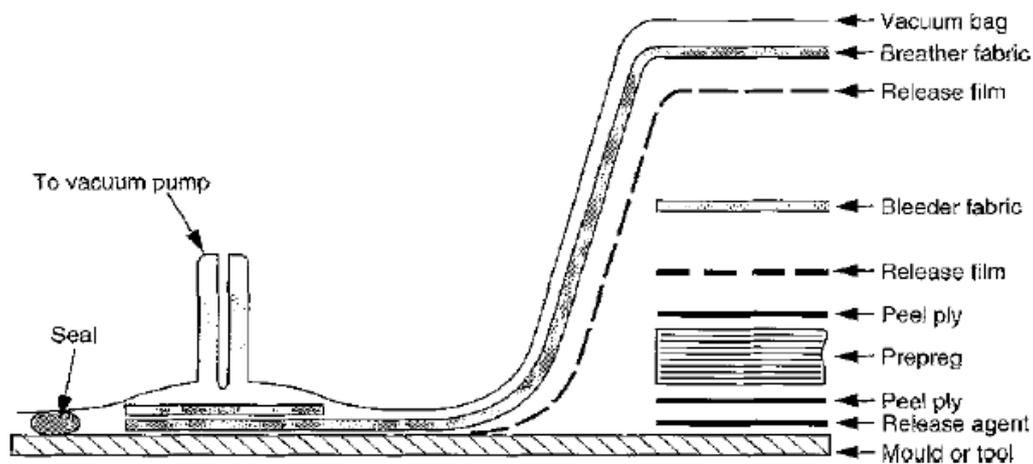
laminasi sekitar 60 persen volume, yang mana dianggap sebagai standar industri untuk aplikasi penerbangan ruang angkasa. Kelebihan resin yang mengalir keluar dari *prepreg* menghilangkan udara yang terperangkap dan larutan residu, yang mana akan mengurangi konten udara (*void content*) di dalam laminasi. Namun, kecenderungan saat ini adalah melibatkan isi resin bersih (*net resin content*), sekitar 34 persen berat dan diperbolehkan hanya sekitar 1-2 persen berat resin hilang selama poses molding (Mallick, 1988).

a. Proses *Lay-up*

Kegiatan *lay-up* dilakukan di ruang bersih yang ditetapkan sebagai 'kelas' tertentu. Setiap kelas menunjukkan jumlah maksimum partikel diizinkan di ruang bersih, dan juga mendefinisikan batasan suhu dan kelembaban. Sebagian besar aktivitas ini dilakukan di ruang bersih yang diklasifikasikan sebagai Kelas 100.000. Namun, beberapa produsen melakukan *step* ini di lingkungan Kelas 400.000, karena lebih mudah untuk pemeliharaan.

Bahan *prepreg* dilepas dari *freezer* di area ini. Lapisan dipotong dari *prepreg* gulungan ke dalam bentuk yang diinginkan, ukuran dan orientasi oleh perangkat pemotongan. Selanjutnya, *lay-up* dilakukan dengan menggunakan unsur-unsur tambahan yang ditunjukkan pada Gambar 2.18. Lapisan *prepreg* diletakkan pada orientasi yang tepat yang ditentukan melalui pengujian, desain struktural dan studi analisis. Tren yang saat ini berkembang adalah menggunakan sistem proyeksi laser selama kegiatan *lay-up*.

Gambar 2.18 menunjukkan skema semua komponen dari *vacuum bag lay-up*. Ini *lay-up* sangat ideal untuk komponen pesawat ruang angkasa berkualitas tinggi. Namun, mungkin ada beberapa perbedaan dalam jumlah dan jenis bahan *vacuum bag* tergantung pada bagian dan bahan untuk di-*curing* (bentuk, ketebalan, sifat material, dll). Setiap lapisan dalam gambar ini memiliki peran dalam perakitan *vacuum bag* seperti dijelaskan pada Tabel 2.3 (*Prepreg Technology*, 1995).



Gambar 2.18 *Vacuum bag lay up*

b. Proses *Curing*

Setelah *vacuum bag* siap, *lay-up* dimasukkan ke dalam *autoclave*. Siklus *curing*, yang telah dikembangkan melalui berbagai studi teknis dan pengujian, kemudian dijalankan (biasanya otomatis), oleh komputer.

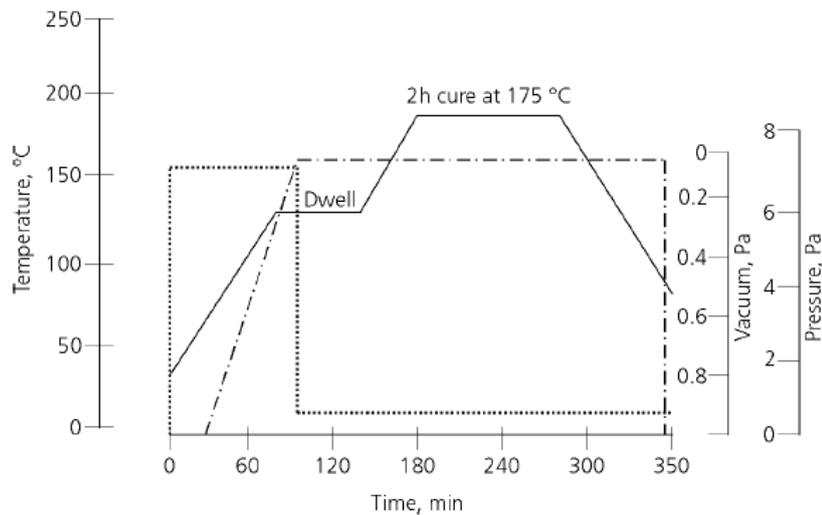
Pertama - tama, vakum diterapkan pada bagian untuk menjebak udara, volatil, dan oleh-produk. Pemanasan dimulai pada tingkat pemanasan tertentu. Ketika *prepreg* dipanaskan dalam *autoclave*, viskositas resin di lapisan - lapisan *prepreg stage B* pertama menurun, kemudian mencapai minimum, dan kemudian meningkat dengan cepat (gel) karena reaksi *curing* (tautan silang) mulai dan berlangsung sampai selesai. Gambar 3.10 menunjukkan siklus *curing* dua tahap tipikal untuk *prepreg epoxy serat karbon*.

Tabel 2.3 Material *vacuum bag* tipikal

Komponen	Fungsi
<i>Release agent</i>	Mempermudah melepas komponen <i>prepreg</i> yang telah di- <i>curing</i> dari cetakan
<i>Peel ply (optional)</i>	Memungkinkan menghilangkan volatil dan kelebihan matriks selama <i>curing</i> . Bisa dilepas dengan mudah setelah <i>curing</i> untuk memberikan permukaan <i>bondable</i> atau <i>paintable</i> .
<i>Bleeder fabric</i>	Biasanya terbuat dari kain kaca dan menyerap kelebihan matriks. Aliran matriks dapat diatur oleh kuantitas dari <i>bleeder</i> ini, untuk menghasilkan komposit dengan

	volume serat tertentu.
<i>Release film</i>	Lapisan ini mencegah aliran lebih lanjut dari matriks dan dapat sedikit berpori untuk memungkinkan lewatnya udara dan volatil ke dalam lapisan <i>breather</i> di atasnya.
<i>Breather fabric</i>	Menyediakan sarana untuk menerapkan vakum dan membantu menghilangkan udara dan volatil dari seluruh perakitan (<i>assembly</i>). <i>Breather</i> lebih tebal diperlukan ketika otoklaf tekanan tinggi digunakan.
<i>Vacuum bag/sealant tape</i>	Menciptakan kantong tertutup (<i>sealed bag</i>) untuk menghilangkan udara untuk membentuk <i>vacuum bag</i> . <i>Vacuum bag</i> ini adalah bahan habis pakai dan dibuang setiap kali selesai digunakan, tetapi tersedia juga beberapa material <i>vacuum bag</i> yang dapat digunakan kembali.

Tahap pertama dalam siklus *curing* ini terdiri dari peningkatan suhu hingga 125°C dan waktu tunggu pada suhu ini selama hampir 60 menit ketika viskositas resin minimum dicapai. Selama periode tunggu pada suhu ini, tekanan eksternal diterapkan pada stack prepreg, yang menyebabkan kelebihan resin mengalir keluar ke lapisan bleeder. Stack prepreg adalah jumlah lapisan *prepreg* yang diletakkan pada satu sama lain untuk membentuk material tumpukan prepreg dalam konfigurasi yang ditetapkan oleh desain sesuai orientasi serat. Aliran resin penting untuk menghilangkan udara terperangkap dan volatil dari prepreg dan dengan demikian mengurangi kadar udara di dalam laminasi. Pada akhir masa tunggu suhu, suhu *autoclave* ditingkatkan sampai mencapai suhu *curing* aktual untuk resin. Temperatur dan tekanan *curing* dipertahankan selama 2 jam atau lebih, sampai tingkat *pra-determined curing* telah terjadi. Pada akhir siklus *curing*, suhu perlahan-lahan dikurangi sementara laminasi masih di bawah tekanan. Laminasi dilepas dari *vacuum bag* dan, jika diperlukan, dapat dilakukan postcured pada suhu tinggi dalam *air-circulated oven*



Gambar 2.19 Dua langkah siklus *curing* untuk prepreg carbon fiber/epoxy

(sumber : Mallick, 1988)

Aliran kelebihan resin dari prepregs sangat penting dalam mengurangi kadar udara di dalam laminasi. Dalam proses *bag moulding* untuk memproduksi lembaran tipis atau struktur pelat, aliran resin dengan *face bleeding* (normal terhadap permukaan atas laminasi), lebih disukai daripada *edge bleeding*. *Edge bleeding* menggambarkan aliran resin melalui bagian tepi produk di bawah panas dan tekanan. *Face bleeding* lebih efektif karena jalur aliran resin sebelum berbentuk gel lebih pendek dalam arah tebal daripada dalam arah tepi. Karena jalur aliran resin relatif panjang dalam arah tepi, sulit untuk mengeluarkan udara terperangkap dan volatil dari daerah sentral dari laminasi dengan proses *edge bleeding*.

Suhu dan tekanan *curing* dipilih untuk memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Resin di-*curing* secara seragam dan mencapai tingkat *cure* tertentu dalam waktu sependek mungkin.
2. Suhu di setiap posisi dalam prepreg tidak melebihi batas yang ditentukan selama *curing*.
3. Tekanan saat *curing* cukup tinggi untuk semua kelebihan resin dari setiap *ply* sebelum resin berbentuk gel (peningkatan viskositas) pada setiap lokasi di dalam prepreg.

Loos dan Springer, mengembangkan model teoritis untuk fenomena termomekanis kompleks yang terjadi dalam proses *vacuum bag moulding*. Berdasarkan

model dan pengujian mereka, observasi berikut ini dapat dibuat mengenai berbagai parameter molding:

1. Suhu maksimum di dalam lay-up. Hal ini tergantung pada:

- suhu *cure* maksimum
- tingkat pemanasan dan
- ketebalan awal lay-up.

Suhu *cure* maksimum biasanya diresepkan oleh produsen prepreg untuk sistem resin-katalis tertentu yang digunakan di dalam prepreg dan ditentukan dari karakteristik waktu – suhu viskositas dari sistem resin-katalis. Pada tingkat pemanasan yang rendah, distribusi temperatur tetap seragam dalam *lay-up*. Pada tingkat pemanasan yang tinggi dan peningkatan ketebalan *lay-up*, panas yang dihasilkan oleh reaksi *curing* lebih cepat dari panas yang ditransfer ke permukaan cetakan dan '*overshoot*' suhu terjadi.

2. Aliran resin di *lay-up*. Hal ini tergantung pada:

- tekanan maksimum
- ketebalan lay-up dan
- tingkat aplikasi tekanan.

Tekanan *curing* yang cukup untuk menghilangkan semua kelebihan resin dari 16 dan 32 lay-up diketahui tidak memadai untuk menghilangkan resin dari lapisan dekat permukaan bawah dari 64 ply lay-up. Demikian pula, jika tingkat pemanasan sangat tinggi, resin mungkin mulai gel sebelum kelebihan resin dikeluarkan dari setiap *ply* di lay-up.

Loos dan Springer mencatat bahwa siklus *curing* yang direkomendasikan oleh prepreg produsen mungkin tidak cukup untuk menghilangkan kelebihan resin dari lay-up yang tebal. Karena pemadatan dan pergerakan aliran resin dari atas, lapisan yang berdekatan dengan permukaan cetakan bawah mungkin tetap tidak padat dan kaya resin, karena itu menciptakan lapisan interlaminar lemah dalam laminasi.

Kelebihan resin harus dihilangkan dari setiap *ply* sebelum titik gel dicapai pada setiap lokasi di prepreg. Oleh karena itu, tekanan *curing* maksimum harus diterapkan sesaat sebelum viskositas resin di lapis atas menjadi cukup rendah bagi aliran resin untuk terjadi. Jika tekanan diterapkan terlalu dini, kehilangan resin berlebihan akan terjadi, karena viskositas yang sangat rendah pada periode pra-gel. Sebaliknya, jika

tekanan *curing* diterapkan setelah waktu gel, resin mungkin tidak dapat mengalir ke dalam kain *bleeder* karena viskositas tinggi dengan cepat mencapai periode postgel. Dengan demikian, waktu aplikasi tekanan merupakan parameter molding penting dalam proses *bag moulding*. Secara umum, menurun dengan meningkatnya tekanan obat, serta meningkatkan laju pemanasan.

Keseragaman *curing* pada laminasi membutuhkan distribusi temperatur yang seragam. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan tingkat yang diinginkan saat *curing* dapat dikurangi dengan meningkatkan suhu *curing* serta meningkatkan laju pemanasan.

Selain void dan *curing* yang tidak tepat, cacat pada laminasi *autoclave* berhubungan dengan *ply lay-up* dan pemotongan. Kontrol tertutup harus dijaga pada hal – hal seperti orientasi serat di setiap *ply*, urutan susun, dan jumlah total lapisan di *stack*. Karena lem prepreg tidak selebar bagian itu sendiri, setiap lapisan dapat berisi sejumlah lapisan identik yang diletakkan berdampingan untuk menutupi seluruh permukaan cetakan. Celah filamen dalam satu lapisan tidak boleh melebihi 0,76 mm, dan jarak antara dua celah tidak boleh kurang dari 38 mm. Perhatian harus diberikan untuk menghindari filament saling silang. Patah filamen, benda asing atau kotoran tidak diijinkan. Untuk mencegah kelembaban berlebih, setelah mengambil roll prepreg dari ruang penyimpanan dingin, *roll prepreg* tersebut harus dihangatkan sampai suhu kamar sebelum digunakan.

c. Pengembangan siklus *curing* dan kontrol kualitas

Karena *curing* menentukan sifat produk, industri mengambil pendekatan yang sangat konservatif terhadap parameter - parameter, dan *curing* dari bahan tersebut. Tes yang sesuai dilakukan untuk memastikan bahwa bagian tertentu dari material komposit *preimpregnated* ini dapat diterima. Pengujian biasanya melibatkan pembuatan panel dan melakukan berbagai uji mekanis, seperti tarik, lentur, geser balok pendek, dan sebagainya, serta kadar resin, kadar aliran dan *volatile*. Pengujian kimiawi, seperti *high pressure liquid chromatography* (HPLC), *thermogravimetric analysis* (TGA), *differential scanning calorimetry* (DSC), *rheologi*, inframerah (IR) spektroskopi, dll, juga dilakukan untuk karakterisasi material, pengembangan parameter proses, kontrol kualitas, pembaharuan, dll. Pengujian ini menunjukkan keadaan kimia dan keadaan fisik

dari resin belum di-*curing*. Sistem resin yang telah di-*curing* juga dipelajari dengan menggunakan TGA, analisis termomekanis (TMA), analisis mekanik dinamis (DMA), dll. Tes dapat mengindikasikan :

- Perkembangan/kemajuan secara kimia dari sistem resin
- apakah resin sudah pada tahap yang tepat untuk *curing*
- rasio reaktan terhadap reaksi produk
- pada suhu berapa volatile berkembang
- viskositas dan
- apakah pemasok telah mengirim bahan yang benar.

Setelah produk di-*curing*, berbagai teknik *Non Destructive Inspection* (NDI) dilibatkan untuk tujuan penjaminan kualitas. Untuk benda komposit, metode pemeriksaan ultrasonik seperti melalui transmisi dan pulsa gema (*pulse echo*) sebagian besar digunakan. Beberapa metode termografi dan tomografi juga diterapkan untuk benda berkontur, kompleks dan kritis secara struktur seperti baling-baling helikopter. Metode X-ray diterapkan terutama untuk struktur sandwich untuk menemukan cacat di bagian inti (*core*).

d. *Tooling*

Tujuan utama dari *tooling* adalah untuk memberikan morfologi kontur pada produk ketika selesai *curing*. Mentransfer panas ke bagian *lay-up* adalah fungsi lain dari alat. Alat umumnya terbuat dari bahan tahan lama yang tercantum dalam Tabel 2.4, meskipun beberapa bagian dapat dilakukan pada alat plester yang biasanya rusak oleh siklus panas.

Tabel 2.4 Sifat material *tooling* komposit

Material	CTE 10 ⁻⁶ /K	Thermal conductivity w/m.K	Approximate fabricated cost \$/m ²
Fibreglass-epoxy	7.9	-	175–278
Graphite-epoxy	-0.9	0.022	220–320
Aluminium	23	0.221	390–600
Steel	13.9	0.048	250–450
Electroless nickel	13.3	0.035	370–580

CTE alat yang mendekati nilai CTE dari bagian yang dibuat adalah sangat diminati. Ini adalah dasar dari kecenderungan menggunakan baja atau alat dari karbon-

epoxy suhu tinggi untuk komposit. Untuk bagian-bagian kecil, terutama jika mereka datar, aluminium atau baja pelat sering digunakan sebagai bahan alat. Untuk yang lebih besar, bagian yang lebih kompleks, alat berlapis nikel *electroless* atau epoxy suhu tinggi dengan perkuatan karbon biasanya digunakan. Kemampuan nikel *electroless* untuk memberikan deposit seragam, bahkan ke bagian relung - relung, memastikan bahwa permukaan akhir produk di cetakan akan menduplikasi permukaan asli. Pelumasan alami lapisan memberikan kelancaran pengaliran selama injeksi dan pelepasan produk yang cepat dan mudah dari cetakan. Pada *pre-polished cavities*, nikel *electroless* menghasilkan *self-polishing* dan membantu menjaga kehalusan (*smoothness*) cetakan. Karena kekerasan yang tinggi, bahkan pada suhu yang tinggi, nikel *electroless* meminimalkan erosi dan abrasi dari bagian cetakan dan membantu untuk memperpanjang masa pakai mereka. Ini memberikan perlindungan yang sangat baik terhadap asap korosif yang dihasilkan selama molding plastik seperti ABS, PVC dan bahan dengan vinyl aditif.

Alat mungkin juga mengandung sisipan, penghentian, atau panduan khusus untuk memfasilitasi konstruksi produk. *Built-in* vakum dan port statis, serta termokopel permanen juga disertakan ke alat. Bagian statis (transduser vakum) yang digunakan untuk mengukur vakum diterapkan pada bagian (*vacuum bag*). Fitur-fitur ini membutuhkan pemeliharaan yang tinggi dan cenderung meningkatkan biaya *tooling*, yang harus diimbangi oleh keuntungan dalam efisiensi atas penggunaan jangka panjang dari alat untuk beberapa siklus *curing*. Perkakas substruktur memiliki dampak yang signifikan pada aliran udara di bawah alat dan pada perpindahan panas ke bagian selama siklus penyembuhan. Tren saat ini adalah untuk menggabungkan lubang besar di substruktur alat dan menyelaraskan dukungan substruktur sejajar dengan aliran udara untuk meningkatkan perpindahan panas.

Tooling umumnya dipanaskan dalam *autoclave* dengan aliran udara konvektif; oven jarang digunakan, karena tekanan yang lebih tinggi biasanya diperlukan untuk konsolidasi produk. *Electrically-heated tool* telah jarang digunakan karena tingginya biaya sistem dan adanya potensi bahaya kejutan (Sanders dan Taha, 1988).

2.5.4 Vacuum Resin Infusion

Vacuum resin infusion adalah teknik canggih untuk pembuatan komposit berkinerja tinggi dan bebas *void* bahkan pada cetakan besar atau rumit sekalipun. Proses ini cocok untuk pembuatan komposit serat karbon dan secara luas digunakan oleh produsen profesional untuk produksi panel bodi serat karbon seperti *bonnet* dan oleh produsen kapal untuk produksi lambung kapal.

Pada *resin infussion*, *reinforcement* diletakkan pada cetakan dalam keadaan 'kering', yaitu tanpa resin sama sekali, dan kemudian dilingkupi dengan *bagging material* (*peel ply*, *infusion mesh*, dan *bagging film*) sebelum diberikan tekanan vakum menggunakan pompa vakum. Setelah semua udara dihilangkan dari *bag* dan *reinforcement* telah sepenuhnya dikompresi di bawah tekanan ini, resin epoxy cair (dicampur dengan pengeras) dialirkan terhadap *reinforcement* melalui pipa yang di bawah tekanan vakum. Setelah resin sepenuhnya diresapi melalui penguatan, pasokan resin dihentikan (menggunakan penjepit pipa) dan dibiarkan mengeras dalam tekanan vakum.

Resin *infussion*, bila dilakukan dengan benar, dapat menghasilkan produk dengan kekuatan yang luar biasa dan dengan penampilan yang berkualitas. Kombinasi tekanan vakum bersama dengan bahan habis pakai vakum (seperti *peel ply* dan *infusion mesh*) berarti bahwa komposit yang telah jadi telah menyerap resin pada rasio resin-to-*reinforcement* yang optimal, menghindari komposit kaya resin atau variasi dalam kinerja yang tak terelakkan dari metode *wet lay up* tradisional.

Proses *resin infusion* juga menghilangkan beberapa masalah yang dapat merusak komposit *wet-lay*, seperti rongga udara (disebabkan ketika *reinforcement* membentuk rongga sekitar area sudut) dan gelembung udara kecil yang disebabkan oleh udara yang terperangkap dalam laminasi.

Kualitas epoxy 'infus resin' berarti bahwa produk yang diresapi resin dapat dibuat dengan rasio kekuatan terhadap berat yang dapat menyaingi produk yang dibuat menggunakan sistem *pre-impregnated* (*pre-preg*).

2.5.4.1 Perlengkapan



Gambar 2.20 Perlengkapan *Vacuum Infussion*

Tabel 2.5 Perlengkapan *Vacuum Infussion*

Komponen/material	Kegunaan
Pompa vakum komposit	Pompa vakum elektrik mampu memberikan tekanan vakum sangat tinggi (99,98% vakum). Pompa ini menciptakan tekanan vakum yang menarik semua udara keluar dari kantong vakum dan mempertahankan tekanan vakum ini sepanjang siklus <i>curing</i> komposit.
Resin catch pot & gelas penampung	<i>Catch pot</i> diletakkan di antara komposit dan pompa vakum dan mencegah kelebihan resin dari komposit masuk ke dalam pompa. <i>catch pot</i> dapat diisi dengan gelas penampung sehingga setiap resin yang tertangkap oleh pot dapat dengan mudah dibuang setelah proses selesai.
Vacuum gauge	Pengukur vakum menunjukkan tingkat vakum dalam sistem dan sangat berharga dalam mengidentifikasi ketika ada kebocoran kecil di vakum. Infus tidak akan dimulai sampai seluruh sistem mencapai vakum penuh (setidaknya 99,9 pada pengukur vakum).
1/4 Turn valve	1/4 <i>turn valve</i> digunakan untuk menahan tekanan vakum sementara mempersiapkan <i>bag</i> . katup dapat dibuka dan ditutup

	untuk menghilangkan lebih banyak udara karena kantong dibentuk untuk menyesuaikan dengan baik di sekeliling komposit.
Tube clamp	<i>Tube clamp</i> digunakan untuk menutup aliran atau resin dari wadah penampung ke komposit. <i>Tube</i> biasanya dijepit sebelum resin yang mengalir ke komposit mencapai akhir dari <i>reinforcement</i> (untuk memungkinkan beberapa lag dalam sistem).
Silicone bag connectors (atau dengan material sejenis)	Konektor menyatukan selang vakum dan kantong vakum dan juga antara penampung resin dan kantong. Konektor silikon digunakan (bukan logam konektor) karena resin akan menempel selama proses infus. Dengan menggunakan bahan silikon, resin kering yang menempel pada konektor dapat dengan mudah diretakkan dan dilepas setelah proses selesai dan dapat digunakan kembali.
Vacuum hose	Selang vakum menghubungkan pompa vakum, <i>catch pot</i> dan wadah input resin dengan <i>bagged composite</i> .
Vacuum bagging film	Plastik ini untuk membuat vakum dimana bersifat tahan robek dan melekat sangat baik dengan pita segel (<i>sealant tape</i>).
Peel-ply	Kain tenun tipis ini adalah lapisan pertama yang mudah dilepas antara komposit dan kantong vakum. <i>Peel-ply</i> menciptakan permukaan yang bisa menyerap kelebihan resin dan juga, ketika dilepas dari komposit (setelah proses selesai) menghasilkan permukaan bertekstur yang sangat cocok untuk perekatan (<i>bonding</i>).
Resin infusion mesh	<i>Infusion mesh</i> adalah plastic berpola <i>mesh</i> yang dirancang untuk melancarkan aliran resin selama proses infusi.
Resin infusion spiral	Tabung spiral plastik ini digunakan sebagai saluran yang fleksibel yang menyeragamkan aliran resin.
Bag sealing tape	Pita khusus yang lengket dan mirip karet (<i>gum</i>) ini digunakan untuk membuat segel sempurna antara dua sisi dari kantong vakum (ketika membuat sampul) atau antara kantong vakum dan

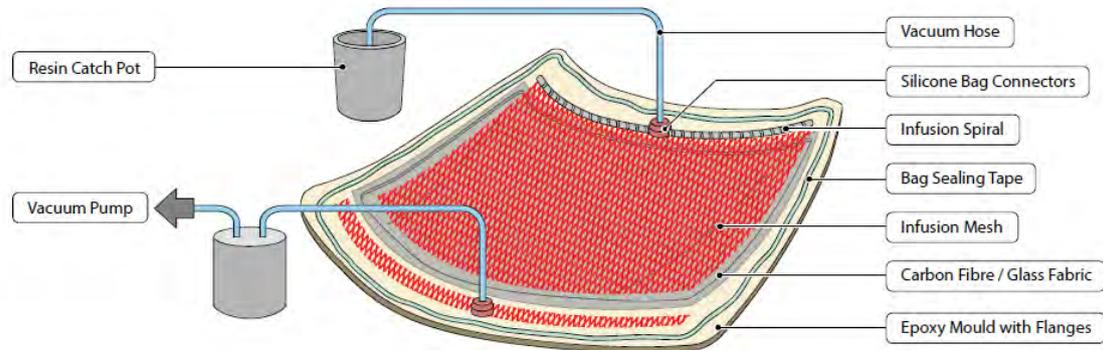
	cetakan ketika <i>half-bagging</i> cetakan.
Breather	Dalam proses infus, <i>breather</i> sering digunakan sebagai penghalang penyerap antara komposit dan konektor vacum.
Infusion Resin	Proses <i>resin infusion</i> membutuhkan viskositas resin yang rendah.

(sumber : easycomposites.co.uk, 2010)

2.5.4.2 Pertimbangan sebelum memulai

Kunci sukses *vacuum resin infussion* memiliki semua peralatan yang tepat dan mempersiapkan segala sesuatu di awal. Setelah resin epoksi infus telah dicampur dengan pengeras nya, jika ada yang tidak beres itu umumnya sudah terlalu terlambat untuk melakukan sesuatu lagi. Masalah seperti kehabisan resin, kehilangan vakum atau memiliki kebocoran di kantong hampir pasti akan mengakibatkan kecacatan produk. Ini berarti bahwa untuk pemula, perencanaan metodologi yang baik sangatlah penting.

Ada banyak konfigurasi alternative untuk dapat digunakan didalam *resin infusion*. Konfigurasi di bawah ini adalah tipikal dan mampu membuat *strating pont* yang baik.



Gambar 2.21 Konfigurasi dasar resin infussion (sumber : easycomposites.co.uk, 2010)

2.5.4.3 Jenis Cetakan yang baik

Cetakan yang cocok untuk resin infussion kurang lebih sama dengan cetakan yang biasa digunakan di dalam metode *wet lay-up*, dengan beberapa catatan penting sebagaimana berikut:

- a. Permukaan cetakan

Resin infussion terbaik adalah *epoxy* sehingga permukaan cetakan yang digunakan dalam *infusion* juga terbuat dari *epoxy*, apakah *gel coat epoxy* atau

hanya permukaan cetakan yang dilapisi resin *epoxy*. Permukaan cetakan yang dibuat menggunakan *polyester gel coat* atau resin polyester sebagai lapisan permukaan menyebabkan produk yang terbuat dari dari epoxy resin (atau dengan *gel coat epoxy*) melekat pada cetakan dan merusak produk dan cetakan tersebut.

Jika memang dikehendaki menggunakan cetakan yang terbuat dari *gel coat polyester* di dalam pross infusi, salah satu solusinya menggunakan PVA *mould release agent* dari pada *mould release wax*. PVA akan menciptakan penghalang yang cukup antara permukaan cetakan polyester dan produk epoxy untuk mempermudah produk lepas dari cetakan. Kelemahannya adalah bahwa PVA harus dibersihkan dari cetakan dan di aplikasikan ulang setiap kali digunakan, juga produk harus sedikit dipoles untuk menghilangkan pola-pola tertentu akibat PVA ini.

b. Sayap cetakan

Proses resin infusion ini memerlukan area tambahan (*mould flange*) di sekeliling cetakan untuk tempat meletakkan *vacuum connector*, *resin feed connector*, *resin mesh*, dan saluran resin.

2.5.4.4 Informasi keamanan

Ketika resin bercampur dengan pengeras (*hardener* atau katalis), campuran akan bersifat eksotermik. Jika ada resin dalam jumlah yang besar di dalam satu wadah, resin dapat menjadi sangat panas. Pada kasus ekstrim, resin dapat berasap dan mencapai suhu yang sangat tinggi. Hal ini sekali lagi hanya akan terjadi ketika resin terakumulasi dalam jumlah yang besar dalam satu wadah (tidak pernah terjadi pada produk) dan ketika terlalu banyak resin yang disiapkan. Jika memungkinkan tanpa mengganggu proses vakumisasi, kelebihan resin di catch pot dapat dibagi-bagi ke beberapa wadah kecil untuk mencegah kemungkinan resin terlalu panas. Hal ini tentu hanya bisa dilakukan ketika proses *infusion* selesai dilakukan dan jalur *resin feed* telah disegel.

2.5.5 Perbandingan beberapa metode pabrikasi fiberglass

Parameter	Jenis metode							Vacuum infussion
	Hand lay up	Hand lay up dg otomasi	Spray up	Spray up dengan otomasi	Vacuum bag	Pressure bag	Otoklaf	
Kapabilitas dalam skala	Sangat mumpu	sulit	mumpu ni	sulit	mumpu ni	mumpu ni	Sulit	Mumpu ni

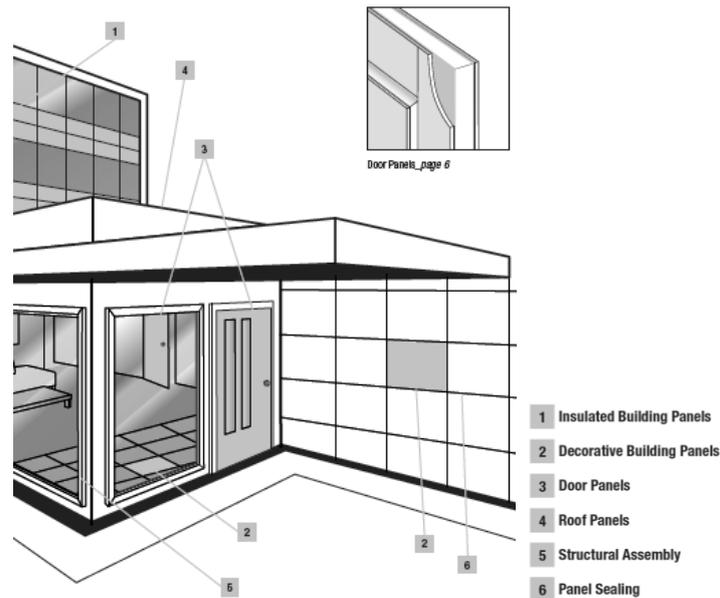
lab	ni							
Kompleksitas peralatan	Sederhana	Kompleks	semi kompleks	Kompleks	semi kompleks	semi kompleks	Sangat Kompleks	semi kompleks
Keterbatasan dalam membuat bentuk kompleks	tidak terbatas	terbatas	tidak terbatas	terbatas	tidak terbatas	tidak terbatas	tidak terbatas	tidak terbatas
Harga peralatan	sangat murah	mahal	sedang	mahal	sedang	sedang	mahal	sedang
Resin konten	tinggi	terkontrol	tinggi	terkontrol	optimum	sesuai initial	optimum	sangat optimum
Kuantitas pekerja	tinggi	rendah	sedang	rendah	rendah	rendah	sangat rendah	rendah
Tingkat produksi	sangat rendah	tinggi	rendah	tinggi	rendah	rendah	sedang	rendah

Berdasarkan tabel di atas dan untuk keperluan ini, maka dipilihlah vacuum infusion sebagai metode pabrikasi fiberglass.

2.6 Penggunaan panel Sandwich pada Bangunan

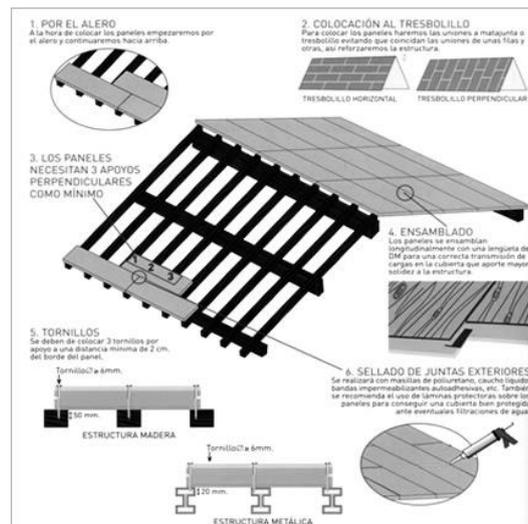
Penggunaan panel sandwich pada bangunan telah menunjukkan pertumbuhan yang stabil selama satu decade terakhir. Indikator yang dapat dipakai untuk menunjukkan fenomena ini adalah data tingkat produksi polyurethane *foam* (PU *foam*), yang selama ini bahan tersebut banyak digunakan sebagai material *core* panel sandwich. Dedecker (2006) menyebutkan bahwa penggunaan PU *foam* untuk kawasan EAME (Europe, Africa, Middle East) pada tahun 2006 mencapai 405 kt, atau setara dengan 130 mio m² panel. Tingginya angka konsumsi panel sandwich tidak lepas dari beberapa keuntungan yang menyertainya, seperti konstruksinya yang ringan, kemampuan menyerap panas (insulasi panas) yang baik, serta teknik konstruksi yang cepat dan ekonomis.

Panel sandwich banyak digunakan pada bangunan industry dan komersial (panel atap, panel dinding, dinding partisi), menyerap sekitar 80% dari jumlah panel sandwich yang diproduksi. Aplikasinya juga dapat dijumpai pada gudang penyimpanan industry bersuhu rendah (refrigerated warehouses atau cold stores), sekitar 15% dari total produksi panel (Dedecker, 2006). Pada tahun-tahun terakhir, panel sandwich mampu menggantikan fungsi bagian-bagian non structural di dalam rumah, seperti sebagai pengganti pintu kayu, jendela dan sebagainya (lihat Gambar 2.22).



(sumber : sika.com)

(a)



(sumber : garcopanel.com)

(b)

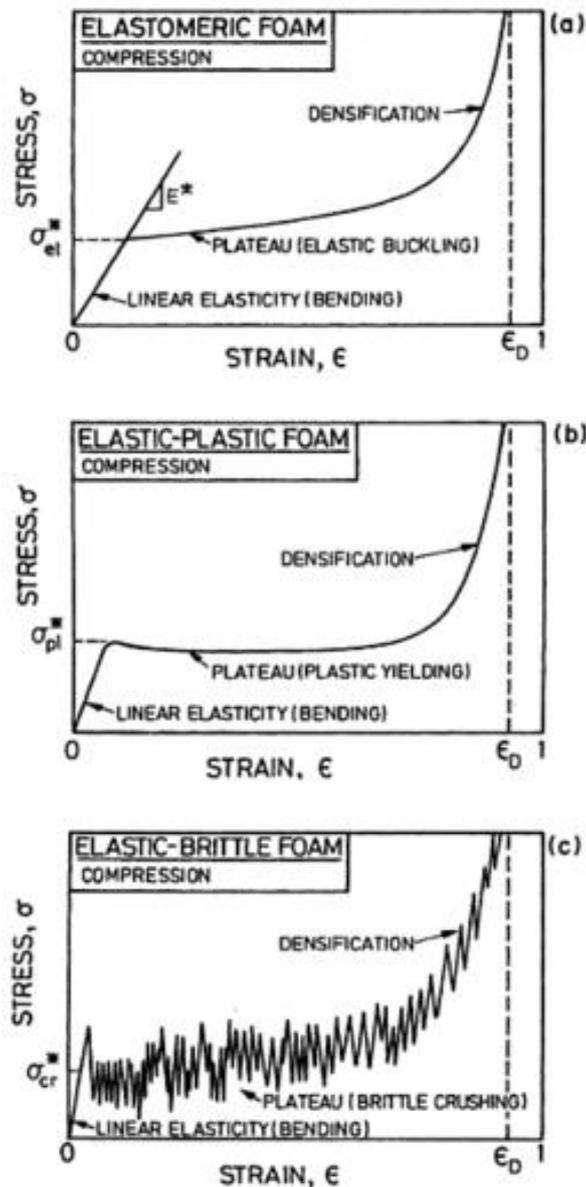
Gambar 2.22 Beberapa penggunaan panel sandwich pada bangunan (a) aplikasi pada bangunan komersial (b) panel atap

2.7 Tinjauan terhadap Penelitian Terdahulu

2.7.1 Pengujian Tekan Foam

Gibson et.al (1997) mengungkapkan bahwa ada tiga jenis kurva tegangan – regangan dari *Rigid Polyurethane Foam* ketika dilakukan pembebanan tekan (Gambar 2.23), yaitu *elastomeric foam* (misalnya *flexible foam*), *elastic-plastic foam* (misalnya *rigid PU foam*) dan *elastic-brittle foam* (misalnya *ceramic foam*). Foam memiliki

daerah perpanjangan *plateu stress – strain* setelah leleh yang membuatnya berbeda dari material padat lainnya seperti misalnya logam.

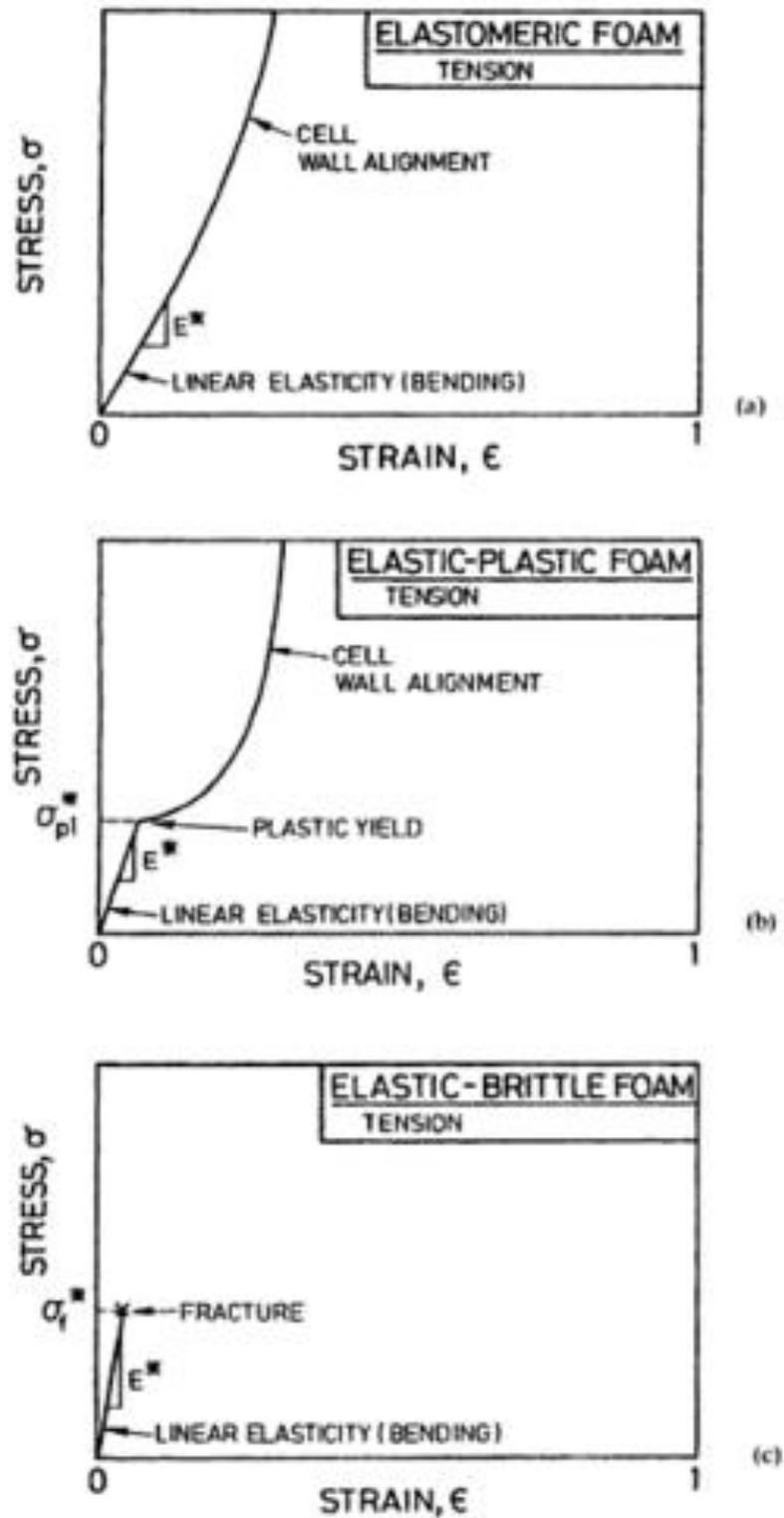


Gambar 2.23 Kurva tegangan – regangan dari foam di bawah beban tekan (Gibson dkk, 1997)

2.7.2 Pengujian Tarik Foam

Meskipun Gibson dkk (1997) menyatakan bahwa ada tiga jenis kurva tegangan – regangan dari foam padat ketika dilakukan pembebanan tarik, yaitu *elastomeric foam*, *elastic-plastic foam* dan *elastic-brittle foam*, namun Ridho (2007) menyatakan bahwa porsi linear tersebut tidaklah benar – benar elastis, melainkan cenderung melengkung kebawah. Motz dan Pippa (2001) juga mengklarifikasi Gibson dkk (1997) bahwa pada

Figure 3 b, seharusnya tidak ada peningkatan tegangan secara cepat setelah kelelahan plastis.



Gambar 2.24 Kurva tegangan – regangan foam di bawah pembebanan tarik (Gibson dkk, 1997).

2.7.3 Perbandingan nilai *mechanical properties* foam dari beberapa peneliti**Tabel 2.6** Perbandingan nilai *mechanical properties* foam dari beberapa peneliti

No	Nama Peneliti	Th.	Density	σ_c	E_c	σ_t	E_t	t	G	ν	Ket.	
			kg/m ³	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa			
1	Cristian Morar	2013	-	44.6	1510	71.5	2180	123	3910	-	Paralel terhadap foam rise, G teoritis = 580.77 Mpa, dengan asumsi $\nu = 0.3$	
2	Wit Witkiewicz, Andrzej Zieliński	2006	62	640	19500	790	26700	340	6400	0.32	Paralel terhadap foam rise, G teoritis = 7386.37 Mpa	
				410	10100	440	12300	360	6200	0.3	Tegak lurus terhadap foam rise, G teoritis = 3884.62 Mpa	
			16	33	920	-	-	-	-	-	-	
				18	340	-	-	-	-	-	-	
3	Ridha	2007	23.3	-	-	375	11500	-	-	-	Paralel terhadap foam rise	
				-	-	120	700	-	-	-	Tegak lurus terhadap foam rise	
			29.5	-	-	450	11800	-	-	-	Paralel terhadap foam rise	
				-	-	200	1400	-	-	-	Tegak lurus terhadap foam rise	
			35.2	-	-	510	13900	-	-	-	Paralel terhadap foam rise	
				3000	3365	260	3600	-	-	-	Tegak lurus terhadap foam rise	
4	Chen, Tao dkk	2011	46.3	330	6280	-	-	-	-	-	Paralel terhadap foam rise	
			33.3	227	5090	-	-	-	-	-		
			27.1	182	3930	-	-	-	-	-		
			24.6	161	3140	-	-	-	-	-		
			24.8	164	3410	-	-	-	-	-		
5	Mark S. Thompson dkk	2003	115	850	22000	-	-	710	13300		nu teoritis = - 0.173	
			158	1440	38700	-	-	1310	23600		nu teoritis = - 0.181	
			209	2710	79300	-	-	2500	41300		nu teoritis = - 0.04	
			332	5140	164000	-	-	4150	99700		nu teoritis = - 0.178	

2.7.4 Perbandingan nilai *mechanical properties* fiber dari beberapa penelitiTabel 2.7 Perbandingan nilai *mechanical properties* fiber dari beberapa referensi

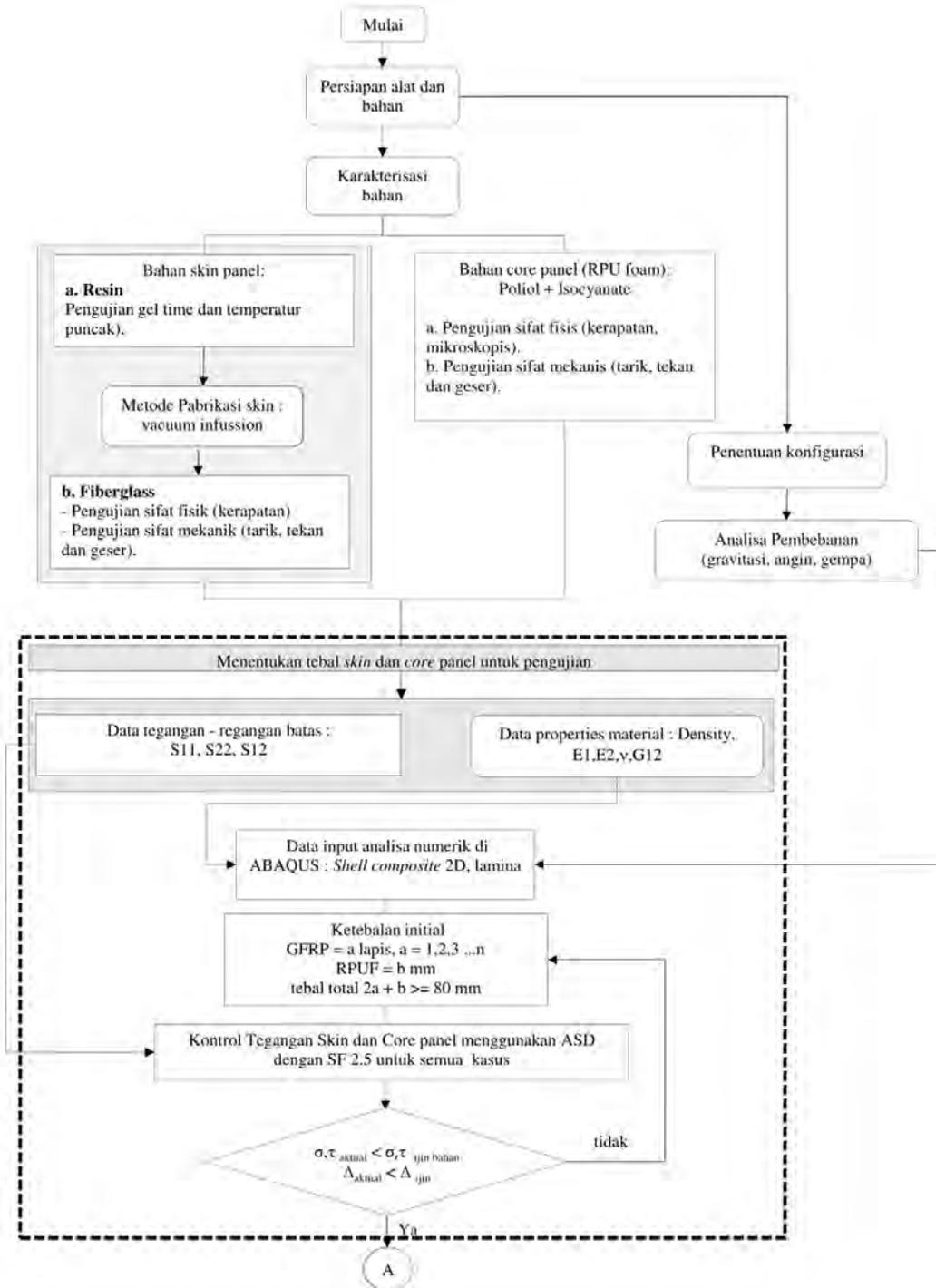
No	Referensi	Tahun	Jenis fiber /resin	Density kg/m ³	Fiber ratio	σ_c MPa	σ_t MPa	E_t MPa	τ_{12} MPa	τ_{23} MPa	G_{12} MPa	ν	Ket.
1	Agy Technical paper	2006	S-2 Glass UD			690 - 1240	1590 - 2000	53000 - 59000	62 - 165	55 - 103	6000 - 9000	0.26	G teoritis = 21031.75 Mpa
2	Mat Web	1998	E - Glass			-	3450 - 3790	72400	-	-	30000	0.2	G teoritis = 30166.67 Mpa
3	Pultex	-	E - glass VE			165	138	12410	-	-	-	0.32	
4	Bagherpour	2012	E - Glass			-	3445	72300	-	-	-	-	
5	CTG fiberglass	2014	E - Glass UD			825	1080	41100	51.8	-	3990	-	G teoritis = 16054.69 Mpa
			E - Glass Biaxial			448	702	31500	48.3		3890		G teoritis = 12304.69 Mpa, dengan asumsi $\nu = 0.28$
			E - Glass Triaxial			630	812	33000	153		6670		G teoritis = 12890.63 Mpa, dengan asumsi $\nu = 0.28$
6	Azo Material	2012	E - Glass	2600		4000	2050	85000	-	-	36000	0.23	
7	Norsodyn 21033	2009	E - Glass/PE	4 x CSM 450 gsm			97	8100					
8	Nuplex Data Sheet	2009	E - Glass/PE	3 x CSM 450 gsm	0.692		105	9000					
9	Gordon Composite	-	Cloth	1882	0.700	765	1048	41368	51	34	4481	0.29	G teoritis = 16034.11 Mpa

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

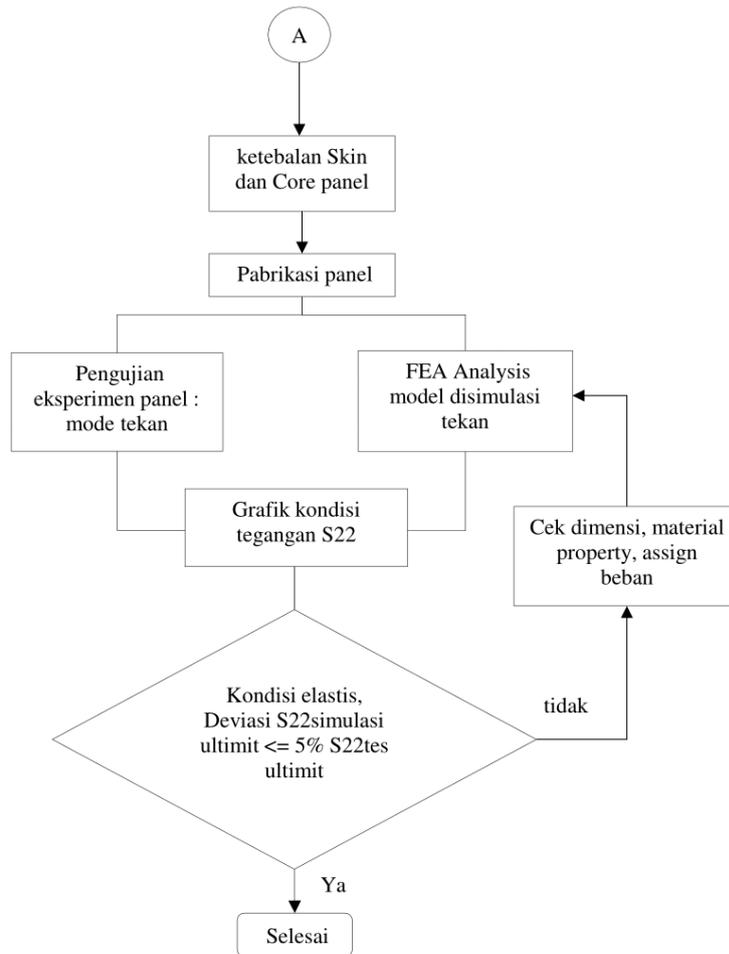
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram alir penelitian



Gambar 3.1 Alur penelitian



Gambar 3.2 Alur penelitian (lanjutan)

3.2 Karakterisasi bahan

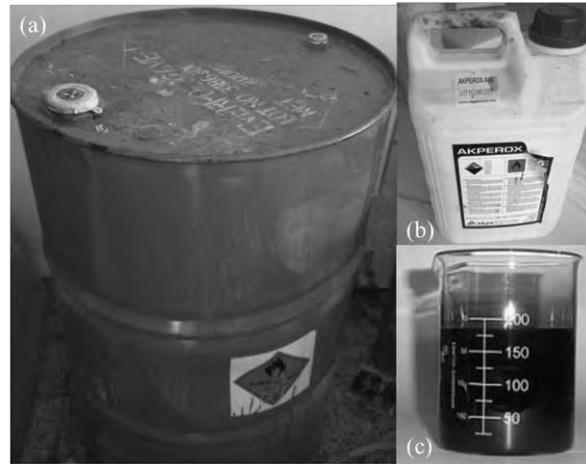
3.2.1 Bahan Skin Panel

a. Resin

Resin yang digunakan dalam fiberglass ini adalah thermosetting resin EVERPOL 324 VE I, modified vinyl ester Resin for infusion, dengan viskositas sebesar 170 cps (resin standar memiliki nilai viskositas berkisar antara 250 – 350 cps). Untuk dapat mengeras, resin vinyl ester ini perlu ditambahkan Cobalt 1% solution, dan katalis Akperox A60 produk dari akpa Kimya San.ve Tic.Ltd.Sti.

Pabrikasi fiberglass yang menggunakan metode *vacuum infusion* mengharuskan resin memiliki geltime yang panjang dan viskositas yang rendah. *Gel time* adalah waktu yang dibutuhkan resin untuk mencapai perubahan wujud dari bentuk cair ke bentuk gel setelah penambahan katalis atau katalis dan kobalt. *Gel time* yang panjang akan

memberikan waktu yang cukup bagi proses *vacuum infusion* untuk mengisi matriks fiberglass. Sementara viskositas (kekentalan) yang rendah akan mempermudah pengaliran resin selama proses *infusion* berlangsung.



Gambar 3.3 Material matriks fiberglass (a) Vinyl Ester Resin EVERPOL 324 VE I, (b) katalis Akperox A60 MEKP (c) Cobalt 1% solution

Karena tipe resin ini memiliki *gel time* yang lebih fleksibel, maka perlu dicari prosentase katalis untuk mendapatkan *gel time* yang sesuai dengan kebutuhan seperti suhu ruangan produksi, ukuran produk, dan kehandalan perlengkapan *infusion*. Suhu ruangan menyebabkan *geltime* lebih cepat, sementara ukuran produk yang lebih besar membutuhkan waktu *geltime* yang cukup sampai proses *infusion* selesai. Pengetahuan tentang besarnya suhu puncak resin ketika bereaksi dengan Cobalt dan Katalis juga menjadi hal penting sebagai bahan pertimbangan penentuan perlengkapan pabrikasi fiberglass, bahwa perlengkapan tersebut harus bisa menahan panas yang timbul selama reaksi berlangsung. Oleh karena itu, sebagai tahap awal akan dilakukan dua pengujian pada resin, pengujian *gel time* dan temperature puncak resin.

b. Fiberglass

- Tipe serat fiber

Pemilihan jenis fiber sebagai *reinforcement* pada skin panel dinding didasarkan pada beberapa alasan, diantaranya memiliki dua arah fiber yang saling tegak lurus untuk menahan momen-momen yang kemungkinan terjadi pada panel dan harus memiliki kestabilan posisi sehingga mampu mempertahankan sifat mekanik pada arah fiber itu. Fiber tipe cloth 200 dan *combo mat* CTG E-Glass Knitted Mat ECW300/570 produk dari Taishan fiberglass Inc. memenuhi kriteria tersebut dan digunakan sebagai

reinforcement skin panel dinding. Fiber combo mat sendiri merupakan kombinasi dari dua fiber berbeda, *Woven Roving* (WR) 570 g/m², dan *Chopped strands/CSM* 300 g/m² yang dijahit bersama sehingga mencegah fiber berubah posisi.



Gambar 3.4 (a) Serat fiber Combo mat (b) serat fiber tipe *cloth*

- Pabrikasi fiberglass *sheet* untuk pengujian *skin* panel

Lembaran fiberglass yang digunakan dalam pengujian tarik, tekan, dan geser dipabrikasi melalui metode *infusion* untuk mencapai rasio serat yang tinggi terhadap volume total fiberglass, yang kemudian akan berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan fiberglass tersebut. Berbeda dengan metode konvensional seperti *hand lay-up* yang memiliki kontrol kualitas produk yang rendah, *vaccum infusion* mampu menciptakan produk berkualitas tinggi dengan hampir 0% *void* atau gelembung udara yang terperangkap. Resin yang akan digunakan adalah jenis vinylester dengan dua tipe serat kaca yang akan dibandingkan kekuatannya, woven roving 200 dan combo mat 800 dengan proporsi resin menurut Tabel 3.1. Curing dilakukan pada skin pada suhu ruangan selama 24 jam dengan perubahan jadwal *curing* yang dapat dilakukan berdasarkan Tabel 3.3.

Tabel 3.1 Kebutuhan resin untuk beberapa ukuran produk

Ukuran Produk	Total berat <i>reinforcement</i> dalam gram per meter persegi (gsm)									
	1 layer/200gsm		2 Layers/400gsm		3 Layers/600gsm		4 Layers/800gsm		5 Layers/1000gsm	
	PART	MIX	PART	MIX	PART	MIX	PART	MIX	PART	MIX
0.25sqm	20	84	40	108	60	132	80	156	100	180
0.5sqm	40	108	80	156	120	204	160	252	200	300
1sqm	80	156	160	252	240	348	320	444	400	540
1.5sqm	120	204	240	348	360	492	480	636	600	780
2sqm	160	252	320	444	480	636	640	828	800	1020

(sumber : easycomposites.co.uk, 2010)

Tabel 3.2 *Cure time* menurut temperatur

Suhu	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
<i>Cure Time</i>	24 jam	11 jam	6 jam	4 jam	2 jam	1.5 jam

(sumber : easycomposites.co.uk, 2010)

- Pengujian Pengujian sifat fisik dan mekanik fiberglass

Pengujian sifat fisik fiberglass (*density*) dilakukan untuk mengetahui berat sendiri (*self weight*), berdasarkan ASTM D792 – 08. Sementara untuk pengujian tarik, tekan, dan geser fiberglass dilakukan untuk mendapatkan data – data sifat mekanik untuk proses analisa dan desain panel, berturut – turut berdasarkan ASTM D 638 – 03, ASTM D 695 – 02, dan ASTM D3846 – 02.

3.2.2 Bahan core panel

- Pabrikasi benda uji RPUF (Rigid Polyurethane Foam)

Spesimen Rigid polyurethane *foam* dibuat dengan mencampurkan dua komponen, *polyol*, (resin, RF50593 / 7-25A, light brown liquid) dan *diisocyanate* (hardener, RF50593 / 7-25B, dark brown liquid), produk dari Asia Polyurethane Pte Ltd, dengan rasio pencampuran 1:1 (*volume based*). Kemudian, campuran tersebut dituang ke dalam cetakan yang bereaksi pada mode *free rise* dan dibiarkan mengeras selama minimal 12 jam sebelum dapat dilepas dari cetakan.

Untuk keperluan pengujian tekan, digunakan benda uji silinder RPUF yang dipabrikasi menggunakan cetakan beton silinder berdiameter 10 cm dengan tinggi 20 cm. Untuk keperluan pengujian tarik digunakan benda uji blok RPUF yang dipabrikasi menggunakan cetakan beton kubus 15x15x15 cm³. Sementara untuk pengujian geser, digunakan benda uji blok RPUF yang diambil dari *core sandwich* yang bersangkutan.

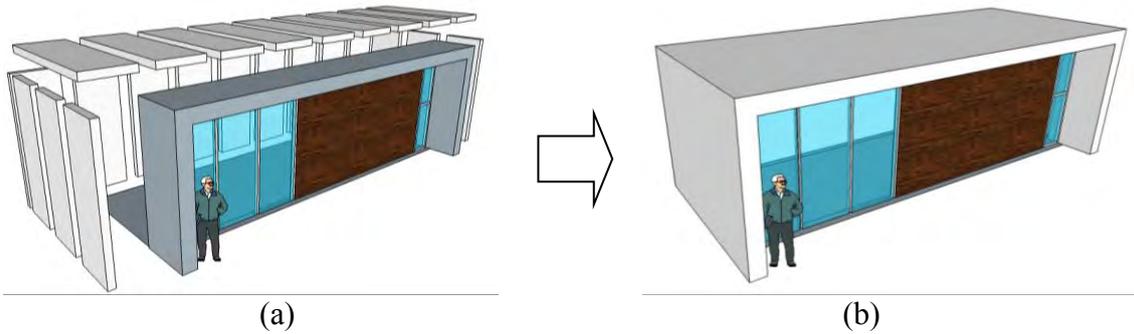
- Pengujian sifat fisik dan mekanik RPUF

Pengujian sifat fisik RPUF (*density*) dilakukan berdasarkan ASTM D1622 – 03. Sementara untuk pengujian tarik, tekan, dan geser RPUF berturut – turut dilakukan berdasarkan ASTM D1623 – 03, ASTM D1621 – 00, dan ASTM C273 – 00.

3.3 Konfigurasi gedung yang ditinjau

Bentuk konfigurasi gedung yang dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah rumah permanen *knock-down* 1, 2 dan 3 lantai dengan ukuran panjang, lebar dan tinggi berturut – turut adalah sebagaimana Tabel 3.3 . Rumah tersebut menggunakan *bearing*

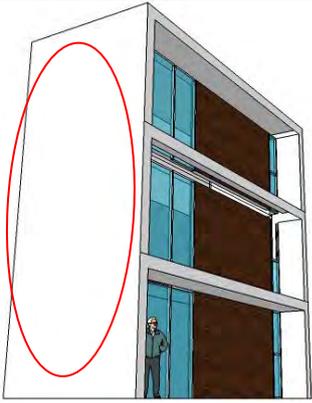
wall system yang elemennya tersusun dari panel – panel sandwich pada bagian lantai, dinding dan atapnya (lihat Gambar 3.5). Panel sandwich untuk dinding memiliki ukuran 1000 mm x 3000 mm.



Gambar 3.5 (a) Rumah tinggal *knock down* 1 lantai (b) Rumah tinggal terangkai

Tabel 3.3 Dimensi rumah – rumah yang dipertimbangkan

Tipe Rumah	Bentuk morfologi	Dimensi		
		P (m)	L (m)	H (m)
1 lantai	<p>bagian panel yang ditinjau</p>	9	3	3
2 lantai	<p>bagian panel yang ditinjau</p>	9	3	6

3 lantai	 <p data-bbox="376 651 719 685">bagian panel yang ditinjau</p>	9	3	9
----------	---	---	---	---

3.4 Beban pada panel

Pembebanan gravitasi dan angin mengacu pada peraturan PPIUG 1983, sementara pembebanan gempa mengacu pada peraturan SNI 1726 2012. Rumah ditinjau dalam keadaan terkritik dengan kondisi tanah lunak dan dalam zona gempa tinggi dengan nilai $S_s = 2.5 \text{ g}$ and $S_1 = 1.2 \text{ g}$.

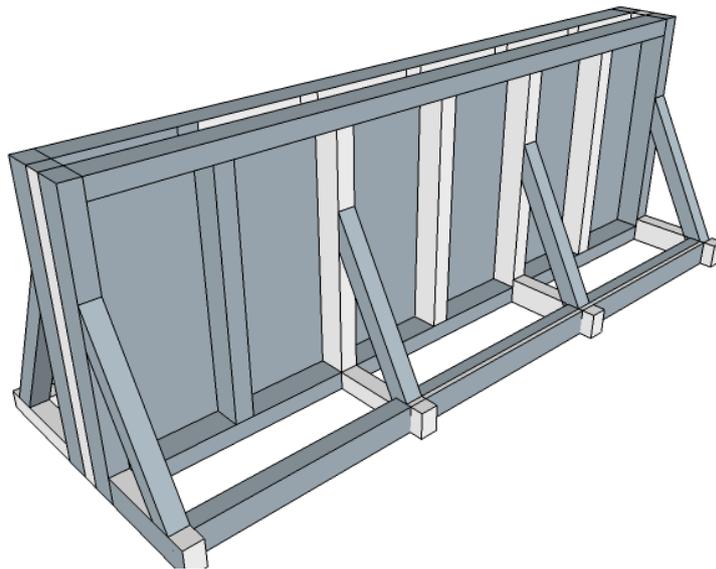
3.5 Analisa elemen hingga penentuan tebal skin dan core panel

Analisa elemen hingga dilakukan menggunakan program bantu ABAQUS 6.10-1. Panel dianalisa menggunakan *shell composites* 3 dimensi dengan mode lamina. Mode lamina sendiri adalah suatu fasilitas di dalam ABAQUS yang diperuntukkan untuk analisa pelat – pelat *orthotropic*, yang mana panel sandiwich ini masuk ke dalam kategori itu. Ketebalan *skin* dan *core* ditentukan oleh analisa tegangan ultimit panel dan drift panel (untuk beban gempa) dibandingkan dengan kapasitas panel dan simpangan ijin bangunan sesuai SNI 1726 2012. Ketebalan total panel direkomendasikan untuk paling sedikit 80 mm mengingat kebutuhan – kebutuhan ketebalan minimal untuk *thermal insulation*, stabilitas, dan lebar kusen di pasaran. Perubahan-perubahan prosedur desain dan mode desain untuk keperluan verifikasi mungkin dilakukan untuk mengikuti hasil dari pengujian.

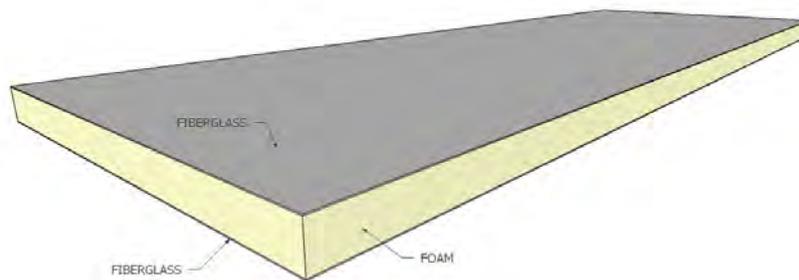
3.6 Pabrikasi panel

Panel terdiri dari dua *skin* fiberglass dan sebuah RPUF *core* dimana fiberglass akan diproduksi menggunakan metode *vaccum infusion* sementara untuk menjadi panel, kedua fiberglass digabungkan menggunakan sebuah bekisting yang kemudian diisi

dengan cairan RPUF, dibiarkan selama satu hari sampai paduan komposit tersebut menyatu.



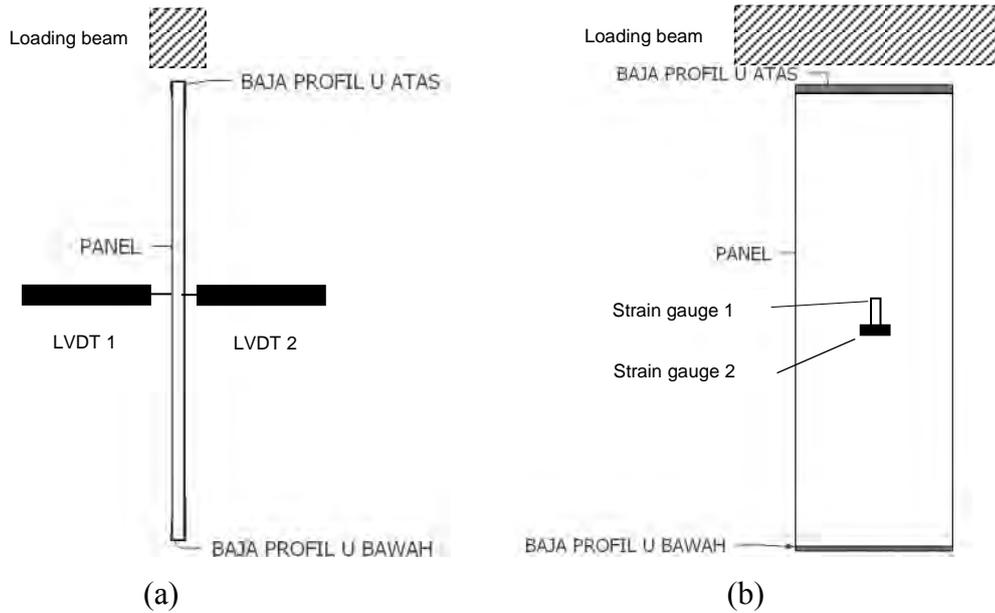
Gambar 3.6 Model bekisting untuk pembuatan panel



Gambar 3.7 Model panel rencana

3.7 Pengujian Tekan panel

Pengujian ini dilakukan untuk mensimulasi perilaku dinding ketika menerima beban vertical dari lantai di atasnya. Ukuran panel yang diuji direncanakan 500 mm x 1500 mm yang mewakili ukuran aktual panel (100 cm x 300 cm) dengan factor skala 1 : 2. Untuk mendistribusikan beban secara merata sepanjang lebar panel, baja profil U ditempatkan pada sisi atas dan bawah dari panel sebagaimana (Gambar 4.38). Dua buah LVDT dipasang untuk mengukur defleksi lateral pada setengah tinggi panel. Dua LVDT tersebut dibutuhkan untuk membuat verifikasi, bahwa pembacaan dari satu LVDT dapat saling dikontrol. Sementara untuk mendapatkan informasi tentang kondisi *skin* selama pengujian, dua buah *strain gauge* pada arah horizontal dan vertical diletakkan pada permukaan panel, juga pada posisi setengah ketinggian panel tersebut.



Gambar 3.8 Rencana posisi perlengkapan panel ketika diuji (a) posisi LVDT, tampak samping (b) posisi *strain gauge* tampak depan

3.8 Simulasi numerik pengujian tekan panel

Untuk memastikan bahwa pemodelan yang dijadikan acuan dalam menentukan dimensi benda uji tekan panel cukup memadai, maka dilakukan perbandingan ulang antara benda uji dengan model simulasi pada kondisi dimensi dan beban yang sama. Output dari simulasi ini adalah grafik kondisi tegangan normal vertikal (S_{22}) *skin* terhadap fungsi beban pada kondisi elastis, dipertimbangkan sampai beban ultimit.

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Skin Panel

4.1.1 Pengujian Gel time dan Peak Exothermic

Karena tipe resin ini memiliki *gel time* yang lebih fleksibel, maka perlu dicari prosentase katalis untuk mendapatkan *gel time* yang sesuai dengan kebutuhan seperti suhu ruangan produksi, ukuran produk, dan kehandalan perlengkapan *infusion*. Suhu ruangan menyebabkan *geltime* lebih cepat, sementara ukuran produk yang lebih besar membutuhkan waktu *geltime* yang cukup sampai proses *infusion* selesai. Sesuai ASTM D2471 99, pengujian *gel time* ini menggunakan volume resin 120 ml, dengan penambahan cobalt 0.3%, dan katalis bervariasi, diuji pada suhu laboratorium 30 °C dan pengadukan dilakukan secara manual. Untuk menjamin variable bebas hanya pada prosentase katalis, maka specimen diuji pada hari dan waktu yang sama, diambil dari satu sumber induk campuran resin dan cobalt 0.3%, kemudian dituangkan pada 5 buah gelas plastic untuk kemudian ditambahkan katalis dengan variasi 1%, 1,2%, 1.5%, 2%, dan 3%. **Gambar 4.1** menunjukkan bahwa semakin penambahan katalis menyebabkan penurunan *geltime* secara eksponensial.

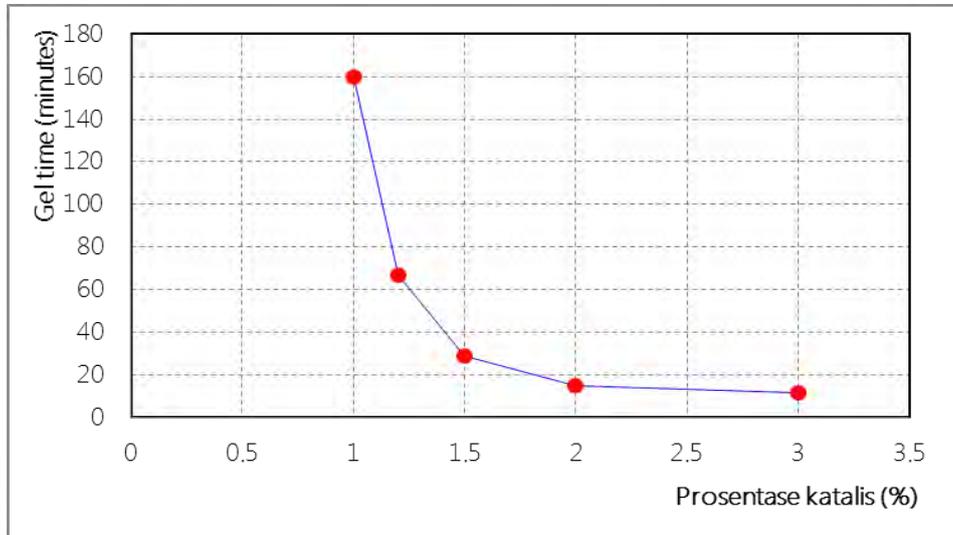


Gambar 4.1 Spesimen pengujian *gel time* dan *peak* eksotermik resin *vinylester*

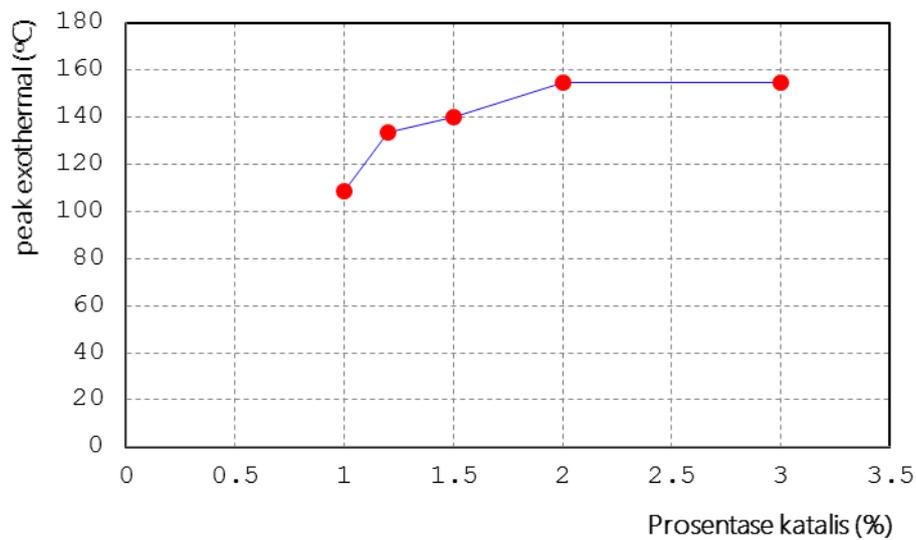
4.1.2 Pengujian *Peak Exothermic* Resin

Pengujian *peak exothermic* resin dilakukan bersamaan dengan pengujian *geltime*. Pengetahuan tentang besarnya suhu puncak resin ketika bereaksi dengan Cobalt dan Katalis menjadi penting sebagai bahan pertimbangan penentuan perlengkapan pabrikasi fiberglass, bahwa perlengkapan tersebut harus bisa menahan panas yang timbul selama reaksi berlangsung. Gambar 5.6 menunjukkan bahwa

penambahan katalis menyebabkan peningkatan peak eksotermal resin, yang asimtotis pada angka 154 °C.



Gambar 4.2 Grafik hubungan prosentase katalis dan *geltime* resin



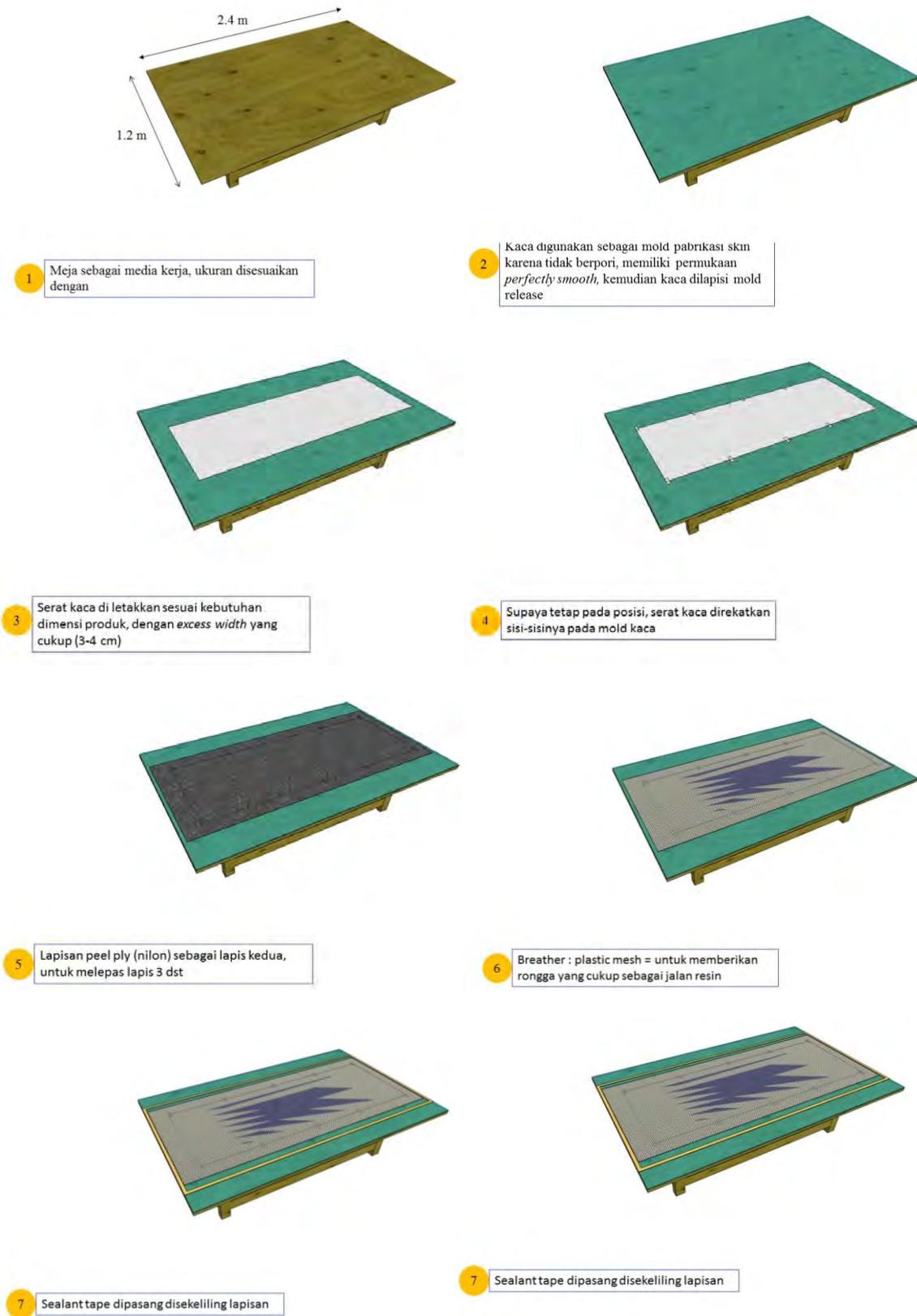
Gambar 4.3 Grafik hubungan prosentase katalis dengan peak eksotermal resin

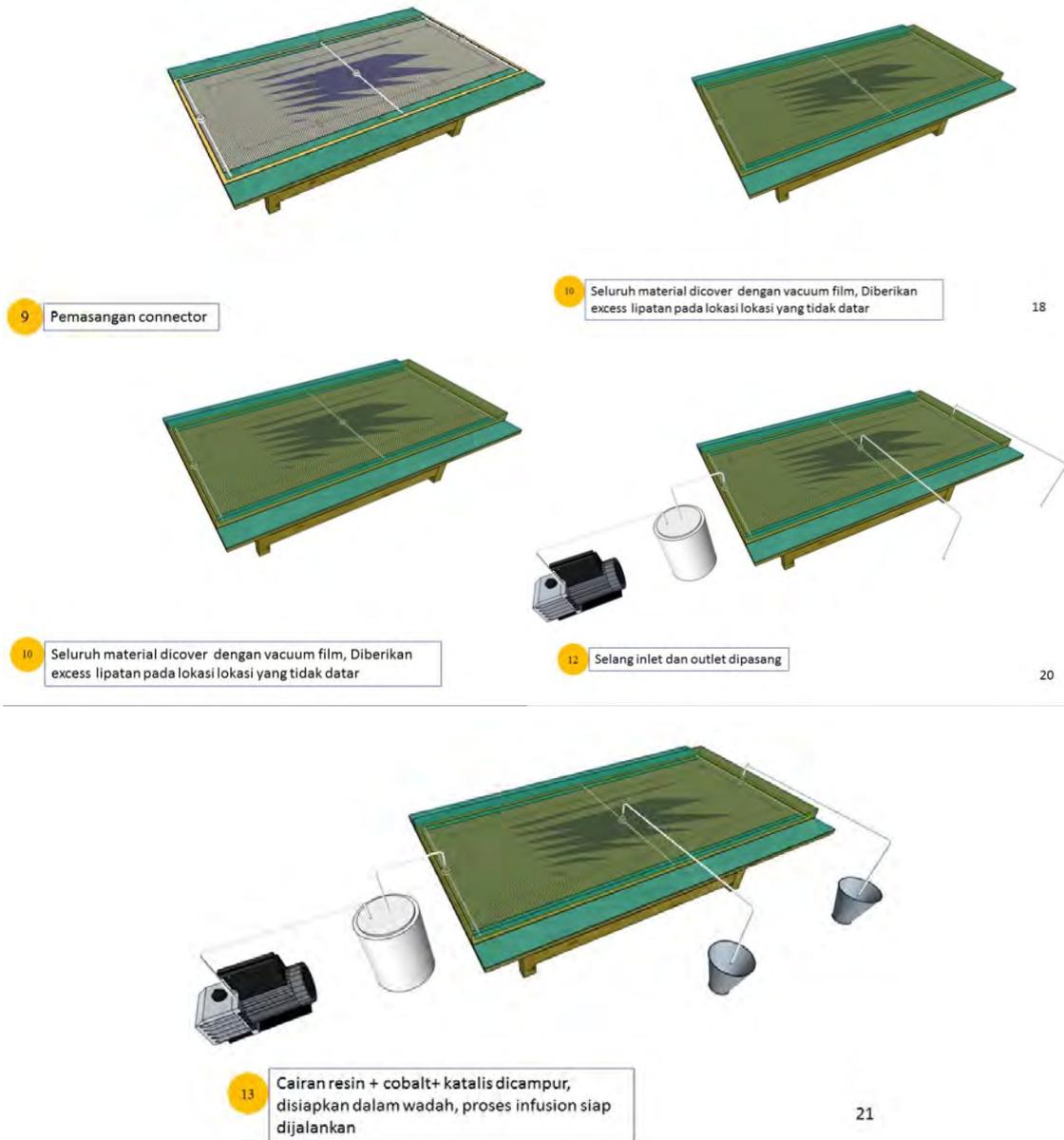
4.1.3 Pabrikasi fiberglass sheet

Lembaran fiberglass dibuat menggunakan metode *vaccum infusion* yang secara skematis diperlihatkan

Gambar 4.4 dengan langkah langkah sebagaimana

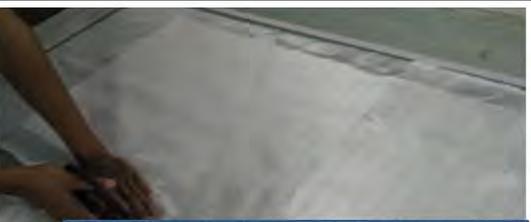
Tabel 4.1.

Gambar 4.4 Skema proses *vacuum infusion*



Tabel 4.1 Proses *Vacuum Infussion* di workshop

No	Kegiatan	Perlengkapan
1	 <p>1 <u>Menyiapkan cetakan datar untuk skin panel, melapisinya dengan release wax</u></p>	Peralatan : kain, meja, <i>glass mold</i> , sarung tangan, Bahan : double tape, release wax Lapisan release wax diperlukan untuk mempermudah melepas produk dari cetakan (<i>glass mold</i>)

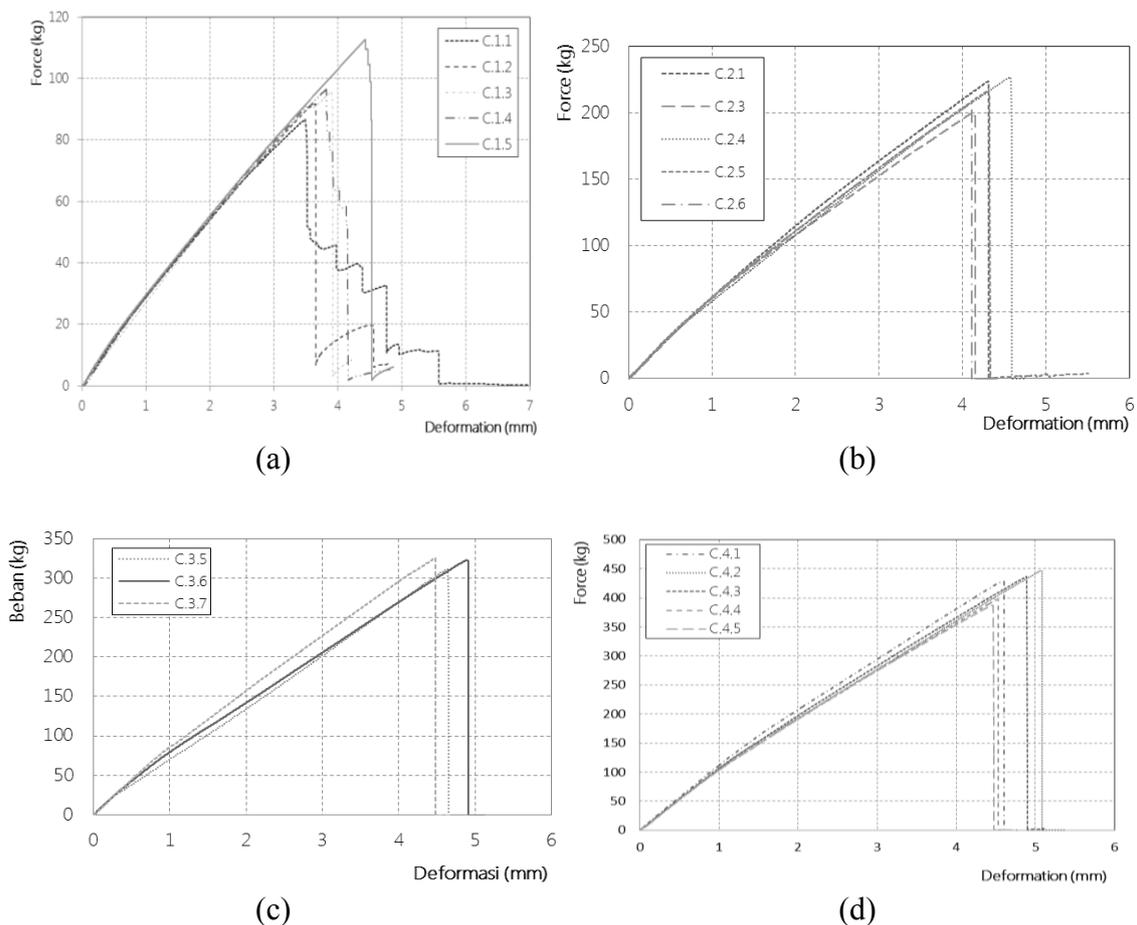
2	 <p data-bbox="371 472 823 568"><u>Meletakkan lapisan serat fiber pada cetakan, meratakan, dan memastikan serat fiber pada posisi yang sesuai</u></p>	<p>Peralatan : <i>Roller</i>, selotip kertas Bahan : Serat kaca,</p>
3	 <p data-bbox="371 797 823 920"><u>Meletakkan lapisan <i>peel ply</i>, ukurannya dibuat lebih lebar 5 cm terhadap ukuran serat fiber guna mempermudah proses pelepasan</u></p>	<p>Peralatan : Gunting, selotip keras Bahan : <i>peel ply</i></p>
4	 <p data-bbox="371 1167 823 1249"><u>Meletakkan lapisan <i>plastic mesh</i> sebagai <i>breather</i></u></p>	<p>Peralatan : Gunting, selotip kertas Bahan : <i>plastic mesh</i></p> <p>Tanpa lapisan <i>breather</i>, <i>vacuum infusion</i> tidak</p>
5	 <p data-bbox="371 1496 823 1579"><u>Meletakkan selang spiral (untuk meratakan aliran resin)</u></p>	<p>Peralatan : Gunting, selotip kertas Bahan : <i>T connector</i>, selang spiral</p>
6	 <p data-bbox="371 1825 823 1912"><u>Meletakkan lapisan plastik (<i>vacuum film</i>)</u></p>	<p>Peralatan : Gunting, selotip kertas Bahan : <i>Vacuum film</i></p>

7	 <p>7 Proses vakumisasi dimulai, tabung hijau sebagai resin catch pot agar resin tidak masuk ke dalam vacuum pump.</p>	<p>Peralatan : selang, resin catch pot, sealent Bahan : -</p>
8	 <p>8 Resin mulai mengalir di bawah vacuum film.</p>	<p>Peralatan : Ember, vacuum pump, Bahan : Resin</p>
9	 <p>9 Dua buah inlet digunakan mempercepat proses vakumisasi</p>	<p>Peralatan : Ember, vacuum pump, Bahan : Resin</p>
10	 <p>10 Vakumisasi selesai, kondisi specimen setelah 24 jam, bagian tepi perlu digunting sejarak 10 cm untuk mempermudah melepas lapisan peel ply</p>	<p>Peralatan : Gunting Bahan : -</p>
11	 <p>11 Lapisan peel ply ditarik, dilepas dari lapisan fiberglass.</p>	<p>Terbukti, dengan keberadaan lapisan peel ply, proses pengelupasan menjadi lebih mudah.</p>
12	 <p>12 Hasil akhir fiberglass setelah lapisan peel ply seluruhnya dilepas</p>	<p>Vacuum infusion menghasilkan fiberglass dengan volume rasio lebih besar.</p>

4.1.4 Pengujian Tarik fiberglass

4.1.4.1 *Fiberglass tipe cloth*

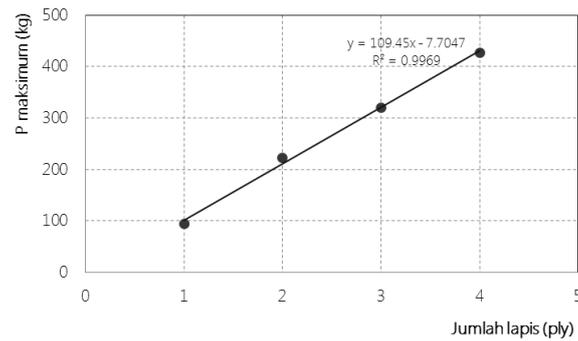
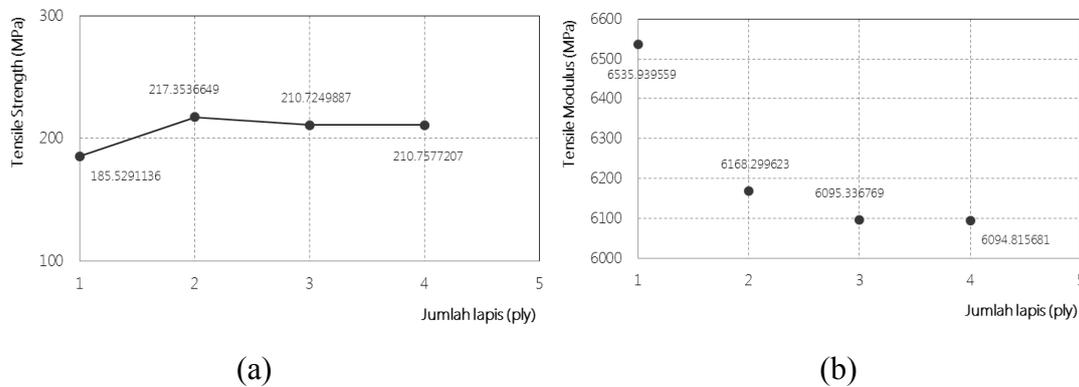
Pengujian tarik dilakukan pada 4 variasi lapisan fiber, yaitu 1, 2, 3, dan 4 lapis pada fiberglass yang memiliki kerapatan 1.86 g/cm^3 . Pengujian dilakukan berdasarkan ASTM D 638-03, dengan kecepatan pengujian sebesar 5 mm/menit terhadap benda uji tipe III. Gambar 4.5 memperlihatkan hasil pengujian dari keempat variasi lapisan dari fiberglass yang diuji, dibuat untuk mengetahui pada angka berapa nilai beban tarik maksimum, *tensile strength*, dan *tensile modulus* konvergen, seiring dengan penambahan jumlah lapis serat dalam fiberglass. Diketahui bahwa penambahan jumlah lapis fiberglass menyebabkan kenaikan P maksimum secara linear, menghasilkan nilai *tensile strength* di kisaran 210 MPa dan *tensile modulus* di angka 6100 MPa .



Gambar 4.5 Hasil pengujian tarik fiberglass dengan serat kaca tipe *cloth* (a) 1 lapis (b) 2 lapis (c) 3 lapis (d) 4 lapis

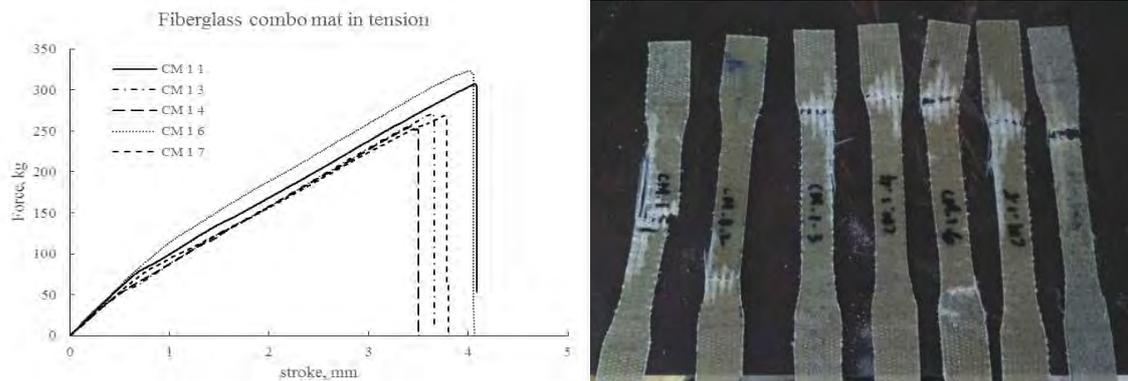
Tabel 4.2 Dimensi benda uji Tarik fiberglass tipe *cloth*

Benda uji	Dimensi		
	Tebal mm	Lebar mm	Area mm ²
C1	0.25	20	5
C2	0.5	20	10
C3	0.75	20	15
C4	0.95	20	19

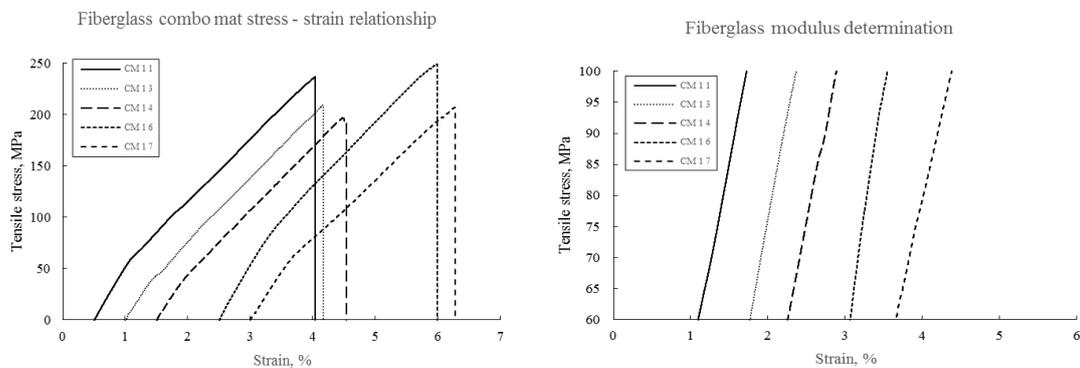
**Gambar 4.6** Grafik hubungan jumlah lapis dalam fiberglass terhadap beban tarik P maksimum yang dapat ditahan**Gambar 4.7** (a) Grafik hubungan jumlah lapis serat terhadap kekuatan tarik fiberglass
(b) Grafik hubungan jumlah lapis *fiber (ply)* terhadap tensile modulus fiberglass

4.1.4.2 Fiberglass tipe *combo mat*

Pengujian fiberglass tipe *combo mat* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana perubahan sifat mekanis bahan ketika tipe serat yang digunakan berbeda, baik secara komposisi maupun secara kerapatan. Dari pengujian 1 lapis serat didapatkan nilai kuat tarik, modulus elastisitas, *strain to failure* berturut-turut sebesar 216 MPa, 6389 MPa, dan 3.30%.



(a) (b)
Gambar 4.8 (a) hasil pengujian tarik fiberglass combo mat (b) model kegagalan benda uji fiberglass tipe combo mat



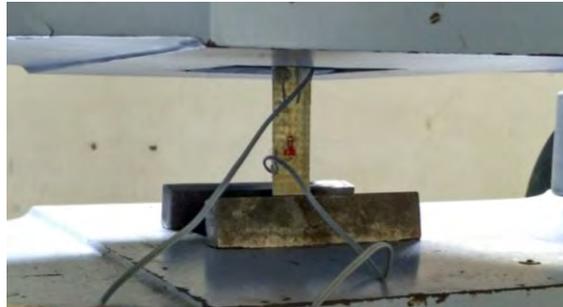
(a) (b)
Gambar 4.9 (a) Grafik hubungan tegangan – regangan fiberglass combo mat (b) Penentuan modulus tarik fiberglass

Tabel 4.3 Data pengujian tarik fiberglass combo mat 1 lapis

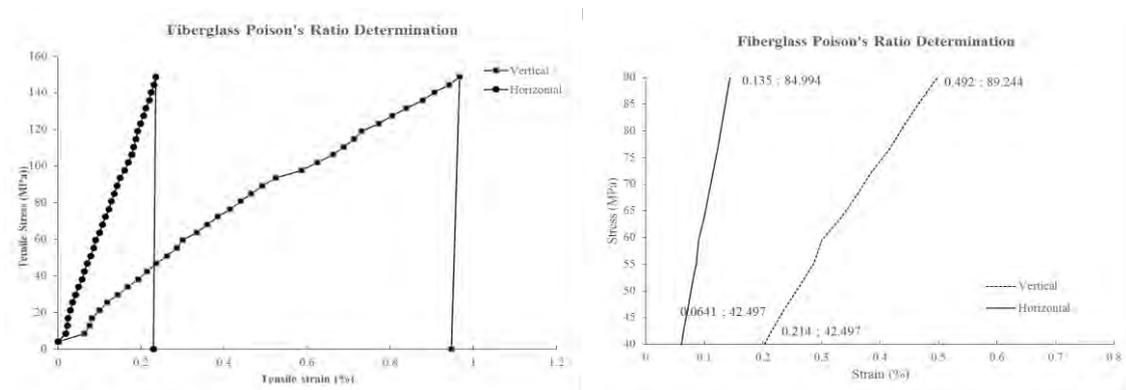
Benda uji	Dimensi			Kuat Tarik	Modulus Elastisitas	Strain to Failure
	b	t	L			
	mm	mm	mm	Mpa	MPa	%
CM 1 1	13	1.05	115	221	5896	3.54
CM 1 3	12.8	0.97	115	215	6944	3.18
CM 1 4	12.7	0.96	115	206	6593	3.04
CM 1 6	13.1	1.1	115	220	6617	3.49
CM 1 7	12.6	0.96	115	218	5897	3.28
Rata - rata				216	6389	3.30

4.1.5 Penentuan Poisson's ratio

Poisson's ratio ditentukan melalui mekanisme tarik pada benda uji fiberglass combo mat 2 lapis yang diproduksi menggunakan metode *vacuum infusion*. Dari pengujian didapatkan nilai poisson ratio = $\mu = -(d\varepsilon_t / dP) / (d\varepsilon_a / dP) = 0.28$.



Gambar 4.10 Pengujian poisson' ratio fiberglass melalui mekanisme tarik



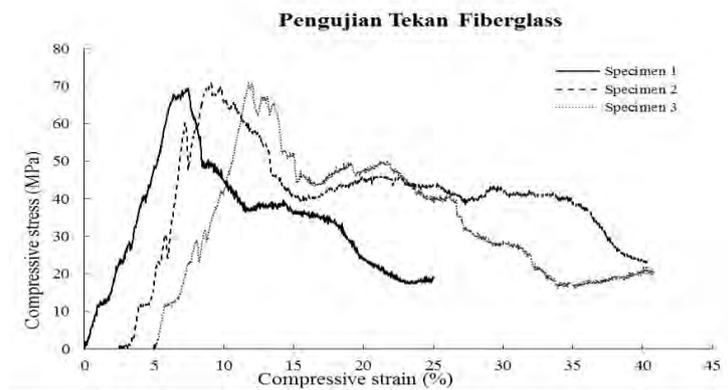
(a)

(b)

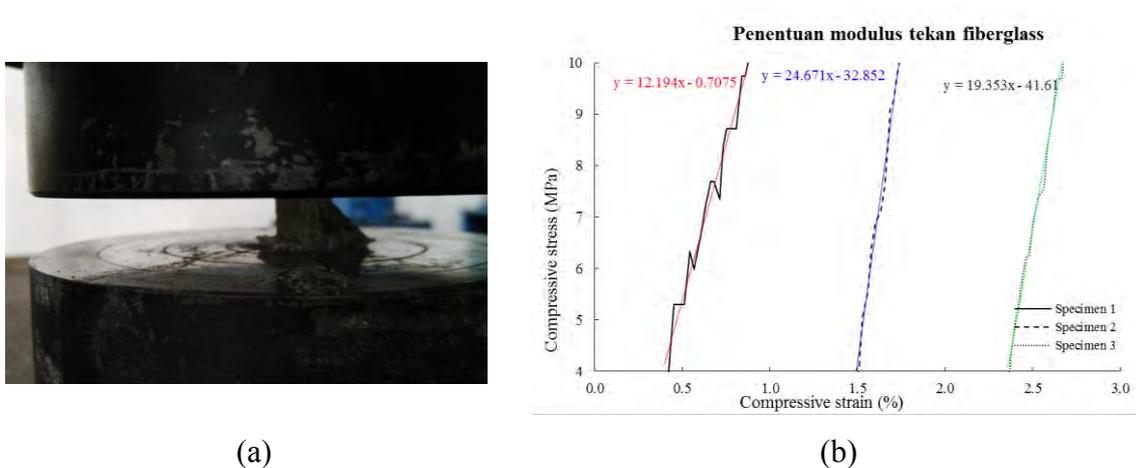
Gambar 4.11 (a) Grafik hubungan tegangan - regangan fiberglass arah vertical (longitudinal) dan horizontal (transversal) (b) Penentuan *poisson's ratio* fiberglass

4.1.6 Pengujian Tekan Fiberglass

Pengujian tekan fiberglass dilakukan pada 3 (tiga) spesimen dari resin *vinylester* dan serat kaca combo mat 7 lapis yang dipabrikasi menggunakan metode *vacuum infusion*. Pengetesan dilakukan pada suhu ruangan laboratorium 28°C dengan kecepatan 5 mm/menit, berdasarkan ASTM D 695 – 02. Dari pengujian didapatkan nilai kuat tekan dan modulus tekan fiberglass berturut-turut sebesar 70 MPa dan 1877 MPa. Jelas bahwa nilai modulus fiberglass pada mode tekan jauh lebih kecil dibandingkan dengan modulus fiberglass pada mode tarik. Hal ini diakibatkan oleh aspek komposit di dalam fiberglass bahwa pada mode tarik serat fiberglass cenderung menentukan nilai elastisitas sedangkan pada mode tekan, properties dari resinlah yang lebih menentukan.



Gambar 4.12 Pengujian tekan fiberglass



Gambar 4.13 (a) Keadaan spesimen ketika pengujian tekan fiberglass (b) Penentuan modulus tekan fiberglass

Tabel 4.4 Kuat tekan dan modulus tekan fiberglass

Benda uji	Dimensi			Kuat Tekan	Modulus Tekan
	b	t	L		
	mm	mm	mm	Mpa	MPa
CP1	12.7	7.2	19.1	69.5	1220
CP2	12.7	7.3	19.15	71.0	2470
CP3	12.85	7.4	19.15	71.0	1940
Rata - rata				70	1877

4.1.7 Pengujian Geser Fiberglass

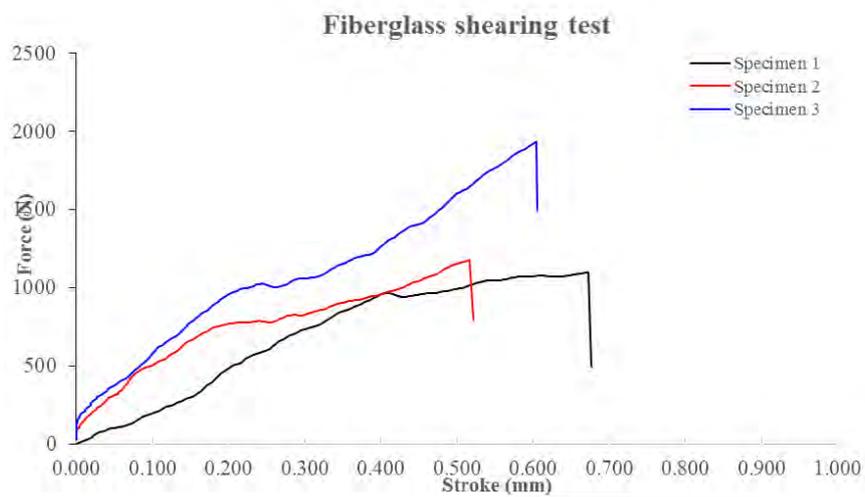
Pengujian geser fiberglass dilakukan menurut ASTM D3846 – 02 pada tiga buah benda uji fiberglass combo mat 7 lapis sebagaimana Gambar 4.14. Pengujian geser fiberglass menghasilkan grafik yang menunjukkan bahwa material ini getas (Gambar 4.15) dan diketahui bahwa kuat geser fiberglass tersebut adalah 3.02 MPa.



(a)

(b)

Gambar 4.14 (a) Pengujian geser fiberglass (b) Mode kegagalan geser fiberglass



Gambar 4.15 Grafik hubungan beban dan deformasi pengujian geser fiberglass

Tabel 4.5 Kuat geser fiberglass

Benda uji	Dimensi		F maks	Kuat geser
	b	L		
	mm	mm	N	MPa
SR1	12.6	36	1096.1	2.416
SR2	12.7	36.2	1179.7	2.566
SR3	12.85	36.8	1934.3	4.090
Rata - rata			1403	3.024

4.2 Core Panel

4.2.1 Pabrikasi Spesimen Rigid Polyurethane Foam

Spesimen Rigid polyurethane foam dibuat dengan mencampurkan dua komponen, *polyol*, (resin, RF50593 / 7-25A, light brown liquid) dan *diisocyanate* (hardener, RF50593 / 7-25B, dark brown liquid), produk dari Asia Polyurethane Pte Ltd, dengan rasio pencampuran 1:1 (*volume based*). Kemudian, campuran tersebut dituang ke dalam cetakan yang bereaksi pada mode *free rise* dan dibiarkan mengeras selama minimal 12 jam sebelum dapat dilepas dari cetakan. Setelah memotong bagian yang berlebih (bagian yang lebih renggang pada area atas, Gambar 4.16), produk menghasilkan kerapatan 48.5 kg/m^3 (ASTM D1622 – 03).



Gambar 4.16 Pabrikasi specimen Rigid PU foam untuk pengujian kerapatan dan pengujian tekan



(a)

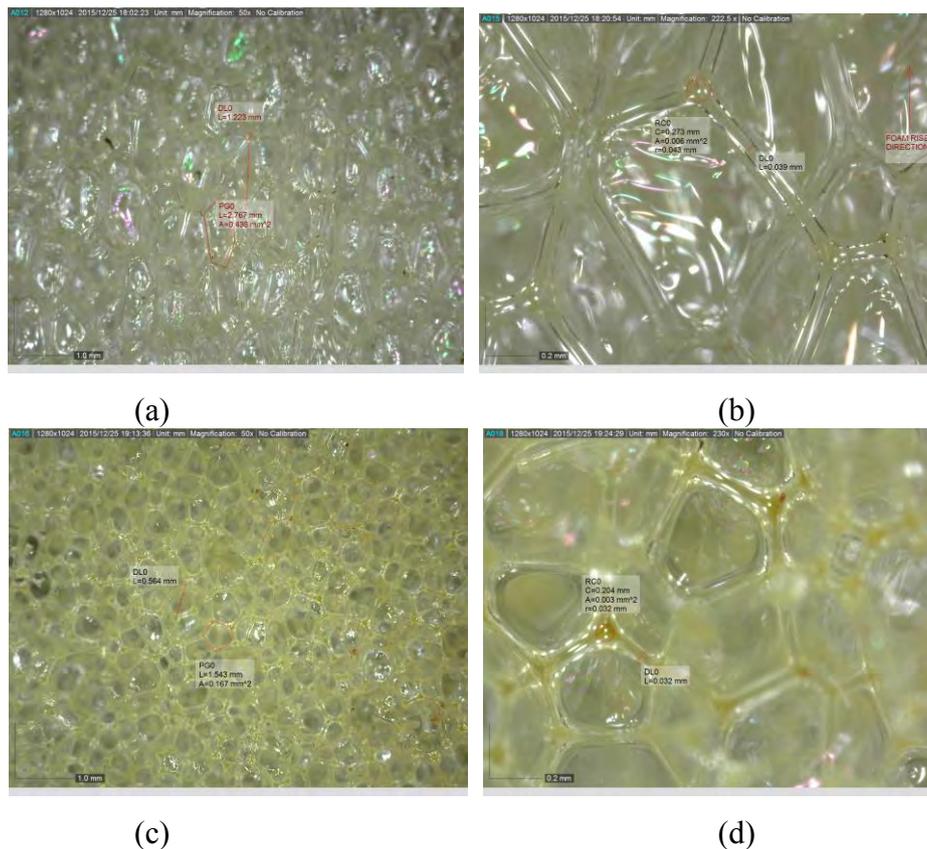


(b)

Gambar 4.17 Media pabrikasi Rigid PU foam (a) cetakan beton kubus untuk specimen tarik (b) bekisting kayu untuk specimen geser.

4.2.2 Micro CT – Imaging Sel Rigid Polyurethane Foam

Observasi ini dilakukan untuk mempelajari struktur sel, item yang memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanisnya, dilakukan menggunakan Dino-Lite® digital microscope. memperlihatkan bahwa sel secara garis besar termasuk kategori sel tertutup (*closed cells*) yang terdiri dari *strut* dan selaput tipis, dimana *struts* membentuk sisi – sisi sel, sementara selaput tipis menutupi dinding sel. Ketebalan dari sel dan *strut*, jarak antar sel, pada potongan memanjang terlihat lebih lebar namun lebih tipis dan kurang kaku dibandingkan dengan apa yang ada pada potongan melintang, diindikasikan oleh warna bahwa sel-sel pada potongan memanjang terlihat lebih kuning, warna dari area dimana komponen utama yang membentuk *foam* polyurethane dalam jumlah besar terakumulasi di situ. Dua gambar tersebut juga menunjukkan kepada kita bahwa bentuk sel cenderung memanjang pada arah *foam rise*, menghasilkan sebuah material anisotropik dengan rasio anisotropik geometris (panjang sel pada arah memanjang : panjang sel pada arah melintang) sebesar $1.223 : 0.564 = 2.2$.



Gambar 4.18 Citra sel 2D (a) potongan memanjang (*foam rise dir.*) dengan pembesaran (M) 50X (b) Potongan memanjang M222.5X (c) potongan melintang M50X (d) potongan melintang M222.5X

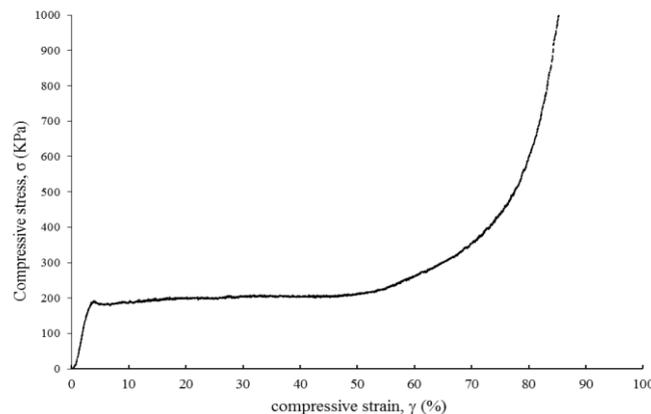
4.2.3 Pengujian Tekan Rigid Polyurethane *foam*

Pengujian dilakukan berdasarkan ASTM D1621 – 00 pada tiga buah specimen silinder yang mempunyai diameter 100 mm dan tinggi 80 mm pada kecepatan konstan 7.87 mm/min dan dibebani pada arah *foam rise*. Dari pengujian diketahui bahwa perilaku *foam* adalah bahwa deformasi muncul pada area yang dibebani (Gambar 4.19) atau pada area dasar, kemudian berkembang dan menyebar pada arah pembebanan, sampai sel sel *foam* tersebut mencapai titik leleh, membentuk daerah *plateu* sebelum mengalami densifikasi (*hardening*) ketika beban ditingkatkan (Gambar 4.20). Hasil pengujian ini sesuai dengan Gibson dkk (1997) sebagaimana dan dapat dikategorikan sebagai *foam* elastic plastic.

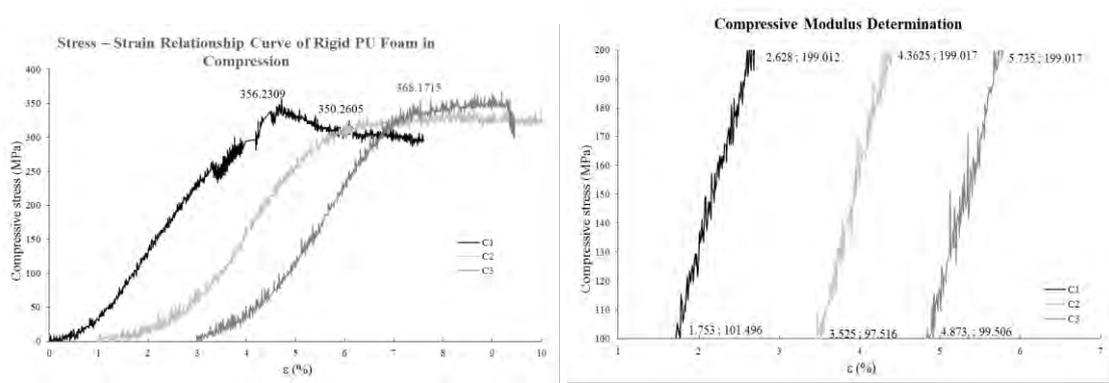


Gambar 4.19 Perilaku Rigid PU *foam* ketika dikenai beban tekan, dihentikan sebelum *hardening*

Untuk menghasilkan kuat tekan dan modulus tekan, pengujian dihentikan ketika specimen mencapai titik leleh, atau ketika deformasi mencapai nilai 5 mm. Dari data diketahui bahwa kuat tekan dan modulus tekan, berturut – turut 358.221 kPa dan 11602.8 kPa.



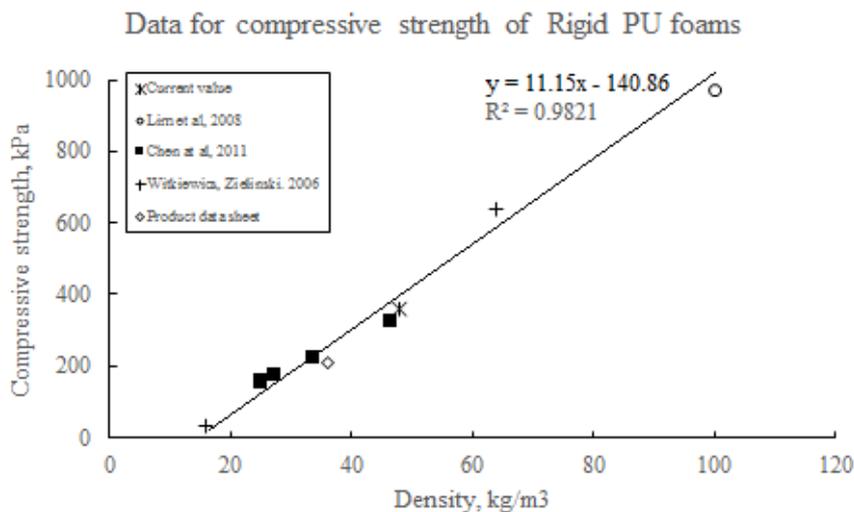
Gambar 4.20 Tipikal kurva elastic – plastic Rigid PU *foam* dalam kondisi tekan, dilanjutkan sampai *hardening*



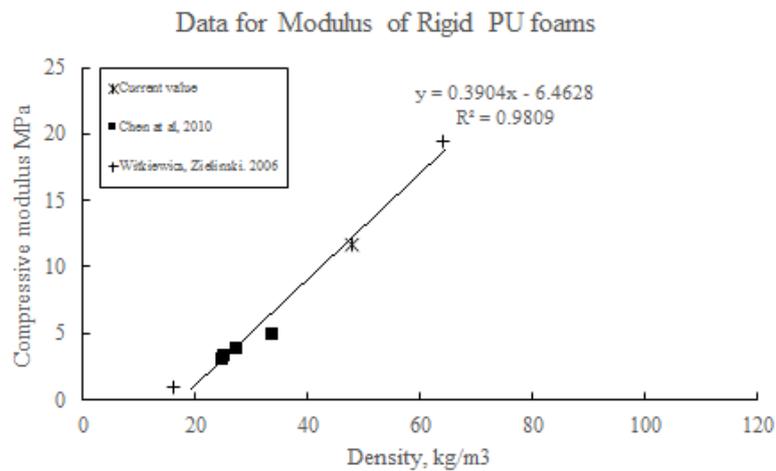
(a) (b)

Gambar 4.21 Hasil pengujian tes tekan (a) Kurva hubungan tegangan dan regangan Rigid PU foam dalam mode tekan (b) Penentuan modulus tekan

Verifikasi terhadap hasil dilakukan dengan membandingkan itu terhadap hasil dari peneliti lain seperti Lim dkk (2008), Chen dkk (2010), dan Witkiewicz & Zieliński (2006). Data pada Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 mengarah kepada kesimpulan bahwa kerapatan yang lebih tinggi memberikan kekuatan tekan dalam sebuah persamaan linear $y = 11.15x - 140.86$ dengan R squared value lebih dari 98%. Kesimpulan yang sama juga diperoleh oleh perbandingan modulus, yang memberikan tingkat dependensi yang kuat dengan nilai R squared value sebesar 95%. Jadi, dapat dikatakan bahwa nilai – nilai hasil pengujian ini telah berada pada jangkauan yang benar.



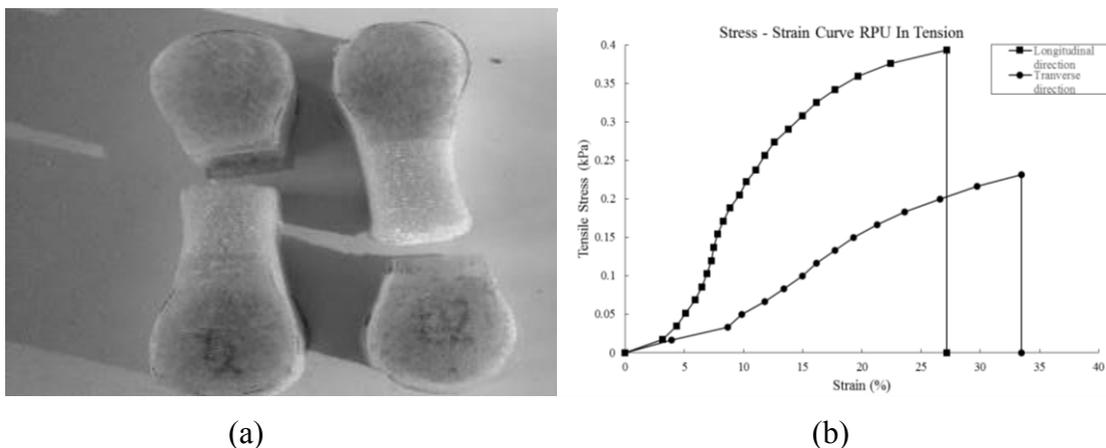
Gambar 4.22 Perbandingan kekuatan tekan dari beberapa Rigid PU foam



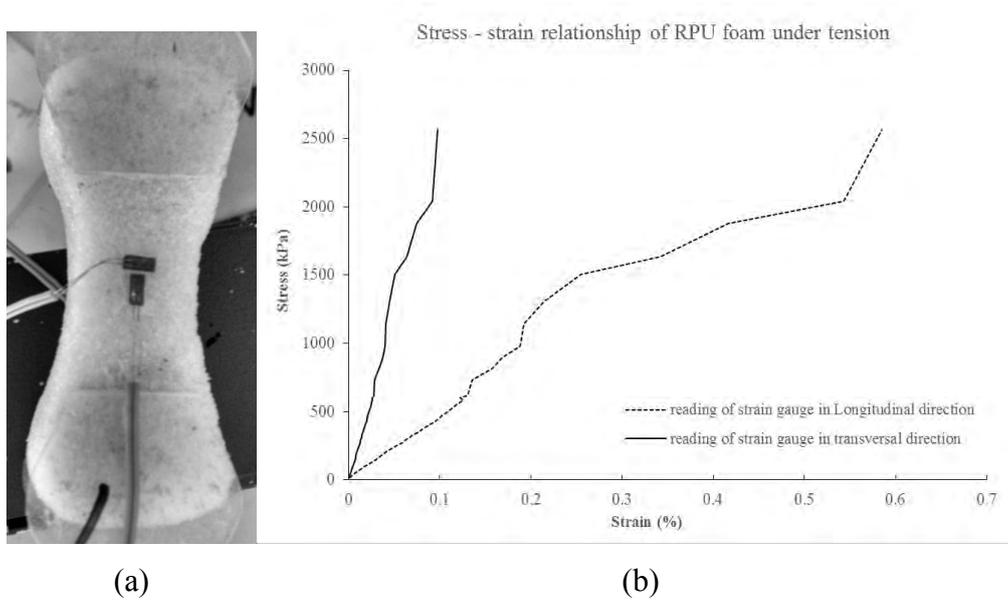
Gambar 4.23 Perbandingan modulus tekan dari beberapa Rigid PU foam

4.2.4 Pengujian tarik dan penentuan *poisson's ratio Rigid Polyurethane Foam*

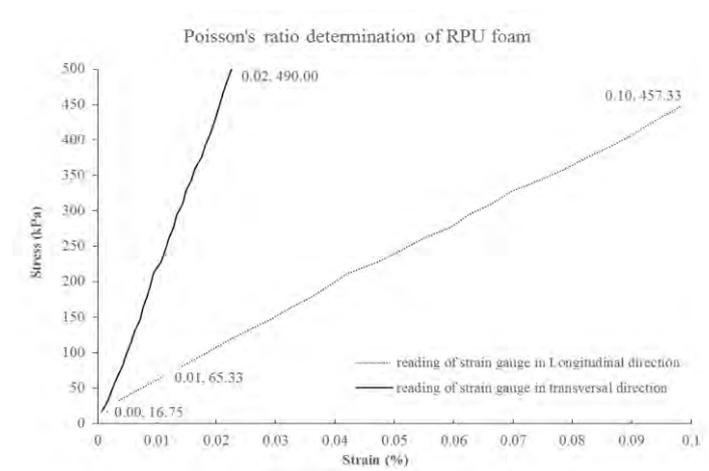
Pengujian ini dilakukan berdasarkan ASTM D1623 – 03 untuk menentukan kekuatan dari Rigid Polyurethane Foam terhadap tarik statis. Spesimen untuk masing – masing arah, *foam rise* (L) dan arah transversal (T) dipersiapkan dalam bentuk dog bone dengan luas penampang sebesar 600 mm² dan jarak antar grip sebesar 25.4 mm. Dari pengujian kita mendapatkan kekuatan tarik untuk T dan L berturut-turut sebesar 229 kPa dan 393 kPa, modulus tarik untuk T dan L berturut-turut sebesar 929 kPa dan 3256 kPa, dan regangan maksimum L dan T berturut – turut sebesar 0.276 dan 0.334. Poisson's ratio Rigid Polyurethane foam juga ditentukan melalui pengujian ini dengan nilai $\mu = -(d\varepsilon_t / dP) / (d\varepsilon_a / dP) = 0.184$.



Gambar 4.24 (a) Model kegagalan RPU foam setelah pengujian tarik (b) Kurva hubungan tegangan dan regangan tarik RPU foam.



Gambar 4.25 (a) Posisi strain gauge pada spesimen longitudinal (b) Kurva hubungan tegangan – regangan *foam* RPU *foam* untuk arah vertikal dan horizontal



Gambar 4.26 Penentuan *poisson's ratio* RPU *foam*

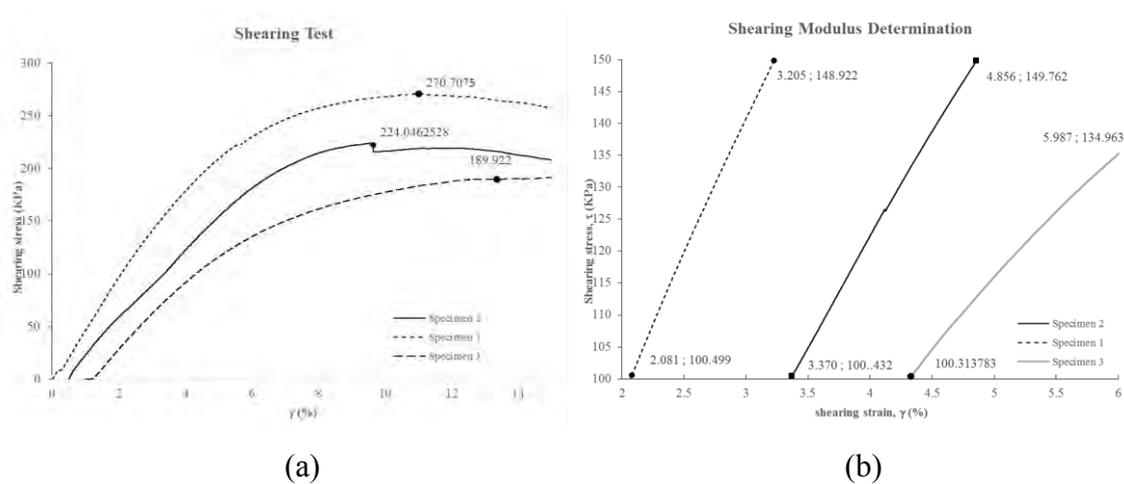
4.2.5 Pengujian Geser Rigid Polyurethane *Foam*

Pengujian geser ini dilakukan melalui mekanisme tarik berdasarkan ASTM C273 – 00 menggunakan Shimadzu AG X pada specimen RPU *foam* berbentuk balok dengan kecepatan pengujian sebesar 0.5 mm/menit. Spesimen secara rigid ditahan oleh pelat baja pada kedua permukaan dengan ketebalan 8 mm atau dengan kekakuan bending per satuan lebar, $D = EI / b = 8.533 \text{ MN-mm}^2/\text{mm}$. Untuk menjamin bahwa kegagalan ada pada badan *foam*, dua step proses pengeleman menggunakan resin

polyester dilakukan untuk merekatkan *foam* ke pelat baja setelah sebelumnya beberapa irisan-irisan dibuat pada badan *foam*, untuk memperbesar luas permukaan rekatan. Gambar 4.27 memperlihatkan bahwa pelat baja dan resin menunjukkan performa yang memuaskan karena kegagalan terjadi pada badan *foam* tanpa menimbulkan gaya kupas (*peel force*) pada area rekatan (*bonded area*). Dari pengujian diketahui bahwa kuat geser dan modulus geser dari RPU *foam* berturut – turut sebesar 228 kPa, dan 3240 kPa.



Gambar 4.27 Spesimen pengujian geser dan peralatannya



Gambar 4.28 (a) Grafik hubungan tegangan – regangan geser RPU *foam* (b) penentuan modulus geser RPU *foam*.

4.3 Rekapituasi Nilai Hasil Pengujian *Skin* dan *Core*

Tabel 4.6 menunjukkan nilai rekapitulasi hasil pengujian skin dan core. Data ini nantinya akan digunakan sebagai input program ABAQUS untuk penentuan kebutuhan dimensi panel.

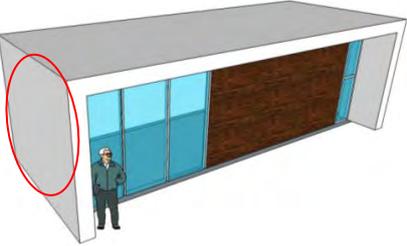
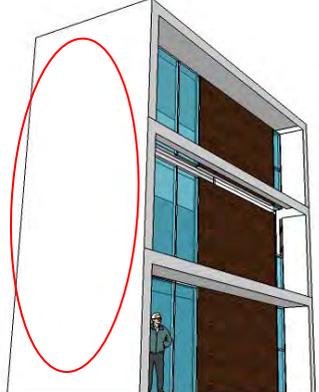
Tabel 4.6 Rekapitulasi nilai hasil pengujian

Spesimen	Parameter	Nilai	Satuan	Referensi
Fiberglass	Kerapatan	1500	Kg/m ³	-
	Kuat tarik	216	MPa	ASTM D 638 – 03
	Modulus tarik	6389	MPa	
	<i>Poisson's ratio</i>	0.28	N/A	
	<i>Strain to failure</i>	3.3	%	
	Kuat tekan	70	MPa	ASTM D 695 – 02
	Modulus tekan	1877	MPa	
	Kuat geser	3.02	MPa	ASTM D3846 – 02
RPU foam	Kerapatan	48.5	Kg/m ³	ASTM D1622 – 03
	Kuat tarik (L)	393	kPa	ASTM D1623 – 03
	Kuat tarik (T)	229	kPa	
	Modulus tarik (L)	3256	kPa	
	Modulus tarik (T)	929	kPa	
	<i>Poisson's ratio</i>	0.184	N/A	
	<i>Strain to failure</i> (L)	27.6	%	
	<i>Strain to failure</i> (T)	33.4	%	
	Kuat tekan	358.221	kPa	ASTM D1621 – 00
	Modulus tekan	11602.8	kPa	
	Kuat geser	228	kPa	ASTM C273 – 00
	Modulus geser	3240	kPa	

4.4 Analisa Numerik Penentuan Dimensi Panel

Bangunan yang ditinjau merupakan rumah sederhana 1, 2 dan 3 lantai, didesain menggunakan sistem dinding penumpu, yang semua elemen bangunannya terdiri dari panel sandwich fiberglass-foam. Ukuran dan morfologi rumah-rumah tersebut, termasuk bagian panel yang dipertimbangkan dalam desain ditunjukkan oleh Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Tipe dan ukuran rumah - rumah sederhana yang ditinjau

Tipe Rumah	Bentuk morfologi	Dimensi		
		P (m)	L (m)	H (m)
1 lantai	 bagian panel yang ditinjau	9	3	3
2 lantai	 bagian panel yang ditinjau	9	3	6
3 lantai	 bagian panel yang ditinjau	9	3	9

4.4.1 Beban-beban yang bekerja

Perhitungan beban pada Panel tipe 1 (bangunan 1 lantai) :

1. Beban Atap

Dead load (DL)

$$\begin{aligned} \text{Berat sendiri atap} &= 10 \text{ kg/m}^2 \\ \text{Berat plafon + penggantung} &= \frac{18}{28} \text{ kg/m}^2 \\ &28 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{DL atap yang ditahan dinding} = 1/3 \times 28 \times 1.5 = 14 \text{ kg/m}^2 = 0.137 \text{ N/mm}^2.$$

Live load (LL)

$$\text{Beban hujan} = 40 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{LL atap yang ditahan dinding} = 1.3 \times 40 \times 1.5 = 20 \text{ kg/m}^2 = 0.1962 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Beban atap total (DL+LL)} = 68 \text{ kg/m}^2$$

2. Beban Dinding

$$\text{Berat } top \text{ skin (1.8 mm)} = 2.7 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Berat } core \text{ (foam 96.4 mm)} = 4.627 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Berat } bottom \text{ skin (1.8 mm)} = \frac{2.7}{10.0} \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Berat panel total} = 10.0 \text{ kg/m}^2$$

3. Beban Angin

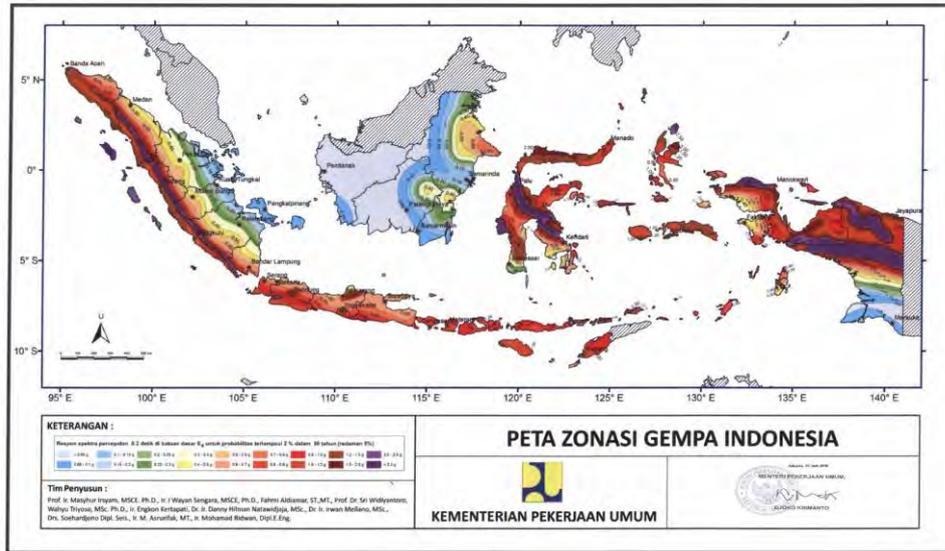
$$\text{Beban angin terkritis (dekat pantai)} = 40 \text{ kg/m}^2 = 0.0003924 \text{ N/mm}^2.$$

4. Beban Gempa

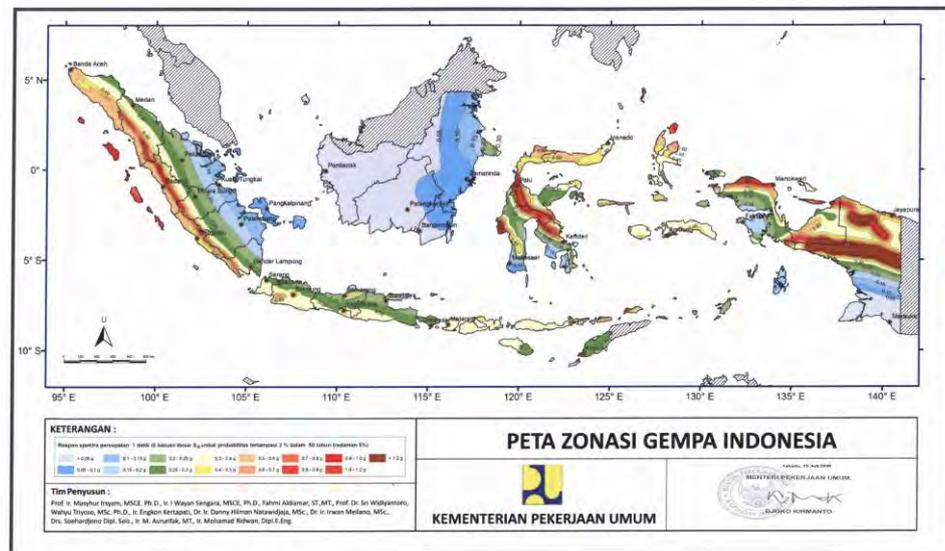
a) Kelas situs yang dipertimbangkan

Agar desain dapat berlaku secara umum pada sebarang lokasi di Indonesia, maka kelas situs yang dipertimbangkan adalah kelas situs yang masuk kategori – kategori terburuk, yaitu kelas situs SE (tanah lunak).

b) Parameter respons spektral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek $T = 0.2$ detik dan 1 detik dipilih untuk kondisi terkritis yaitu diambil nilai $S_s = 2.5g$ (lihat Gambar 4.29) dan $S_1 = 1.2g$ (Gambar 4.30).



Gambar 4.29 S_s , Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget (MCE_R) kelas situs SB.



Gambar 4.30 S_1 , Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget (MCE_R) kelas situs SB

- a) Koefisien situs $F_a = 0.9$ (Tabel 4 SNI 1726 2012 atau Tabel 4.8 di bawah ini),
 dan $F_v = 2.4$

Tabel 4.8 Koefisien Situs (F_a)

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada perioda pendek, $T = 0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS ^b				

Tabel 4.9 Koefisien Situs (F_v)

Kelas situs	Parameter respons spectral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada perioda pendek, $T = 1$ detik, S_1				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS ^b				

- a) Parameter spectrum respon percepatan pada periode pendek dan 1 detik

$$S_{MS} = F_a \times S_s = 0.9 \times 2.5 = 2.25$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 = 2.4 \times 1.2 = 2.88$$

- b) Parameter percepatan spectrum desain

Parameter percepatan spectrum respons desain dalam rentang periode pendek :

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} = \frac{2}{3} \times 2.25 = 1.5$$

Parameter percepatan spectrum respons desain dalam rentang periode 1 detik :

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} = \frac{2}{3} \times 2.88 = 1.92$$

- c) Faktor Reduksi gempa

Gempa direncanakan menggunakan gempa elastis dengan faktor reduksi $R = 1.6$.

d) Faktor keutamaan gempa

Berdasarkan Tabel 1 SNI 1726-2012 bangunan yang dirancang masuk ke dalam Kategori Risiko Bangunan II. Bangunan dengan Kategori Risiko tersebut mempunyai nilai $I_e = 1$ (Tabel 2 SNI 1726-2012).

e) Perhitungan Periode (T_a)

$$T_a = C_t \times H_n^x = 0.0488 \times 3^{0.75} = 0.11123994 \text{ detik}$$

f) Perhitungan koefisien respons seismic, $C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{1.5}{\left(\frac{1.6}{1}\right)} = 0.9375$

$$C_{s \max} = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{1.92}{0.111 \left(\frac{1.6}{1}\right)} = 10.78749191$$

$$C_{s \min 1} = 0.044 S_{DS} I_e = 0.044 \times 1.5 \times 1 = 0.066 \geq 0.01$$

$$C_{s \min 2} = \frac{0.5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{0.5 \times 1.2}{\left(\frac{1.6}{1}\right)} = 0.375 \text{ (OK)}$$

Jadi dipakai $C_s = 0.9375$.

g) Berat total struktur

Beban atap	= $68 \times 9 \times 3$	= 1836	kg
Beban dinding	= $10 \times 1.5 \times (2 \times (9 + 3))$	= <u>360</u>	kg
		2196	kg

h) Gaya Gempa dasar total $V_x = C_s W = 0.9375 \times 2196 = 2058.75 \text{ kg}$

$$\text{Gaya Gempa dasar total pada panel} = 0.5 \times V_x = 1029.375 \text{ kg}$$

c) Distribusi horizontal gaya gempa

$$F_x = C_{vx} V = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V = 1 \times 1029.375 = 1029.375 \text{ kg} = 10098 \text{ N}$$

Jadi beban gempa pada panel, $F_1 = 10098/3000 = 3.366 \text{ N/mm}$.

4.4.2 Beban –beban pada tipe panel yang lain

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai beban-beban yang bekerja pada bangunan-bangunan tipe 2 lantai dan 3 lantai seperti pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai – nilai beban pada bangunan

Jenis Bangunan	Tipe Panel	Beban Gravitasi			Beban Gempa (N/mm)			Beban Angin (N/mm ²)	
		DL	LL (N/mm)		100%	70%	52.5%	60%	45%
		N/m	100%	75%					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1 lantai	Panel lantai 1	0.137	0.196	0.147	3.366	2.356	1.767	2.35E-04	1.77E-04
	Total	[(3)+(4)]/80 = 0.0041625 N/mm ² = 4.1625 KN/m ²							
2 lantai	Panel lantai 2	0.137	0.196	0.147	5.421	3.795	2.846		
	Panel lantai 1	0.142	0.981	0.736	8.521	5.965	4.474		
	Total	[(3)+(4)]/80 = 18.2 N/mm ² = 18.2 KN/m ²							
3 lantai	Panel lantai 3	0.137	0.196	0.147	5.919	4.143	3.107		
	Panel lantai 2	0.142	0.981	0.736	12.404	8.683	6.512		
	Panel lantai 1	0.142	0.981	0.736	6.202	4.341	3.256		
	Total	[(3)+(4)]/80 = 32.2375 KN/m ²							

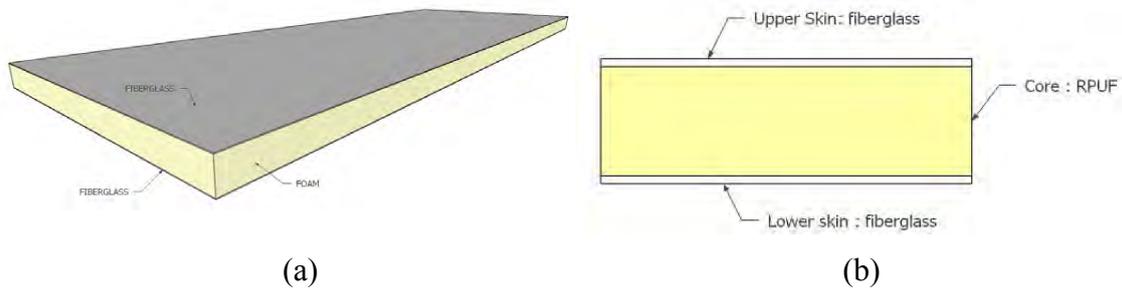
4.4.3 Pemodelan Panel

Panel dimodelkan ke dalam program bantu elemen hingga ABAQUS v6.10, dengan mengambil dimensi modul panel 1.5 m x 3 m. Ketebalan panel dicoba untuk panel 1 sebesar 80 mm. Ada dua jenis material yang digunakan sebagai penyusun panel, untuk bagian kulit (*skin*) digunakan GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) combomat-vynil ester dan untuk bagian inti (*core*) digunakan rigid *polyurethane* (PU) foam dengan nilai-nilai parameter material lamina didapat dari hasil pengujian sesuai

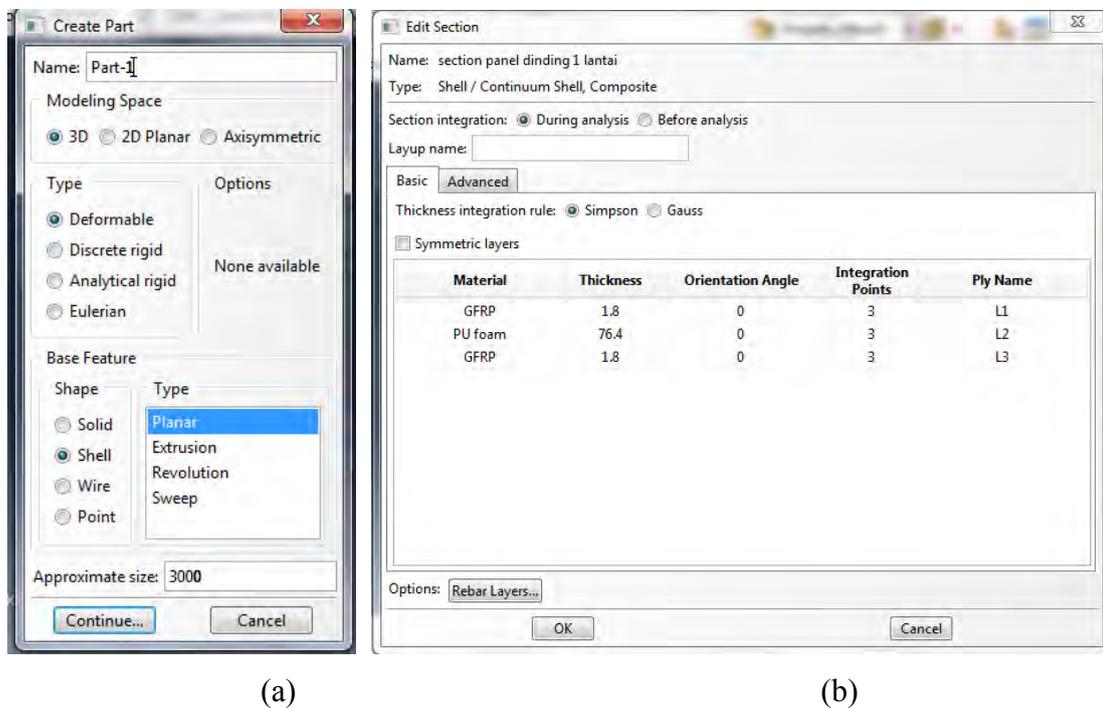
Tabel 4.12 dan dengan ketebalan bervariasi menurut Tabel 4.11. Fiberglass dianalisa dalam mode *orthotropic* dengan kekuatan yang sama pada kedua arah, normal dan tegak lurus dari itu. Karena fiberglass akan dominan dalam menyusun kekuatan panel dibandingkan dengan RPU foam, maka perbedaan kekuatan pada arah Longitudinal dan transversal dari RPU foam ini menjadi kurang berarti, sehingga elemen cukup dianalisa dalam mode isotropik.

Boundary condition (BC1) pada alas panel dibuat menjadi jepit, dengan menonaktifkan semua parameter *displacement* dan rotasi (U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3 = 0). Pada sisi atas panel, BC2 dibuat dengan menonaktifkan parameter *displacement*

U3 dan UR2, mewakili sisi panel yang pergerakan pada sumbu Z dan rotasi terhadap sumbu Y nya dibatasi oleh lantai (diafragma) dan sambungan.



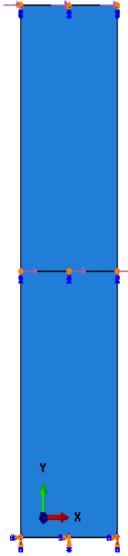
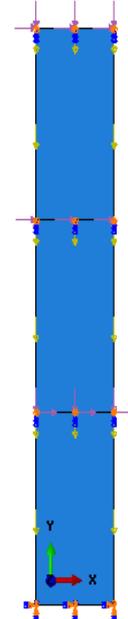
Gambar 4.31 (a) Panel sandwich rencana (b) Definisi skin dan core panel



Gambar 4.32 (a) Jenis pemodelan yang dipakai (b) Definisi section panel

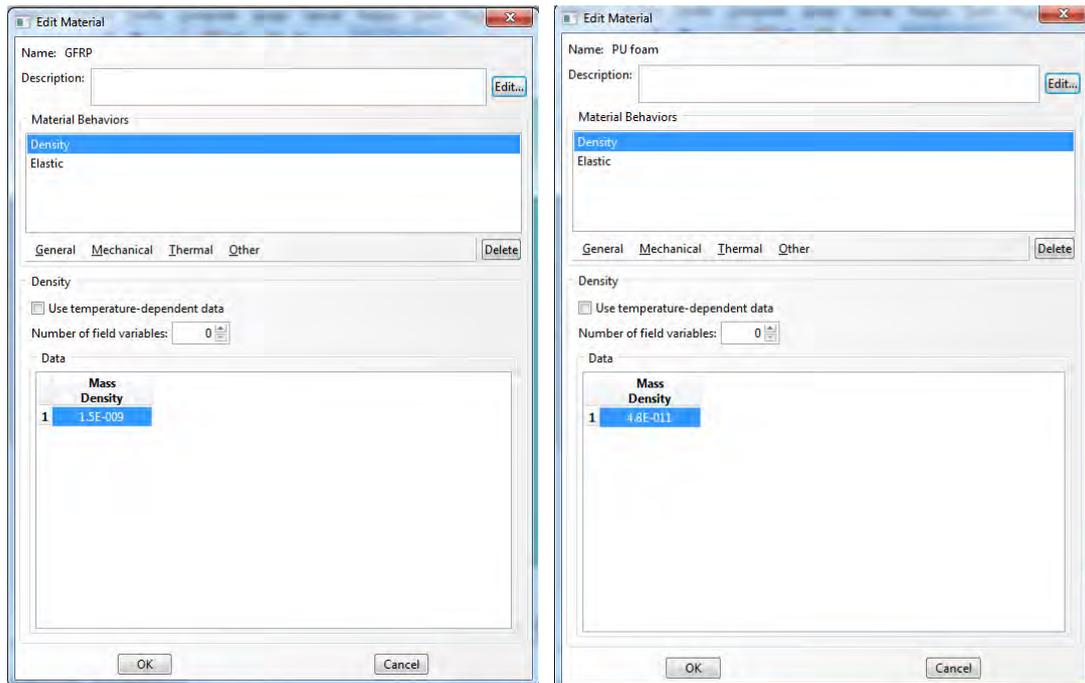
Tabel 4.11 Pemodelan panel pada program ABAQUS

Tipe panel	Bentuk Pemodelan	Mekanisme pemodelan
Panel 1		<ul style="list-style-type: none"> • 1 part panel 1 m x 3m, 3D, <i>deformable shell planar</i> • 1 section <i>shell composites</i> , GFRP = 1.8 mm, 0⁰ foam = 76.4 mm, 0⁰, tebal total = 80 mm • BC1: U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3 = 0. • BC2 : U3, UR2 = 0.

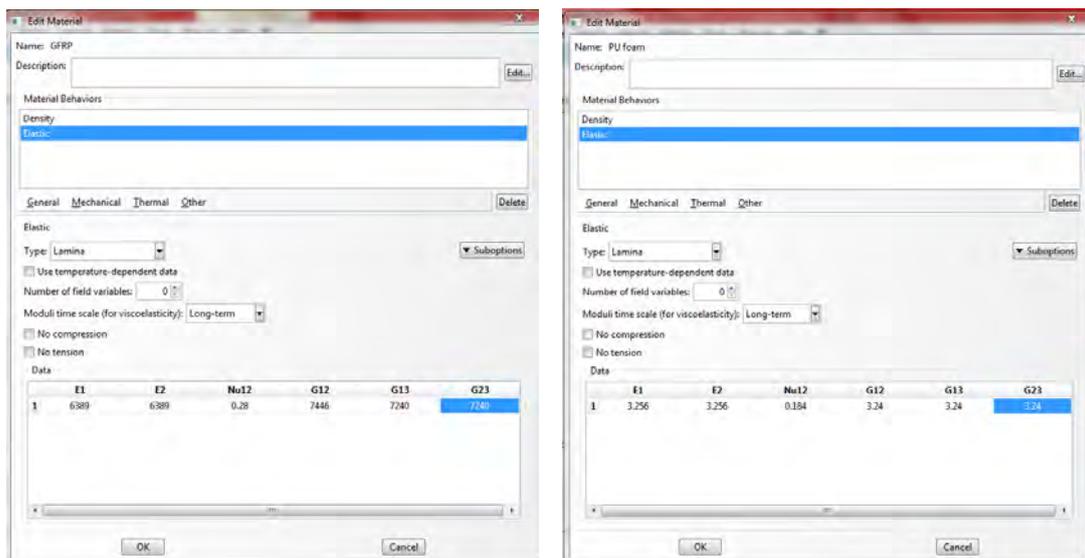
Panel 2		<ul style="list-style-type: none"> • 1 <i>part</i> panel 1 m x 3 m, 2 <i>instances</i> • 1 section <i>shell composites</i> : tebal skin (GFRP) = 1.8 mm, 0^0, tebal core (rigid PU foam) = 76.4 mm, 0^0, tebal total panel = 80 mm. • BC1: U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3 = 0. • BC2 : U3, UR2 = 0. • Assembly : tipe <i>constraint</i> = <i>tie</i>
Panel 3		<ul style="list-style-type: none"> • 1 <i>part</i> panel 1 m x 3 m, 3 <i>instances</i> • 1 section <i>shell composites</i> : tebal skin (GFRP) = 1.8 mm 0^0 angle dan tebal core (rigid PU foam) = 76.4 mm angle = 0^0, tebal total panel = 80 mm. • BC1: U1,U2,U3,UR1,UR2,UR3 = 0. • BC2 : U3, UR2 = 0. • Assembly : tipe <i>constraint</i> = <i>tie</i>.

Tabel 4.12 Input material properties

Parameter	Mass density	E1	E2	Nu	G12	G13	G23
Satuan	ton/mm ³	Mpa	MPa		MPa	MPa	MPa
GFRP	1.50E-09	6389	6389	0.28	2500 ¹⁾	2500 ¹⁾	2500 ¹⁾
RPU foam	4.80E-11	3.256	3.256	0.184	3.240	3.240	3.240
Keterangan	1) $G = E/(2*(1+\nu))$						



Gambar 4.33 Pendefinisian material GFRP dan PU foam: mass density

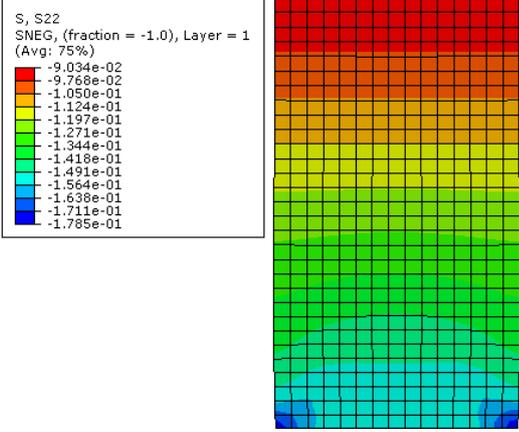
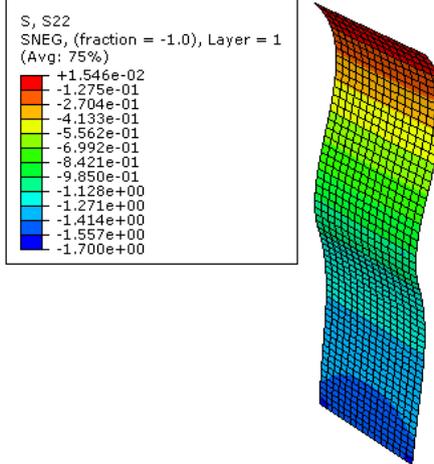
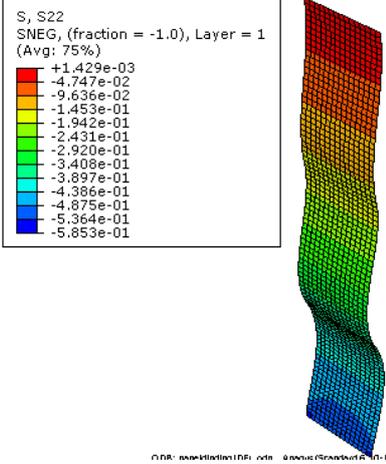


Gambar 4.34 Pendefinisian material (a) GFRP dan (b) PU foam

4.4.4 Analisa Ketahanan Panel Terhadap Beban Gravitasi

Untuk keperluan ini, kombinasi D+L digunakan dalam analisa panel. Dari analisa didapatkan hasil bahwa tegangan – tegangan di dalam panel masih lebih rendah dari tegangan – tegangan ijin material-material panel sehingga dengan dimensi tersebut, panel dinyatakan kuat terhadap beban gravitasi (Tabel 4.13).

Tabel 4.13 Hasil analisa panel terhadap beban gravitasi

Jenis panel	Hasil analisa	Keterangan
Panel 1		<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = 0.179 MPa < tegangan ijin = 30.33 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U2 = 0.0263 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm
Panel 2		<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = -6.65E-01 MPa < tegangan ijin = 30.33 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U2 = 0.2986 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm
Panel 3		<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = 1.099 MPa < tegangan ijin = 30.33 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U2 = 0.6526 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm

Tabel 4.14 Kontrol Tegangan Panel terhadap Beban Gravitasi

Tipe rumah	Jenis	Tegangan	Tegangan Ijin (MPa)			Teg. Aktual (MPa)	Kontrol	
			safety factor (SF)	Tegangan batas (Mpa)	Tegangan Ijin Kolerasi (Mpa)			
3 Lantai	GFRP	Tension	S11	2	216	108	1.12E-02	OK
			S22	2	216	108	-6.30E-01	OK
		Comp.	S11	2	70	35	-2.41E-01	OK
			S22	2	70	35	-1.18E+00	OK
		Shear	S12	2	3.02	1.51	2.06E-01	OK
	Foam	Tension	S11	2	0.393	0.1965	4.88E-05	OK
			S22	2	0.393	0.1965	-3.18E-04	OK
		Comp.	S11	2	0.358	0.179	-7.26E-05	OK
			S22	2	0.358	0.179	-5.81E-04	OK
		Shear	S12	2	0.228	0.114	8.94E-05	OK
2 lantai	GFRP	Comp.	S22	2	70	35	-6.65E-01	OK
1 lantai		Comp.	S22	2	70	35	-1.10E+00	OK

Tabel 4.15 Kontrol Tegangan Panel terhadap Beban Angin

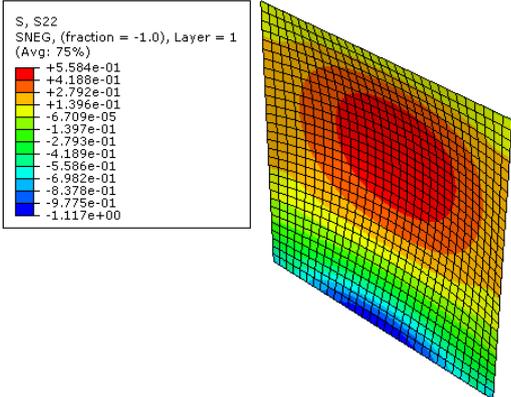
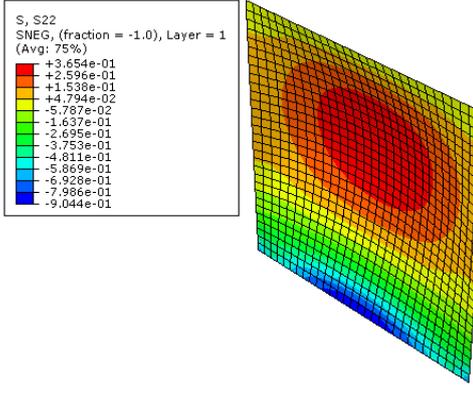
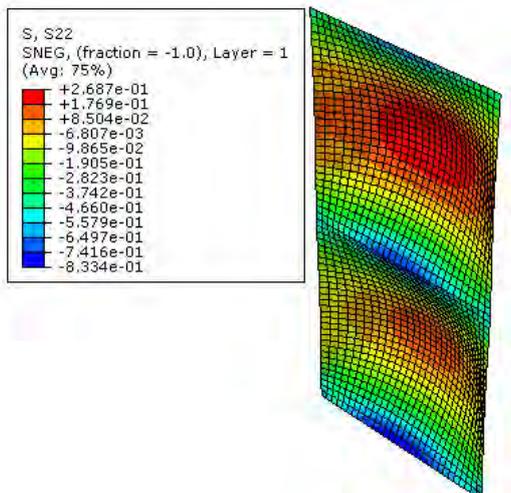
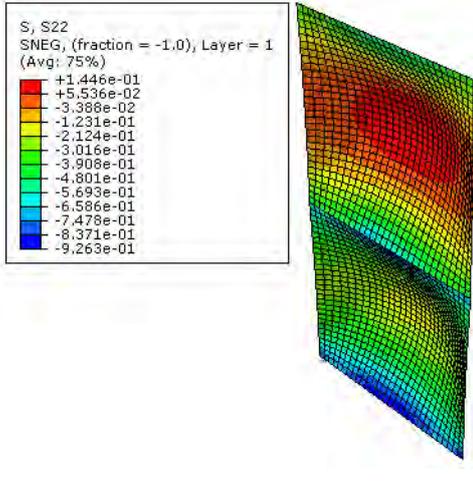
Tipe rumah	Komb	Jenis	Tegangan	Tegangan Ijin (MPa)			Teg. Aktual (MPa)	Kontrol	
				koefisien safety (k)	Teg.batas (Mpa)	Teg. Ijin Kolerasi (Mpa)			
1 Lantai	D+0.6W	GFRP	Tension	S11	2	216	108	4.60E-01	OK
				S22	2	216	108	6.47E-01	OK
			Comp.	S11	2	70	35	-4.61E-01	OK
				S22	2	70	35	-9.01E-01	OK
			Shear	S12	2	3.02	1.51	5.71E-01	OK
		Foam	Tension	S11	2	0.393	0.1965	2.99E-04	OK
				S22	2	0.393	0.1965	2.04E-04	OK
			Comp.	S11	2	0.358	0.179	-4.27E-04	OK
				S22	2	0.358	0.179	-1.97E-04	OK
			Shear	S12	2	0.228	0.114	2.37E-04	OK
2 lantai	GFRP	Comp.	S22	2	70	35	-9.80E-01	OK	
3 lantai		Comp.	S22	2	70	35	-1.15E+00	OK	
1 lantai	D+0.45W	GFRP	Comp.	S22	2	70	35	-7.79E-01	OK
2 lantai			Tension.	S22	2	216	108	1.87E+00	OK
3 lantai			Comp.	S22	2	70	35	-1.69E+00	OK

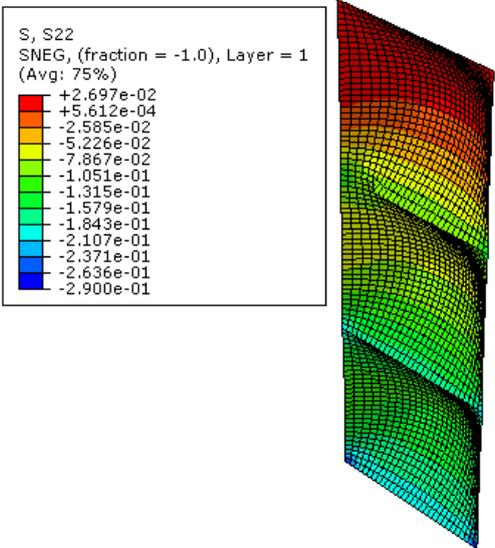
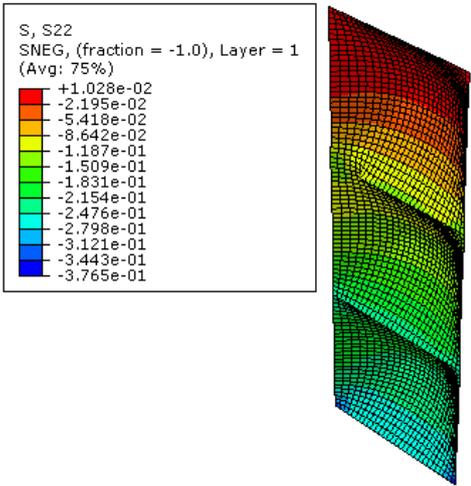
4.4.5 Analisa Ketahanan Panel Terhadap Beban Angin

Karena beratnya yang ringan, kontrol ketahanan panel terhadap angin menjadi penting. Untuk keperluan ini, kombinasi D+0.6W dan D+0.45W+0.75L digunakan

sebagai parameter dalam analisa panel. Dari analisa didapatkan hasil bahwa tegangan – tegangan di dalam panel masih lebih rendah dari tegangan – tegangan ijin material-material panel sehingga dengan dimensi tersebut, panel dinyatakan kuat terhadap beban angin (Tabel 4.16).

Tabel 4.16 Hasil analisa panel terhadap beban angin

Jenis Panel	Hasil Analisa D+0.6W	Hasil Analisa D+0.45W+0.75L
<p>Panel 1</p>	 <ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = -1.15E+00 MPa < tegangan ijin = 30.33 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U3 = 1.87 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm 	 <ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = -7.79E-01 MPa < tegangan ijin = 30.33 MPa. (OK). • Defleksi maksimum U3 = 1.409 mm. • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm
<p>Panel 2</p>		

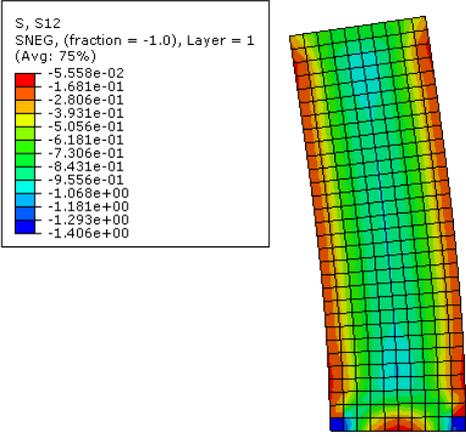
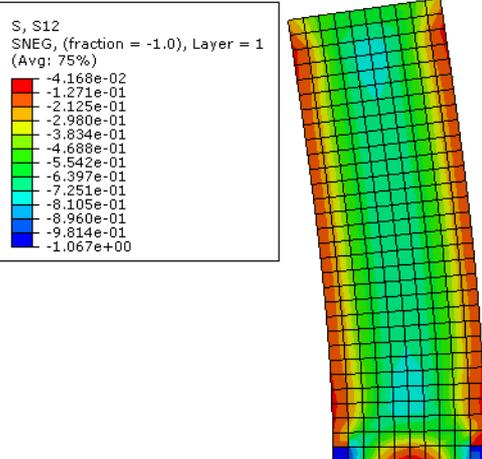
	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = -9.80E-01 MPa < tegangan ijin = 30.33 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U3 = 1.547 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = MPa < tegangan ijin = 65 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U3 = 1.563 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm
<p>Panel 3</p>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = -0.29 MPa < tegangan ijin = 30.333 MPa. (OK) • Defleksi maksimum U₃ = 1.921 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core = 76.4 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S22 skin = -1.69E+00 MPa < tegangan ijin = 30.333 MPa. (OK). • Defleksi maksimum U₃ = 1.525 mm • Skin = 1.8 mm (2 lapis) • Core =76.4 mm

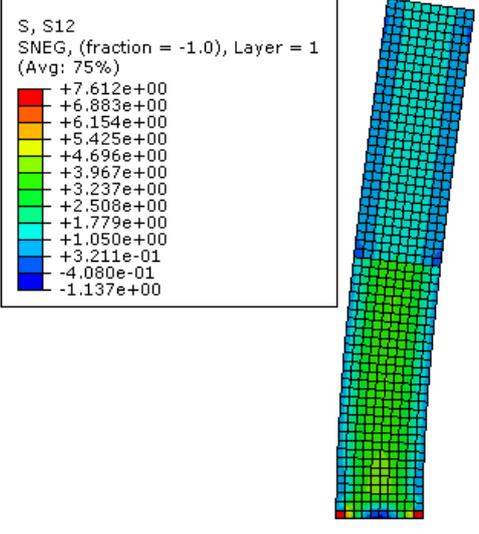
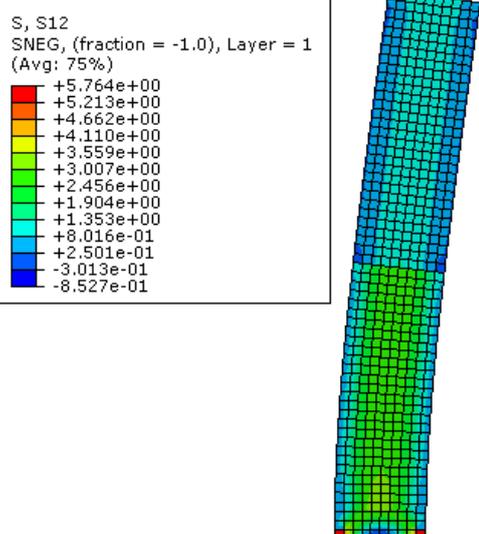
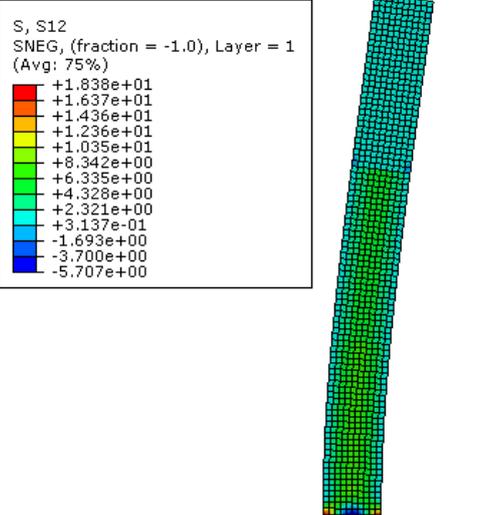
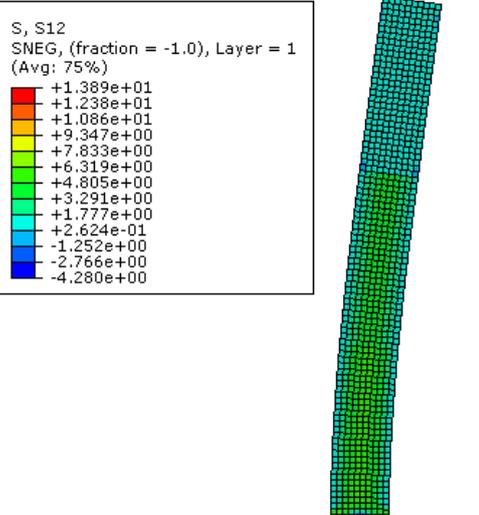
4.4.6 Analisa Ketahanan Panel Terhadap Beban Gempa

4.4.6.1 Kontrol tegangan

Untuk keperluan ini, kombinasi D+0.7E dan D+0.525E+0.75E digunakan dalam analisa panel. Dari analisa didapatkan hasil bahwa tegangan – tegangan di dalam panel masih lebih rendah dari tegangan – tegangan ijin material-material panel sehingga dengan dimensi tersebut, panel dinyatakan kuat terhadap beban gempa (Tabel 4.17).

Tabel 4.17 Hasil analisa panel terhadap beban gempa

Jenis Panel	Hasil Analisa D+0.7E	Hasil Analisa D+0.525E+0.75L
Panel 1	 <p>S, S12 SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> -5.55e-02 -1.681e-01 -2.806e-01 -3.931e-01 -5.056e-01 -6.181e-01 -7.306e-01 -8.431e-01 -9.556e-01 -1.068e+00 -1.181e+00 -1.293e+00 -1.406e+00 	 <p>S, S12 SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> -4.168e-02 -1.271e-01 -2.125e-01 -2.980e-01 -3.834e-01 -4.688e-01 -5.542e-01 -6.397e-01 -7.251e-01 -8.105e-01 -8.960e-01 -9.814e-01 -1.067e+00
	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S12 skin = 1.41 MPa < tegangan ijin = 1.51 MPa. (OK) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan maksimum yang menentukan adalah S12 skin = 1.067 MPa < tegangan ijin = 1.51 MPa. (OK)
	<ul style="list-style-type: none"> • Simpangan antar tingkat = 16.65 mm < Simpangan ijin = 60 mm (OK) • Tebal skin = 1.8 mm (2 lapis) • Tebal core = 76.4 mm 	

<p>Panel 2</p>	 <p>S, S12 SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +7.612e+00 +6.883e+00 +6.154e+00 +5.425e+00 +4.696e+00 +3.967e+00 +3.237e+00 +2.508e+00 +1.779e+00 +1.050e+00 +3.211e-01 -4.080e-01 -1.137e+00 	 <p>S, S12 SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +5.764e+00 +5.213e+00 +4.662e+00 +4.110e+00 +3.559e+00 +3.007e+00 +2.456e+00 +1.904e+00 +1.353e+00 +8.016e-01 +2.501e-01 -3.013e-01 -8.527e-01
	<p>Tegangan maksimum yang menentukan adalah S12 skin = 7.7 MPa > tegangan ijin = 1.51 MPa. (K.O)</p>	<p>Tegangan maksimum yang menentukan adalah S12 skin = 5.76 MPa > tegangan ijin = 1.51 MPa. (K.O)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Simpangan antar tingkat 1 = 210 mm > Simpangan ijin = 60 mm (K.O) • Simpangan antar tingkat 2 = 400 mm > Simpangan ijin = 120 mm (K.O) • Tebal skin = 1.8 mm (2 lapis) • Tebal core = 76.4 mm 	
<p>Panel 3</p>	 <p>S, S12 SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.838e+01 +1.637e+01 +1.436e+01 +1.236e+01 +1.035e+01 +8.342e+00 +6.335e+00 +4.328e+00 +2.321e+00 +3.137e-01 -1.693e+00 -3.700e+00 -5.707e+00 	 <p>S, S12 SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.389e+01 +1.238e+01 +1.086e+01 +9.347e+00 +7.833e+00 +6.319e+00 +4.805e+00 +3.291e+00 +1.777e+00 +2.624e-01 -1.252e+00 -2.766e+00 -4.280e+00
	<p>Tegangan maksimum yang menentukan adalah S12 skin = 18.5 MPa > tegangan ijin = 1.51 MPa. (K.O)</p>	<p>Tegangan maksimum yang menentukan adalah S12 skin = 14 MPa > tegangan ijin = 1.51 MPa. (K.O)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Simpangan antar tingkat 1 = 576 mm > Simpangan ijin = 60 mm (K.O) • Simpangan antar tingkat 2 = 1284 mm > Simpangan ijin = 120 mm (K.O) • Simpangan antar tingkat 3 = 1500 mm > Simpangan ijin = 180 mm (K.O) • Tebal skin = 1.8 mm (2 lapis) • Tebal core = 76.4 mm 	

Tabel 4.18 Kontrol Tegangan Panel terhadap Beban Gempa

Tipe rumah	Komb	Jenis	Tegangan		safety factor (SF)	Teg.batas (Mpa)	Teg. Ijin Kolerasi (Mpa)	Teg. Aktual (MPa)	Kontrol		
1 Lantai	D+0.7E	GFRP	Tension	S11	2	216	108	1.59	OK		
				S22	2	216	108	11.1	OK		
			Comp.	S11	2	70	35	-1.64	OK		
				S22	2	70	35	-11.4	OK		
			Shear	S12	2	3.02	1.51	-1.41	OK		
			Foam	Tension	S11	2	0.393	0.1965	0.0055	OK	
		S22			2	0.393	0.1965	0.00049	OK		
		Comp.		S11	2	0.358	0.179	-0.00563	OK		
				S22	2	0.358	0.179	-0.00048	OK		
		Shear		S12	2	0.228	0.114	0.00061	OK		
		2 Lantai		D+0.7E	GFRP	Tension	S11	2	216	108	9.2
			S22				2	216	108	64.6	OK
Comp.	S11		2			70	35	-9.3	OK		
	S22		2			70	35	-65.1	OK		
Shear	S12		2			3.02	1.51	7.7	KO		
3 Lantai	D+0.7E		GFRP			Tension	S11	2	216	108	23.2
		S22		2	216		108	163	KO		
		Comp.		S11	2	70	35	-23.3	OK		
				S22	2	70	35	-164	OK		
		Shear		S12	2	3.02	1.51	18.5	KO		
		1 Lantai		D+0.525E+0.75L	GFRP	Tension	S11	2	216	108	1.18
S22	2		216				108	8.26	OK		
Comp.	S11		2			70	35	-1.24	OK		
	S22		2			70	35	-8.63	OK		
Shear	S12		2			3.02	1.51	-1.07	OK		
Foam	Tension		S11			2	0.393	0.1965	0.00408	OK	
			S22		2	0.393	0.1965	0.00037	OK		
	Comp.		S11		2	0.358	0.179	-0.00426	OK		
			S22		2	0.358	0.179	-0.00036	OK		
	Shear		S12		2	0.228	0.114	0.00046	OK		
	2 Lantai		D+0.525E+0.75L		GFRP	Tension	S11	2	216	108	6.85
S22							2	216	108	48.1	OK
Comp.		S11		2		70	35	-7.1	OK		
		S22		2		70	35	-49.2	OK		
Shear		S12		2		3.02	1.51	5.8	KO		
3 Lantai		D+0.525E+0.75L		GFRP		Tension	S11	2	216	108	17.3
	S22		2		216		108	122	KO		
	Comp.		S11		2	70	35	-17.6	OK		
			S22		2	70	35	-124	OK		
	Shear		S12		2	3.02	1.51	14	KO		

4.4.6.2 Kontrol Simpangan

Tabel 4.19 Kontrol deformasi panel terhadap beban gempa

Tipe Bangunan	Tipe Panel	Elevasi	U1 (mm)	Cd	I _E	Δ	Δa	Cek
Bangunan 1 lantai	Panel tipe 1	±0.00	0	2	1	33.3	60	OK
		+3.00	16.65					
Bangunan 2 lantai	Panel tipe 1	±0.00	0	2	1	210	60	Not OK
		+3.00	105					
	Panel tipe 2	+3.00	105	2	1	400	120	Not OK
		+6.00	305					
Bangunan 3 lantai	Panel tipe 1	±0.00	0	2	1	576	60	Not OK
		+3.00	288					
	Panel tipe 2	+3.00	288	2	1	1284	120	Not OK
		+6.00	930					
	Panel tipe 3	+6.00	930	2	1	1500	180	Not OK
		+9.00	1.68E+03					

Dari Analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa panel dengan dimensi 1000x3000 mm dengan tebal *skin* 1.8 (2 lapis fiberglass) dan tebal *core* 76.4 mm kuat menahan beban gravitasi dan angin pada rumah tinggal 1, 2 dan 3 lantai dengan konfigurasi rumah sesuai rencana. Panel tersebut kuat menahan beban gempa rumah 1 lantai namun tidak untuk rumah 2 dan 3 lantai (Tabel 4.18 dan Tabel 4.19). Panel dengan ukuran ini selanjutnya akan dijadikan acuan untuk pengetesan tekan di laboratorium, untuk mengetahui kemampuan panel sebenarnya.

4.5 Pabrikasi panel

Panel dipabrikasi dengan teknik cor langsung, dimana dua lembar fiberglass diselipkan pada bagian tepi – tepi bekisting sebagai *skin* kemudian dituangi campuran RPU A dan B sebagai *core*, dibiarkan mengeras selama 2 x 24 jam sebelum mengeras menjadi satu kesatuan panel *sandwich*. Bagian *excessive* RPU foam kemudian dipotong dan dirapihkan sesuai ukuran panel yang akan diuji yaitu 50 cm x 150 cm sebagaimana Gambar 4.37. Langkah – langkah pabrikasi panel secara sistematis dijelaskan menurut Gambar 4.35.

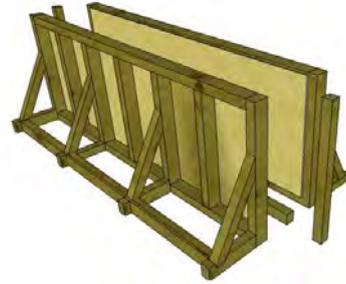
Pabrikasi Panel

Skala 1: 2 = 500 mm x 1500 mm

→ optimasi material



1 Bekisting panel, bongkar - pasang



2 Skin fiberglass direkatkan di kedua sisi bekisting



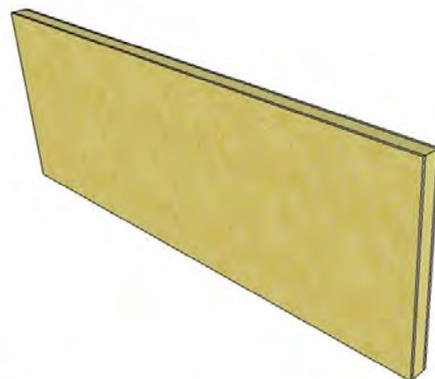
3 Bekisting disatukan



4 Pemasangan baut untuk pengikat



5 Rongga pada bekisting, diantara skin dituangi campuran RPUF



6 Panel sandwich yang telah dilepas dari bekisting dan dicuring selama 24 jam dan dirapikan bagian tepinya

Gambar 4.35 Skema pabrikasi panel



Gambar 4.36 Perlengkapan pabrikan panel (a) bekisting (b) RPUF cair A dan B



Gambar 4.37 Panel sandwich yang telah dirapikan bagian tepinya

4.6 Pengujian tekan panel

4.6.1 Persiapan pengujian

Pengujian ini dilakukan untuk mensimulasi perilaku dinding ketika menerima beban vertical dari lantai di atasnya. Ukuran panel yang diuji adalah 500 mm x 1350 mm (seharusnya 1500, namun keterbatasan tinggi alat tekan di laboratorium, tinggi panel kemudian terpaksa dipotong menjadi hanya 1350 mm), yang mewakili ukuran aktual panel (100 cm x 300 cm) dengan factor skala 1 : 2. Untuk mendistribusikan beban secara merata sepanjang lebar panel, baja profil U ditempatkan pada sisi atas dan bawah dari panel sebagaimana (Gambar 4.38). Dua buah LVDT dipasang untuk mengukur defleksi lateral pada setengah tinggi panel. Dua LVDT tersebut dibutuhkan untuk membuat verifikasi, bahwa pembacaan dari satu LVDT dapat saling dikontrol. Sementara untuk mendapatkan informasi tentang kondisi *skin* selama pengujian, dua buah *strain gauge* pada arah horizontal dan vertical diletakkan pada permukaan panel, juga pada posisi setengah ketinggian panel tersebut.



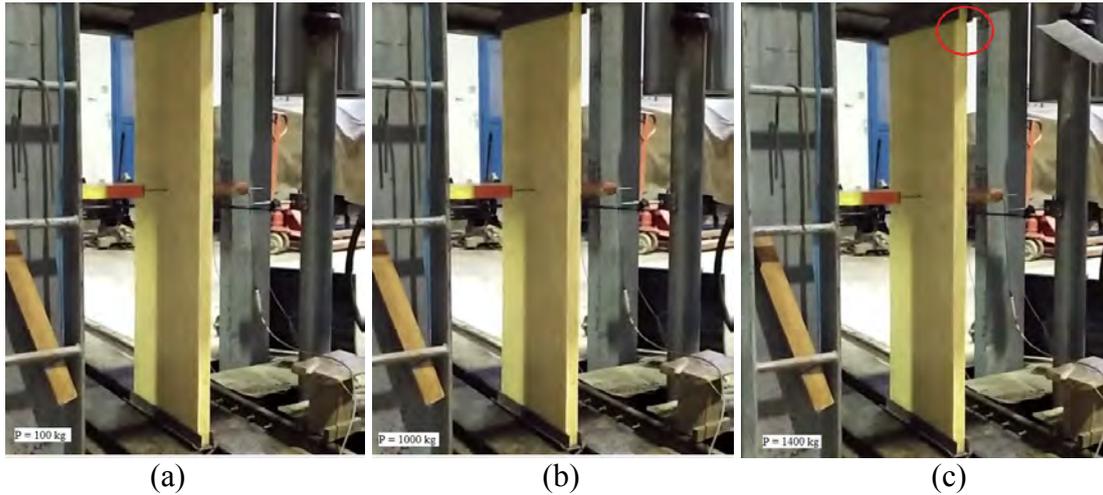
(a) (b)
Gambar 4.38 Setting alat pengujian (a) Pemasangan LVDT (b) Pemasangan *strain gauge*

4.6.2 Analisa Hasil Pengujian

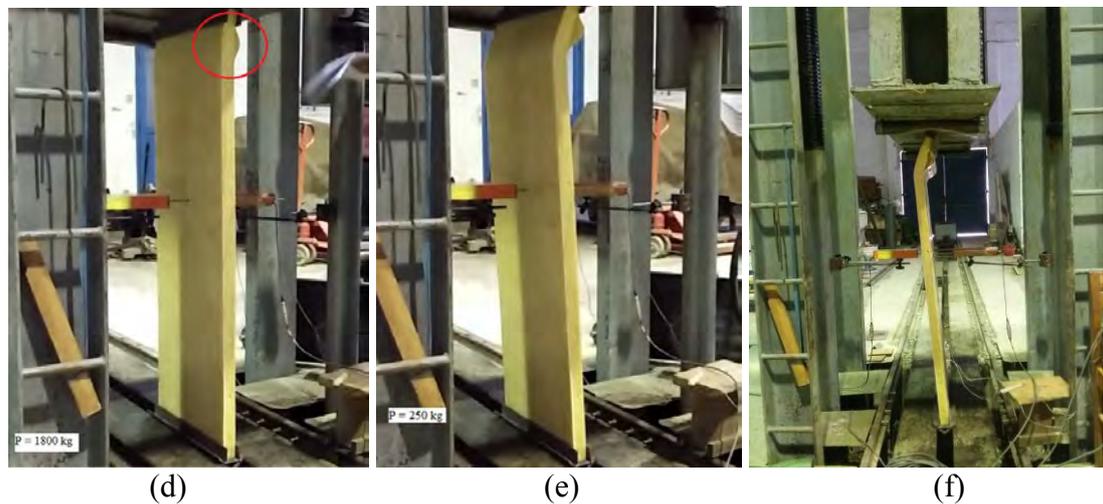
Dari pengujian, diketahui bahwa kegagalan panel terjadi pada daerah ujung atas panel, diindikasikan oleh adanya delaminasi *skin*. Perilaku panel ini setipe dengan perilaku kolom langsing bahwa defleksi lateral berperan penting dalam menentukan mekanisme kegagalan panel secara keseluruhan. Panel mengubah beban aksial menjadi momen sekunder, menyebabkan salah satu *skin* dalam keadaan tekan sementara *skin* yang lain dalam keadaan tarik. *Skin* tidak bisa menahan beban kompresi lagi pada saat $P = 1400$ kg yang diindikasikan dengan adanya delaminasi atau tekukan kecil pada lokasi tertentu (Gambar 4.40 c). Fenomena tekuk ini berkembang dan *skin* benar – benar terlepas dari lapisan *core* ketika $P = 1800$ kg (Gambar 4.40d). Ketika beban dilanjutkan, kapasitas aksial panel menurun sampai 250 kg, dan panel dengan jelas memperlihatkan defleksi yang besar pada area dimana delaminasi terjadi (Gambar 4.40e). Gambar 4.41 menunjukkan bahwa tegangan maksimum pada lapisan *skin* adalah sekitar 6.5 MPa yang mana nilai tersebut masih jauh di bawah tegangan ijin *skin*.

Tabel 4.20 Pengujian tekan

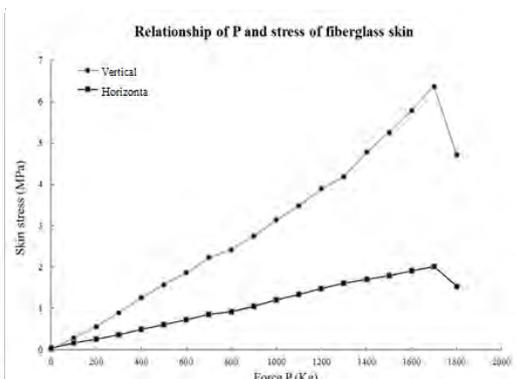
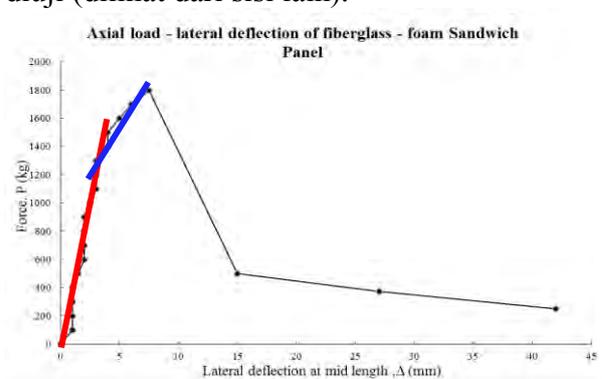
Dimensi panel	Beban Maks (kN)	Beban area (kN/m ²)	Defleksi lateral (mm)	Momen Sekunder (kNm)	Deskripsi
450x1350 x40	13.773	765.167	4	0.055092	Diukur ketika muncul delaminasi
	17.658	981	7.5	0.132435	Diukur ketika lapisan <i>skin</i> benar benar lepas sepanjang arah lebar panel



Gambar 4.39 Step – step menuju kegagalan panel (a) kondisi panel saat $P = 100$ kg (b) kondisi panel saat $P = 1000$ kg, (c) kondisi panel saat $P = 1400$ kg, muncul delaminasi



Gambar 4.40 Step – step menuju kegagalan dari panel yang diuji (d) kondisi panel saat $P = 1800$ kg, lapisan *skin* benar – benar terkelupas dari lapisan *core*. (e) kondisi panel ketika pengujian dilanjutkan, kapasitas aksial panel turun ke 250 kg (f) panel yang telah diuji (dilihat dari sisi lain).



Gambar 4.41 (a) Grafik hubungan beban aksial – defleksi lateral dari panel sandwich fiberglass – foam (b) Grafik hubungan beban dan tegangan skin dari panel yang dites.

Sebagaimana diketahui, ketidakstabilan panel dengan ujung sendi terhadap beban tekan mulai terjadi ketika beban aksial sama dengan beban Euler,

$$P_E = \frac{\pi^2 D}{L^2} = \frac{\pi^2 (1.978E + 09)}{1350^2} = 1091.879 \text{ kg}$$

Dengan $D = E_f b t d^2 / 2 = 6389 \times 450 \times 0.9 \times 39.1^2 / 2 = 1.978E + 09 \text{ Nmm}^2$. Ini bisa dipahami, bahwa memang benar setelah beban melebihi 1091.879 kg ini muncul fenomena – fenomena ketidakstabilan pada panel seperti delaminasi dan kerutan. Ini bisa dilihat pada Gambar 4.40 (a) bahwa ada perubahan gradien garis kekakuan setelah P_E dilewati. Lebih dari itu, jika kapasitas panel hasil pengujian ini dibandingkan dengan beban panel (Tabel 4.21, maka dapat disimpulkan bahwa panel sandwich fiberglass-foam dengan ketebalan total 80 mm yang terdiri dari 2 lapis fiberglass combo mat dan dengan teknik pabrikan seperti itu mampu menopang beban – beban dari panel rumah tinggal 1 lantai. Lebih lanjut, panel juga diujicobakan menahan beban-beban dari rumah tinggal 2 dan 3 lantai dan dinyatakan kuat menahan beban gravitasi.

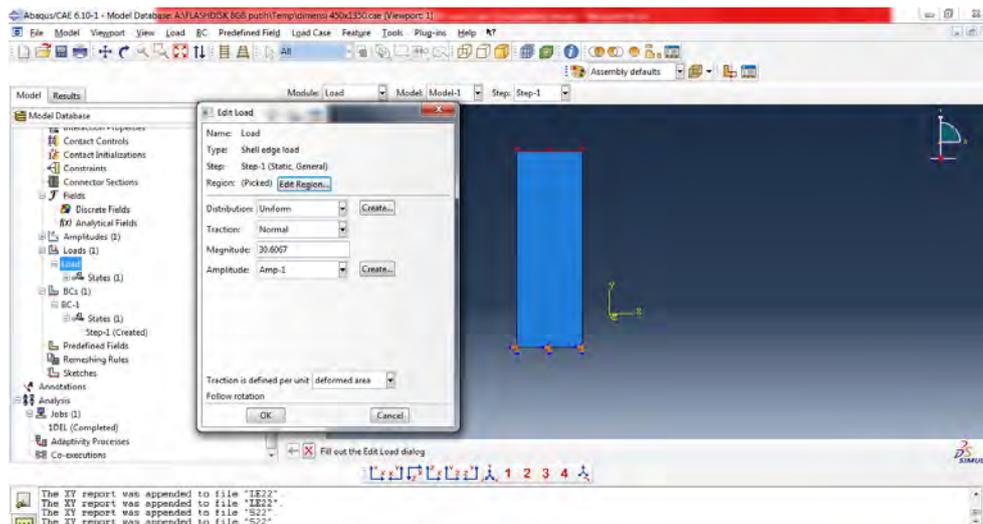
Tabel 4.21 Perbandingan kapasitas panel hasil pengujian dengan beban gravitasi rencana panel berdasarkan tipe panel.

Tipe panel	Kapasitas tekan panel (tes, kN/m²)	Kapasitas maks (kN/m²)	Beban Maksimum (kN/m²)	Keterangan
(1)	(2)	(3) = (2)/2	(4)	(5)
Panel rumah 1 lantai	765.167	382.5835	4.1625	Kapasitas panel mencukupi, gaya gempa tidak dominan
Panel rumah 2 lantai	765.167	382.5835	18.2	Kapasitas panel mencukupi untuk menahan beban gravitasi, tidak untuk beban lateral (numerik, lihat Tabel 4.18)
Panel rumah 3 lantai	765.167	382.5835	32.2375	Kapasitas panel mencukupi untuk menahan beban gravitasi, namun tidak untuk beban lateral

4.6.3 Perbandingan grafik tegangan skin eksperimen dengan simulasi ABAQUS

Untuk memastikan bahwa pemodelan yang dijadikan acuan dalam menentukan dimensi benda uji tekan panel cukup memadai, maka dilakukan perbandingan ulang antara benda uji dengan model simulasi pada kondisi dimensi dan beban yang sama.

Simulasi numerik dilakukan pada dimensi panel, panjang x lebar x tinggi 450x40x1350 mm dengan pembebanan 1300 kg (beban ultimit pada saat delaminasi mulai muncul) dengan mode amplitudo. Mode amplitudo pada assign beban dimaksudkan untuk membuat beberapa titik interval yang sama sampai dengan besar beban yang telah diset, tercapai. Pada Gambar 4.43, mode amplitudo ini sama dengan fungsi waktu, dimana 0 adalah waktu ketika beban mulai diaplikasikan pada panel dan 1 adalah ketika beban telah mencapai 1300 kg.



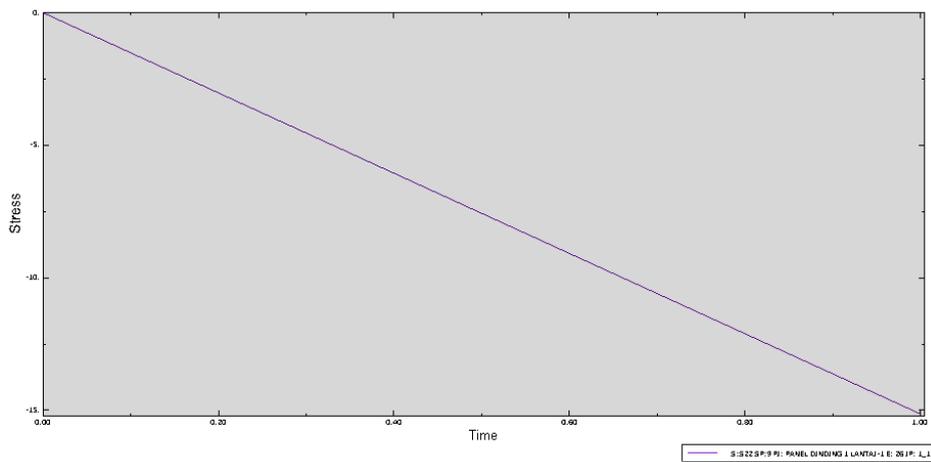
Gambar 4.42 Pemodelan beban pada panel

Tabel 4.22 merupakan hasil eksperimen tegangan skin panel menurut fungsi beban yang kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi sehingga muncul Gambar 4.44. Pada table itu juga terlihat bahwa pola tegangan – tegangan hasil simulasi identic dengan pola tegangan - tegangan hasil eksperimen dengan deviasi 3.88%. Artinya dengan deviasi sekecil itu, model simulasi memiliki performa yang sangat baik dalam hal mewakili panel pada kondisi riil. Ini juga membuktikan bahwa simplifikasi di awal yang dilakukan pada core panel (RPUF), dari kondisi anisotropis menjadi isotropis tidak banyak mempengaruhi keseluruhan sistem panel.

Tabel 4.22 Tegangan skin panel menurut penambahan beban uji tekan

P kg	Dimensi panel		Luas penampang mm ²	Tegangan Eksperimen N/mm ²	Tegangan Simulasi N/mm ²
	B mm	t mm			
0	450	0.90000	810	0	0
100	450	0.90000	810	1.211111111	1.16408462
200	450	0.90000	810	2.422222222	2.32816923

300	450	0.90000	810	3.633333333	3.49225385
400	450	0.90000	810	4.844444444	4.65633846
500	450	0.90000	810	6.055555556	5.82042308
600	450	0.90000	810	7.266666667	6.98450769
700	450	0.90000	810	8.477777778	8.14859231
800	450	0.90000	810	9.688888889	9.31267692
900	450	0.90000	810	10.9	10.4767615
1000	450	0.90000	810	12.11111111	11.6408462
1100	450	0.90000	810	13.32222222	12.8049308
1200	450	0.90000	810	14.53333333	13.9690154
1300	450	0.90000	810	15.74444444	15.1331
Gradien				0.012111111	0.01164085
Deviasi gradien simulasi / eksperimen				3.8829%	



Gambar 4.43 Grafik Hubungan Tegangan skin menurut fungsi beban simulasi



Gambar 4.44 Grafik Perbandingan Tegangan Skin terhadap Penambahan Beban Tekan Simulasi vs Eksperimen

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Panel sandwich fiberglass – foam ini dimodelkan secara tiga dimensi dalam mode lamina dimana ada tiga jenis tegangan yang akan dominan terjadi, tegangan normal, S_{11} dan S_{22} , dan tegangan geser S_{12} . Beban angin diratakan pada permukaan panel, menjadi beban area. Beban gravitasi dari konfigurasi rumah yang ditinjau diterapkan sebagai beban garis pada sisi atas panel karena meskipun tampilan yang diminta 3D, namun kenampakan pada arah ketebalan tidak dapat ditampilkan dan diwakili oleh model arah x dan y . Pergerakan panel tetap dalam 3 sumbu sehingga model tetap memadai sebagai model dinding. Sementara beban gempa diplikasikan sebagai beban *edge* pada sisi panel yang bersangkutan. Untuk mengakomodasi momen yang timbul akibat meningkatnya jumlah tingkat, maka diterapkan model bertingkat dua dan tiga dengan *assembly tie constraint*. Data input material *skin* dan *core* diperoleh melalui pengujian – pengujian di laboratorium dalam mode tarik, tekan dan geser. Dari analisa numerik tersebut, diketahui bahwa panel dengan ketebalan 80 mm yang terdiri dari dua lapis fiberglass combo mat untuk masing – masing *skin* cukup untuk menahan beban angin, gravitasi dan gempa dari rumah tinggal 1 lantai. Panel itu juga mampu menahan beban angin dan gravitasi dari rumah tinggal 2 dan 3 lantai namun tidak cukup kuat untuk menahan beban gempa. Kapasitas tersebut kemudian dibuktikan dengan pengujian di laboratorium melalui mode tekan dan diketahui bahwa benar panel kuat menahan beban gravitasi rumah tinggal 1, 2 dan 3 lantai, bahkan beban gravitasi dari rumah 3 lantai hanya sekitar 10 % dari kapasitas riil panel. Selain itu perbandingan hasil pengujian panel tersebut terhadap simulasi numerik dalam program ABAQUS memberikan deviasi garis tegangan terhadap penambahan beban kurang dari 5%, yang mengindikasikan bahwa pemodelan telah cukup baik mewakili panel pada kondisi nyata.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan pengujian geser monotonic pada panel untuk memastikan berapa kapasitas panel dalam mode itu dan apakah itu cukup

untuk mencegah bangunan dari keruntuhan, dengan variasi bentang. Kemudian perlu dicoba menggunakan benda uji yang dipabrikasi dengan metode yang lebih baik yang menghasilkan kekuatan geser antara lapisan *skin* dan *core* lebih tinggi karena dengan metode sekarang, panel rawan delaminasi karena hal – hal teknis, seperti akibat proses pemotongan. Perkuatan seperti *inserted-resin-to-foam bond* atau pemakaian *shear connector* bisa menjadi alternative untuk penelitian – penelitian mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Akovali. 2001. "Handbook of Composite Fabrication". Rapra Technology Limited. Exeter
- Alberto Corigliano, Egidio Rizzi, Enrico Papa. 2000. "*Experimental Characterization and Numerical Simulations of Syntactic-Foam/Glass-Fibre Composite Sandwich*". Composites Science and Technology 60 (2000) 2169-2180
- Allen, Howard G. 1969. "Analysis And Design Of Structural Sandwich Panels". Pergamon Press. London
- Amadio, C and C. Bedon. 2011. " Buckling of Laminated Glass Elements in Compression". Journal of Structural Engineering ASCE. 803-810.
- Badan Pusat Statistik. 2011. "Persentase Rumah Tangga menurut Provinsi, Tipe Daerah dan Dinding Terluas bukan Bambu/lainnya, 2009-2011"
- BNPB. 2009. "Peta Jumlah Kerusakan Fasilitas Umum Akibat Gempa Di Provinsi Sumatera Barat". 5 Oktober.
- Build Change .2007. "Observasi Gempa 12 dan 13 September 2007, Sumatra, Indonesia". 15 Oktober
- Chen et al. 2011. Mechanical properties and dimensional stability of water-blown PU foams with various water levels. Northeast Forestry University, NEFU. China
- Dedecker, Kristof. 2006. "*Sandwich Panels Supporting Growth with an Established and Proven Technology*".
- Eurocopter Canada. 1987. Technical Definition BO 105 LS A-3. Eurocopter Canada Ltd. Ontario.
- Garcopanel.com. 2014. *Panel Monolítico de Madera*. 27 Maret
- Gibson et al. 1997. Cellular solids – Structure and Properties. Cambridge University Press. Cambridge.
- Groover, MP. 1996. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Wiley. New Jersey.USA,
- Herakovich. Carl T. 1998. *Mechanics of Fibrous Composites*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Hyer, M.1998. *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*, McGraw-Hill.

- Kaynak. 2001. *Constituent Material*. Rapra Technology Limited. Exeter UK
- Lim et al. (2008). Effects of silicon surfactant in rigid polyurethane foams. *eXPRESS Polymer Letters* Vol.2, No.3 (2008) 194–200.
- M. Styles, P. Compston, S. Kalyanasundaram. 2008. “*Finite Element Modelling of Core Thickness Effects in Aluminium Foam/Composite Sandwich Structures Under Flexural Loading*”. *Composite Structures* 86 (2008) 227–232
- Mallik, P.K. 1988. “*Fibre Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*”, 1st Edition, Marcel Dekker, New York, USA, 331
- Mohammadi, M, V. Akrami and R. Mohammadi Ghazi (2011). “*Methods to Improve Infilled Frame Ductility*”. *Journal of Structural Engineering ASCE* 646-653.
- Narayan dan Mahen. 2003. “*Finite Element Analysis and Design of Sandwich Panels Subject to Local Buckling Effects*”. *Thin-Walled Structures* 42 (2004) 589–611
- OCHA. 2010 . “*Humanitarian Impact Map*”. 11 November
- Physical Properties of Expanded Polystyrene, (EPS) **Brosur Northwest Foam Product, Inc.** 9565 SW Ridder RD, Suite 290 Wilsonville, Oregon
- Plastics Handbook. 1994. “*Modern Plastics Magazine*”, McGraw-Hill, New York, USA,
- Prepreg Technology, CIBA Composites Publication No. FGU 265, 1995
- PUSDALOPS BNPB. 2009. Peta Jumlah Kerusakan Rumah Akibat Gempa Di Provinsi Sumatera Barat . 4 Oktober
- Sharaf, Tarek and Amir Fam (2011). “*Experimental Investigation of Large Scale Cladding Sandwich Panels under Out of Plane Transverse Loading for Building Applications*”. *Journal of Composites for Construction ASCE*. 422-430.
- Sika.com. 2014. *Sandwich Panels - Building for the Future*. 20 Maret
- Tucker, Randolph W. 2003. “*How do the building codes and standards in China compare with those in the U.S?*”. McGraw Hill Construction, 17 Desember
- Uyanik. 2001. “*Introduction of Composite Material*”. Rapra Technology Limited. Exeter UK
- Voyiadjis, George Z and Kattan, Peter, I. 2005. “*Mechanics of Composite Materials with MATLAB*”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Netherland

- WHO Indonesia. 2009. “*Earthquake and Tsunami in Mentawai District, West Sumatera Province, Republic of Indonesia*”. **Emergency Situation Report**. 5 November
- Witkiewicz and Zieliński. 2006. Properties of The Polyurethane (PU) Light *Foams*. *Advances in Materials Science*, Vol. 6, No. 2 (10), October 2006.

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”



BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Tulungagung, 2 April 1990, merupakan anak kelima dari lima bersaudara. Penulis mulai menempuh pendidikan formal dari TK Taman Indria, tahun 1996, setahun kemudian, penulis menuntut ilmu dasar di SDN 1 Tamanan, dilanjutkan SMPN 1 Tulungagung, dan SMAN 1 Boyolangu, yang kesemuanya masih berada pada kota yang sama. Setelah lulus dari SMA tahun 2009, Penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil FTSP – ITS, Surabaya melalui jalur PMDK (Penelusuran Minat dan Kemampuan) dan terdaftar dengan NRP. 3109100055. Empat tahun berselang penulis menuntaskan belajar Strata 1 dengan predikat *cumlaude*. Tahun 2012, setahun sebelum lulus Strata 1, penulis diterima sebagai mahasiswa magister teknik sipil ITS, dengan bidang studi Struktur. Penulis telah banyak terlibat di banyak proyek – proyek gedung selama menempuh studi pascasarjana. Penulis bersama tim, merupakan inisiator rumah prefabrikasi COMPOSITS prebhouse[©]. Penulis dapat dihubungi melalui puputwiyono@gmail.com.