



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS KEKUATAN GELADAK KAPAL BERBAHAN
SANDWICH MATERIAL DENGAN CORE UPR
(UNSATURATED POLYESTER RESIN) - WASTE
MATERIAL TERHADAP BEBAN BUCKLING**

**Pradicha Qolub Nauval
NRP 0411124000076**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS KEKUATAN GELADAK KAPAL BERBAHAN
SANDWICH MATERIAL DENGAN CORE UPR
(UNSATURATED POLYESTER RESIN) - WASTE
MATERIAL TERHADAP BEBAN BUCKLING**

**Pradicha Qolub Nauval
NRP 0411124000076**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



FINAL PROJECT - MN 184802

**STRENGTH ANALYSIS OF SHIP DECK MADE OF UPR
(*UNSATURATED POLYESTER RESIN*) - WASTE
MATERIAL CORED SANDWICH MATERIAL SUBJECTED
TO AXIAL COMPRESSIVE LOAD**

**Pradicha Qolub Nauval
NRP 04111240000076**

**Supervisor
Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA KEKUATAN GELADAK KAPAL BERBAHAN SANDWICH MATERIAL DENGAN CORE UPR (UNSATURATED POLYESTER RESIN) – WASTE MATERIAL TERHADAP BEBAN BUCKLING

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PRADICHA QOLUB NAUVAL
NRP 0411124000076

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.
NIP 19590505 198403 1 012

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Perkapalan

Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 07 AGUSTUS 2020



LEMBAR REVISI

ANALISA KEKUATAN GELADAK KAPAL BERBAHAN SANDWICH MATERIAL DENGAN CORE UPR (UNSATURATED POLYESTER RESIN) – WASTE MATERIAL TERHADAP BEBAN BUCKLING

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 24 Juli 2020

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PRADICHA QOLUB NAUVAL
NRP 0411124000076

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Mohammad Nurul Misbach, S.T., M.T.

2. Dony Setyawan, S.T., M.Eng.

3. Wing Hendroprasetyo A.P, S.T., M.Eng.

4. Totok Yulianto, S.T., M.T.



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.

SURABAYA, 07 Agustus 2020

HALAMAN PERUNTUKAN

Didedikasikan secara khusus kepada Ibu (Mu'minatun), Ayah (Fatkhur Rohim) dan adik-adik (Wardah, Cindy, dan Alfath) tersayang atas do'a, kasih sayang dan dukungannya

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Ibu, Ayah, dan Adik-adik yang senantiasa menjadi motivasi bagi penulis, yang atas do'a, dukungan dan kasih sayangnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
2. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Wali sekaligus Dosen Pembimbing atas bimbingan, nasehat, motivasi, arahan dan bantuannya selama masa perkuliahan dan terkhusus selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
3. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS;
4. M. Nurul Misbach, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS atas bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir ini dan atas ijin pemakaian fasilitas laboratorium;
5. Septia Hardy Sujatanti, S.T., M.T. dan (Alm) Ir. Agung Budipriyanto, M.Eng., Ph.D. selaku pembimbing penulis saat awal mengerjakan Tugas Akhir ini;
6. Seluruh Dosen dan Civitas Akademika Departemen Teknik Perkapalan FTK atas didikan, nasehat, motivasi dan bantuan selama perkuliahan di ITS
7. Tim penelitian *sandwich panel*, Mas Id, Mas Kharis, Pratama Yuli Arianto, Abdi Ismail, Tuswan, dan Chandra yang telah memberikan bantuan pikiran dan tenaga dalam pengerjaan Tugas Akhir ini;
8. Teman-teman kontrakan "Sarang Penyamun" Jihad Faruq Haqiqi, Guntar Ramadhan, Ali Wafa, Arif Tri Mardianto atas sindiran, dorongan dan olok-olok yang senantiasa memotivasi selama 3 tahun terakhir;
9. Teman-teman IMM Sepuluh Nopember, yang telah memberikan penulis banyak pembelajaran dan motivasi untuk lebih baik;
10. Rekan-rekan P52 Forecastle yang telah menemani penulis pada sebagian besar masa perkuliahan penulis di Departemen Teknik Perkapalan ITS.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 07 Agustus 2020

Pradicha Qolub Nauval

ANALISA KEKUATAN GELADAK KAPAL BERBAHAN SANDWICH MATERIAL DENGAN CORE UPR (UNSATURATED POLYESTER RESIN) – WASTE MATERIAL TERHADAP BEBAN BUCKLING

Nama Mahasiswa : Pradicha Qolub Nauval
NRP : 04111240000076
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Sandwich material adalah salah satu jenis material komposit yang telah banyak digunakan di bidang dirgantara, olahraga, otomotif, dan maritim. Meluasnya penggunaan *sandwich material* diakibatkan oleh tingginya nilai rasio kekakuan terhadap berat, dan kemampuan menyerap energi yang tidak dimiliki oleh material homogen biasa. *Sandwich material* biasanya tersusun dari dua lapisan tipis material *face* yang dipisahkan oleh *core material* atau material inti. *Sandwich material* dalam studi ini menggunakan *core material* yang terbuat dari *Unsaturated polyester resin* (UPR) dengan *filler* dari variasi *waste material*. *Sandwich material* tersebut diuji dengan pembebanan aksial untuk melihat perilaku *buckling* dari *sandwich material* tersebut. *Waste material* yang digunakan sebagai *filler* pada penelitian ini berupa cangkang kerang dan cangkang telur. Cangkang telur dan cangkang kerang telah diketahui dapat meningkatkan keuletan dari UPR.

Pada penelitian ini digunakan dua variasi persentase untuk *waste material*, yaitu 20% dan 30% dan 2 variasi *waste material* yaitu cangkang kerang dan cangkang telur sehingga secara keseluruhan akan diteliti 4 variasi *core material*. Standar yang digunakan dalam pengujian *buckling* adalah ASTM C364-99 dan untuk standar *sandwich material* adalah Lloyd's Register. Dari Pengujian yang dilakukan diketahui bahwa jenis material *filler* sangat berpengaruh pada kekuatan *buckling* dari *sandwich material*. Dari data hasil uji eksperimen didapatkan bahwa pada persentase yang sama, *filler* cangkang telur menghasilkan *sandwich material* yang lebih kuat dibanding cangkang telur. Selain itu berdasarkan analisa grafik hasil pengujian, diketahui bahwa cangkang telur menghasilkan *sandwich material* yang lebih *ductile* dibandingkan cangkang kerang. Dari pengujian juga diketahui bahwa persentase *filler* material memiliki pengaruh terhadap kekuatan *buckling sandwich material*. Berdasarkan analisis hasil pengujian didapatkan bahwa untuk semua jenis *filler*, persentase 30% menghasilkan *sandwich material* yang lebih baik dari persentase 20%. Kemudian melalui analisa hasil pengujian didapati bahwa variasi *sandwich material* yang menggunakan *filler* cangkang telur memenuhi *buckling requirement* yang ditetapkan oleh LR, sedangkan untuk cangkang kerang hanya persentase 30% yang memenuhi *buckling requirement* LR dan dapat diaplikasikan pada geladak utama kapal.
Kata kunci: Struktur Kapal, *Sandwich material*, *Buckling*, *Waste Material*, Cangkang Kerang, Cangkang Telur

STRENGTH ANALYSIS OF SHIP DECK MADE OF UPR (UNSATURATED POLYESTER RESIN) - WASTE MATERIAL *CORED* SANDWICH MATERIAL SUBJECTED TO UNI-AXIAL COMPRESSIVE LOAD

Author : Pradicha Qolub Nauval
Student Number : 0411124000076
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : Prof. Ir.Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Sandwich material is one type of composite material that has been widely used in the aerospace, sports, automotive and maritime fields. The widespread use of sandwich materials is due to the high value of the ratio of stiffness to weight, and the ability to absorb energy that is not possessed by ordinary homogeneous materials. Sandwich material is usually composed of two thin layers of face material separated by core material or core material. Sandwich material in this study uses core material made from Unsaturated polyester resin (UPR) with filler from waste material variations. The sandwich material is tested by applying axial loading to see the buckling behavior of the sandwich material. Waste material used as filler in this research is in the form of shells and eggshell. Eggshells and shells have been known to increase the toughness of UPR.

In this study two variations of percentage used for material waste, 20% and 30% and 2 variations of waste material, clamshells and eggshells so that as a whole there are 4 core material variations will be examined. The standard used in buckling testing is ASTM C364-99 and for the sandwich material standard is Lloyd's Register.

From the tests conducted it is known that the type of filler material is very influential on the buckling strength of the sandwich material. From the experimental test data it was found that at the same percentage, the eggshell filler produced a stronger sandwich material than the clamshell. In addition, based on a graphical analysis of the test results, it is known that egg shells produce more ductile sandwich material than clamshells. From the test it is also known that the percentage of filler material has effect on the buckling strength of the sandwich material. Based on the analysis of the test results it was found that for all types of fillers, the percentage of 30% produces a better sandwich material in term of buckling strength than the percentage of 20%. Then through analysis of the test results it was found that the variation of sandwich material using eggshell filler fulfills the buckling requirements specified by the LR, while for shellfish only a percentage of 30% meets the LR buckling requirements and can be applied to the main deck of the ship.

Keywords: Ship structure, *sandwich material*, buckling, waste material, clamshell, eggshell.

DAFTAR ISI

LEMBAR REVISI.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
ABSTRAK.....	xiii
ABSTRACT	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Manfaat	4
1.6. Hipotesis	4
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1. <i>Sandwich material</i>	5
2.2. Kelebihan Penggunaan <i>Sandwich material</i>	8
2.3. Aplikasi <i>Sandwich material</i> Pada Konstruksi Kapal.....	10
2.4. Material Penyusun <i>Sandwich material</i>	10
2.4.1. <i>Face material</i>	10
2.4.2. <i>Core material</i>	11
2.4.3. <i>Epoxy resin</i>	14
2.5. <i>Waste Material</i>	15
2.5.1. Cangkang Kerang.....	16
2.5.2. Cangkang Telur.....	18
2.6. Penentuan Ketebalan <i>Sandwich material</i>	20
2.7. <i>Buckling</i>	23
2.8. Standarisasi Pengujian <i>Buckling</i>	24
2.9. <i>Acceptance criteria</i>	25
2.10. Metode Elemen Hingga	26
BAB 3 METODOLOGI	31
3.1. Bagan Alir.....	31
3.2. Studi Literatur	32
3.3. Pengumpulan Data Awal	32
3.3.1. Data kapal yang akan disimulasikan.....	32
3.4. Penyiapan Material	33
3.4.1. Penyiapan Material Skin	33
3.4.2. Penyiapan Material <i>Core</i>	34
3.5. Perencanaan <i>Sandwich material</i>	36
3.6. Pembuatan <i>Sandwich material</i>	38
3.7. Identifikasi Spesimen <i>Sandwich material</i>	43
3.7.1. Penghitungan massa jenis <i>sandwich material</i>	43
3.7.2. Pengujian <i>Buckling</i>	44

3.8. Pemodelan Numerik <i>Sandwich material</i> Menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM)	45
3.9. Analisa Hasil dan Pengambilan Kesimpulan	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1. Identifikasi <i>Sandwich material</i>	51
4.2. Pengujian <i>Buckling</i> Pada <i>Sandwich</i>	52
4.2.1. Proses Kegagalan Material	52
4.2.2. Hasil Pengujian <i>Buckling</i>	54
4.3. Pemodelan Numerik Pengujian <i>Buckling</i>	59
4.3.1. Hasil pemodelan Numerik	59
4.4. Perbandingan Hasil Pengujian Eksperimen dan Pemodelan Numerik	61
4.5. Penentuan <i>Yield Stress</i> dan Analisa <i>Yield Stress</i> dari <i>Sandwich material</i>	62
4.6. Penghitungan <i>Acceptance criteria Sandwich material</i>	67
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73
BIODATA PENULIS	85
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A Perhitungan ketebalan <i>sandwich material</i>	
LAMPIRAN B Hasil pengujian <i>buckling</i> dari <i>sandwich material</i>	
LAMPIRAN C Hasil pemodelan numerik	
LAMPIRAN D Perhitungan <i>buckling requirement</i> dari <i>sandwich material</i>	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur umum <i>sandwich material</i>	5
Gambar 2.2 Konfigurasi <i>core</i> dari <i>sandwich material</i> yang konvensional (Zenkert 1995)	6
Gambar 2.3 Contoh variasi konfigurasi <i>core</i> dari <i>sandwich material</i> (www2.virginia.edu)	7
Gambar 2.4 Perbandingan <i>sandwich material</i> dan profil I (Hexweb, 2007).....	7
Gambar 2.5 Ilustrasi “ <i>Sandwich effect</i> ” (Hexcel Composites, 2000)	8
Gambar 2.6 Laju peningkatan kekakuan dan berat terhadap peningkatan tebal <i>core</i> (DIAB, 2018).....	9
Gambar 2.7 Tampilan <i>unsaturated polyester resin</i>	12
Gambar 2.8 Cangkang kerang (kiri) dan cangkang telur (kanan) yang.....	13
Gambar 2.9 Tampilan Katalis.....	14
Gambar 2.10 Tampilan <i>epoxy resin</i> dan <i>hardener</i>	15
Gambar 2.11 Morfologi kerang darah (satujutaidea.blogspot.com).....	16
Gambar 2.12 Peta persebaran kerang darah (www.aquamaps.org).....	17
Gambar 2.13 Telur Ayam (www.wellandgood.com)	18
Gambar 2.14 Definisi skematis <i>sandwich material</i> (LR, 2015)	21
Gambar 2.15 langkah perhitungan ketebalan <i>sandwich</i> (LR,2015)	22
Gambar 2.16 2 mode <i>buckling</i> awal (Jones, 2006).....	24
Gambar 2.17 Set up perlengkapan pengujian <i>buckling</i> (ASTM, 1999)	25
Gambar 2.18 Jenis elemen pada metode elemen hingga (Logan, 2007)	28
Gambar 3.1 diagram alir rencana penelitian.....	31
Gambar 3.2 Rencana umum kapal container 100 TEUs	32
Gambar 3.3 Perbandingan pelat sebelum (atas) dan sesudah dilakukan <i>sandblasting</i> (bawah)	33
Gambar 3.4 Proses penyaringan serbuk cangkang kerang dan cangkang telur.....	35
Gambar 3.5 Serbuk cangkang kerang dan cangkang telur hasil pengayakan.....	35
Gambar 3.6 Rencana konstruksi memanjang kapal.....	36
Gambar 3.7 Rencana Konstruksi melintang kapal	37
Gambar 3.8 Dimensi spesimen uji <i>sandwich material</i>	38
Gambar 3.9 Kertas pembatas untuk cetakan <i>sandwich material</i>	39
Gambar 3.10 Cetakan spesimen <i>sandwich material</i>	39
Gambar 3.11 Penimbangan <i>epoxy resin</i> (kiri) dan <i>hardener</i> (kanan)	40
Gambar 3.12 Pengaplikasian <i>epoxy resin</i> pada cetakan	40
Gambar 3.13 Proses penimbangan bahan untuk pembuatan <i>sandwich material</i>	41
Gambar 3.14 Pencampuran bahan <i>core material</i>	42
Gambar 3.15 Campuran <i>core material</i>	42
Gambar 3.16 Penuangan campuran <i>core material</i> ke dalam cetakan.....	43
Gambar 3.17 set up peralatan eksperimen.....	44
Gambar 3.18 Pendefinisian geometris <i>face plate</i> dan <i>core material</i>	45
Gambar 3.19 Tampilan <i>face plate</i> hasil proses <i>extrusion</i>	46
Gambar 3.20 Tampilan <i>core material</i> hasil proses <i>extrusion</i>	46
Gambar 3.21 Tampilan <i>assembly</i> dari <i>sandwich material</i>	47
Gambar 3.22 Tampilan model setelah kondisi batas dan <i>constraint</i> diaplikasikan.....	48
Gambar 3.23 Tampilan model setelah dilakukan <i>meshing</i>	49
Gambar 4.1 Kondisi pembebanan awal.....	53

Gambar 4.2 Kondisi defleksi awal pada benda uji	53
Gambar 4.3 crack yang terjadi akibat defleksi yang terlalu besar	54
Gambar 4.4 Kegagalan spesimen.....	54
Gambar 4.5 Grafik hasil pengujian <i>sandwich</i> A	55
Gambar 4.6 Grafik hasil pengujian <i>sandwich</i> B	56
Gambar 4.7 Grafik hasil pengujian <i>sandwich</i> c	57
Gambar 4.8 Grafik hasil pengujian <i>sandwich</i> D	57
Gambar 4.9 Grafik perbandingan nilai beban kritis <i>sandwich material</i>	58
Gambar 4.10 Hasil pemodelan numerik <i>sandwich</i> A	60
Gambar 4.11 Hasil pemodelan numerik <i>sandwich</i> B.....	60
Gambar 4.12 Hasil pemodelan numerik <i>sandwich</i> C.....	60
Gambar 4.13 Hasil pemodelan numerik <i>sandwich</i> D	61
Gambar 4.14 Diagram <i>stress-strain</i> dari <i>sandwich</i> A.....	63
Gambar 4.15 Diagram <i>stress-strain</i> dari <i>sandwich</i> B.....	63
Gambar 4.16 Diagram <i>stress-strain</i> dari <i>sandwich</i> C.....	64
Gambar 4.17 Diagram <i>stress-strain</i> dari <i>sandwich</i> D.....	64
Gambar 4.18 Penggambaran garis ofset pada diagram <i>stress-strain</i>	65
Gambar 4.19 Perbandingan nilai <i>yield stress</i> dari <i>sandwich material</i>	66
Gambar 4.20 Perbandingan nilai <i>critical buckling stress</i> dari <i>sandwich material</i>	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konfigurasi jenis bahan penyusun <i>sandwich material</i> . (SAND.Core 2013)	6
Tabel 2.2 Klasifikasi taksonomi kerang darah	16
Tabel 2.3 Kandungan cangkang kerang darah.....	18
Tabel 2.4 Kandungan cangkang telur	19
Tabel 2.5 Produksi telur ayam berdasarkan provinsi di Indonesia 2009-2019 (BPS,2020).....	20
Tabel 2.6 Ketebalan minimal pelat (LR,2015)	21
Tabel 2.7 <i>Thickness allowance</i> yang diperbolehkan pada tiap bagian kapal (LR, 2015).....	21
Tabel 3.1 Data ukuran utama kapal	32
Tabel 3.2 Hasil perhitngan tebal <i>sandwich material</i> di geladak.....	37
Tabel 3.3 variasi <i>sandwich material</i> yang akan diteliti	38
Tabel 3.4 Sifat fisis dan mekanis material penyusun <i>sandwich material</i>	47
Tabel 4.1 Identifikasi massa jenis <i>sandwich material</i>	51
Tabel 4.2 Nilai P_{ult} hasil pengujian <i>buckling</i>	58
Tabel 4.3 Nilai beban kritis P_{ult} <i>sandwich material</i> hasil pemodelan	61
Tabel 4.4 Nilai beban <i>ultimate</i> P_{ult} hasil eksperimen dan pemodelan	62
Tabel 4.5 Nilai <i>yield stress</i> dan <i>critical buckling stress</i>	65
Tabel 4.6 Hasil perhitungan <i>buckling requirement</i> dari <i>sandwich material</i> untuk aplikasi 0,4L <i>amidship</i>	68
Tabel 4.7 Hasil perhitungan <i>buckling requirement</i> dari <i>sandwich material</i> untuk aplikasi diluar 0,4L <i>amidship</i>	68

DAFTAR SIMBOL

l	= panjang panel, (m)
Z_{rule}	= ekuivalen nodulus penampang, (cm^3); disesuaikan penampang <i>midship</i>
t_c	= pilihan ketebalan lapisan inti, (mm)
a	= panjang panel pada bagian terpanjang (mm)
b	= lebar panel pada bagian terpendek, (mm)
t_1, t_2	= ketebalan pelat atas dan pelat bawah, (mm)
t_{rule}	= tebal pelat sesuai rute
k	= faktor kekuatan baja
P	= beban / <i>load</i>
s	= jarak pembujur, (mm)
σ_c	= tegangan <i>buckling</i> material, (MPa)
σ_d	= tegangan kompresi desain, (MPa)
σ	= tegangan yang terjadi ketika struktur mengalami pembebanan, (MPa)
P	= beban yang bekerja pada struktur, (N)
A	= luas permukaan yang terkena beban, (mm^2)
P_{ult}	= beban <i>ultimate</i> , (N)
σ_0	= <i>specified minimum yield stress</i> , (MPa)
σ_{cr}	= tegangan kritis material, (MPa)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Sandwich material secara umum adalah salah satu dari *advance material* yang merupakan pengembangan penelitian lebih lanjut dari *composite material*. *Sandwich material* diketahui memiliki kekuatan yang hampir sama dengan logam, namun memiliki berat yang lebih ringan. Hal ini dikarenakan *sandwich material* terdiri dari lapisan-lapisan material yang berbeda. Lapisan-lapisan material yang berda tersebut digabungkan untuk membentuk *sandwich material* yang memiliki bobot lebih ringan dari material logam.

Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh Ramakrishnan & Kumar (2016), Disebutkan bahwa *sandwich material* memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan konstruksi pelat berpenegar pada umumnya, diantaranya lebih mudah di fabrikasi, memiliki fitur desain yang lebih baik, berat yang lebih ringan dan biaya pembangunan yang lebih murah. Masih dalam penelitian yang sama disebutkan pula kelebihan lain dari *sandwich material* diantaranya memiliki karakteristik peredaman yang lebih baik, lebih tahan korosi, ketahanan terhadap api dan memiliki performa yang baik dalam kondisi pembebanan tiba-tiba.

Beberapa penelitian juga mengungkapkan bahwa aplikasi *sandwich material* sebagai material konstruksi kapal dapat mengurangi berat kosong kapal. Lebih lanjut Momcilovic & Motok (2009) melakukan studi dengan model kapal danube *barge* berbagai jenis mulai dari *general cargo*, *bulk carrier* hingga *container carrier*, menyimpulkan bahwa penggunaan *sandwich material* untuk pembangunan lambung kapal secara keseluruhan dapat menghasilkan pengurangan berat berkisar antara 5 hingga 8%.

Di Indonesia sendiri, penggunaan *sandwich material* sebagai material konstruksi kapal juga mulai diteliti. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Baidowi dkk (2015), dilakukan studi komparasi antara penggunaan konstruksi *inner bottom* konvensional pada kapal *Bulk Carrier* dengan konstruksi SPS yang menggunakan *face plate* baja dan *core material* berbahan *polyurethane elastomer* menghasilkan kesimpulan bahwa *inner bottom* yang menggunakan konstruksi SPS (*Sandwich Panel System*) dapat mengurangi berat kapal sebesar 13,05%. Dalam penelitian lainnya yang dilakukan oleh Abdullah dkk (2018) menyatakan bahwa penggunaan

SPS yang menggunakan *core material* dari campuran *unsaturated polyester resin* dan limbah cangkang kerang pada konstruksi geladak kapal *container* dapat mengurangi berat kapal sebesar 4,8% hingga maksimal 6,6 %. Dalam penelitian lainnya yang dilakukan oleh Mula dkk (2018) yang meneliti penggunaan konstruksi SPS pada konstruksi lambung kapal bagian sisi yang menggunakan *core material* dari campuran *unsaturated polyester resin* dan cangkang telur menyatakan terjadi pengurangan berat mencapai 5% apabila konstruksi lambung kapal dibangun menggunakan SPS tersebut.

Selain meneliti penggunaan *sandwich material* secara konstruksi, penelitian tentang *sandwich material* juga mulai diarahkan untuk mencari kombinasi bahan penyusun *sandwich material*, terutama bahan campuran untuk *core material*. Beberapa campuran *filler* untuk *core material* yang telah diteliti diantaranya *Polyurethane foam*, *polyresin*, dan *synthetic resin* (Utomo et al., 2016), *Polyurethane* dan serbuk gergaji (Purwoko et al, 2017), *Polyurethane* dan sekam padi (Yudiono et al.,2017), *Unsaturated polyester resin* dan cangkang kerang (Abdullah, et al., 2018), dan campuran antara *unsaturated polyester resin* dan cangkang telur (Mula, et al., 2018).

Dalam beberapa penelitian sebelumnya, terdapat beberapa variasi material yang telah diteliti, diantaranya, *polyurethane*, *unsaturated polyester resin*, *epoxy resin*. Dari beberapa material tersebut, matriks *polyurethane* memiliki densitas hanya 80 kg/m³, sedangkan *epoxy resin* dan *unsaturated polyester resin* memiliki densitas diatas 1000 kg/m³. Berdasarkan persyaratan yang ditetapkan Lloyd's register adalah 1000 kg/ m³, sehingga material yang dapat digunakan sebagai bahan untuk *core material* adalah *epoxy resin* dan *unsaturated polyester resin*. Namun jika dipertimbangkan kembali, berdasarkan harganya maka *unsaturated polyester resin* yang dapat digunakan karena harganya yang lebih murah jika dibandingkan dengan *epoxy resin*.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Abdullah dkk (2018) dan Mula dkk (2018), telah diteliti *sandwich material* dengan core menggunakan *filler* cangkang kerang dan cangkang telur, mulai dari identifikasi *core material* hingga identifikasi *sandwich material*. Penelitian tersebut ditujukan untuk mengetahui *mechanical properties* dan perilaku dinamis dari *sandwich material*. Akan tetapi dalam penelitian tersebut belum dilakukan pengujian *buckling* terhadap *sandwich material*. Hal ini dikarenakan pengujian *buckling* tidak termasuk pengujian yang disyaratkan oleh biro klasifikasi yang dimaksud yaitu Lloyd's register. Meskipun demikian

dalam *rule* yang diterbitkan oleh LR jelas diatur *buckling requirement* meskipun tidak digunakan dalam *material acceptance criteria* yang ditentukan.

Karena faktor tersebut, maka pada penelitian ini akan diteliti perilaku buckling dari beberapa variasi *filler* material, sehingga dapat diketahui pengaruh *filler* material terhadap kekuatan buckling dari *sandwich material* yang dihasilkan. Melalui uji *buckling*, diharapkan akan dapat diketahui mode kegagalan dan perilaku dari *sandwich material* ketika mengalami beban *uniaxial*. Sebagaimana diketahui, *buckling* merupakan mode kegagalan terburuk diantara mode kegagalan lainnya, karena itu uji *buckling* sangat penting dilakukan pada material. Urgensi dari uji *buckling* ini terutama karena *sandwich material* merupakan gabungan dari beberapa material dan bukan material yang homogen. Menggunakan bekal penelitian sebelumnya sebagai dasar, maka variasi persentase yang digunakan pada penelitian ini juga dibatasi pada nilai variasi yang menghasilkan *mechanical properties* paling baik pada penelitian sebelumnya. Selain itu pemberian variasi pada penelitian ini juga untuk mengetahui pengaruh variasi jenis *filler* dan persentasenya terhadap kekuatan buckling dari *sandwich material*.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan pada subbab sebelumnya, maka masalah yang ingin dipecahkan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jenis material *filler* pada *core* terhadap kekuatan *buckling* dari *sandwich material*?
2. Bagaimana pengaruh komposisi *filler* pada *core* terhadap kekuatan *buckling* dari *sandwich material*?
3. Apakah *sandwich material* yang menggunakan *filler* dari *waste material* memenuhi persyaratan *buckling requirement* yang ditetapkan biro klasifikasi

1.3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diutarakan, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui pengaruh jenis material *filler* pada *core* terhadap kekuatan *buckling* dari *sandwich material*.
2. Mengetahui pengaruh komposisi *filler* pada *core* terhadap kekuatan *buckling* dari *sandwich material*.

3. Mengetahui apakah *sandwich material* yang menggunakan *filler* dari *waste material* memenuhi persyaratan *buckling requirement* yang ditetapkan biro klasifikasi

1.4. Batasan Masalah

Agar pembahasan topik dalam penelitian ini tidak melebar, maka pembahasan permasalahan pada penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. *Filler material* yang digunakan untuk *core* pada *sandwich material* adalah cangkang kerang dan cangkang telur.
2. Rasio *filler* yang digunakan sebagai variasi pada *core material* adalah 20% dan 30%.
3. Standar yang digunakan dalam pengujian *buckling sandwich material* adalah ASTM C364-99.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memperkaya khazanah pengetahuan tentang *sandwich material* untuk aplikasi pada struktur kapal.
2. Sebagai bahan untuk studi lanjutan tentang variasi *sandwich material* dan aplikasinya.
3. Sebagai referensi dalam pembuatan *sandwich material* yang menggunakan *core* dengan *filler waste material* yang memenuhi standar dari Lloyd's Register (LR).

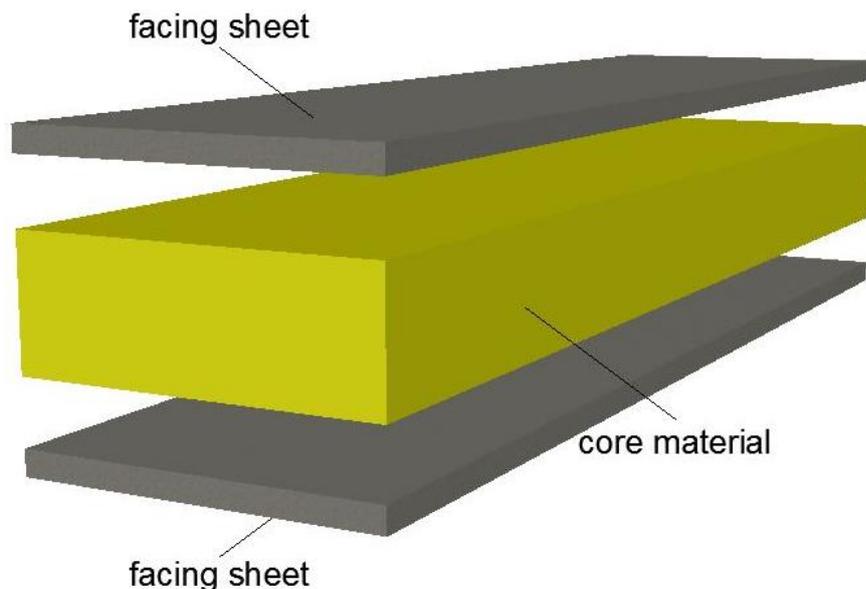
1.6. Hipotesis

Pada penelitian ini ditarik hipotesis bahwa jenis dan persentase *filler* yang digunakan pada *core material* berpengaruh pada kekuatan *buckling* dari *sandwich material*. Selain itu *Sandwich material* dengan material *core* menggunakan *filler* berupa *waste material* memiliki persyaratan yang ditetapkan oleh biro klasifikasi.

BAB 2 STUDI LITERATUR

2.1. *Sandwich material*

Sandwich material merupakan salah satu jenis dari material komposit spesial. *Sandwich material* tersusun dari dua atau lebih material yang disusun berlapis-lapis satu sama lain yang akan menghasilkan satu kesatuan material yang heterogen. Bahan penyusun *sandwich material* biasanya terdiri dari 2 bagian, yaitu bagian *face* atau kulit dan bagian *core* atau inti dari *sandwich material* (Gambar 2.1). Bahan *sandwich*, yang terdiri dari dua permukaan tipis yang dipisahkan oleh inti (*core*) dengan kepadatan rendah yang menghasilkan struktur heterogen yang kaku namun tetap ringan. Perbedaan jenis material penyusun pada *sandwich material* menghasilkan material baru yang memiliki sifat kombinasi dari material penyusunnya.



Gambar 2.1 Struktur umum *sandwich material*

Melihat perkembangan teknologi material yang semakin pesat, terdapat banyak sekali material yang dapat dikombinasikan sebagai bahan untuk *sandwich material*. Secara umum material yang digunakan sebagai bahan penyusun *sandwich material* dapat dikelompokkan ke dalam material metal dan non metal. Di dalam industri perkapalan, terdapat beberapa jenis *sandwich material* yang banyak dikembangkan yaitu:

1. *All-Metal*. Pada jenis ini, kulit (*face*) dan inti (*core*) terbuat dari bahan metal. Pada tipe ini bagian *core* dibuat dari metal yang telah dibentuk terlebih dahulu.

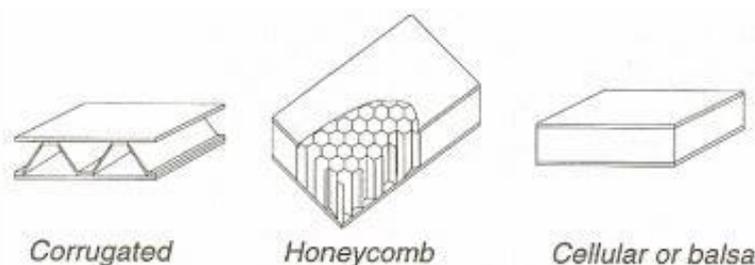
2. *Hybrid Metal. Sandwich material* jenis ini merupakan campuran antara bahan metal dan non metal. *Face* pada *sandwich material* jenis ini terbuat dari bahan metal dengan inti terbuat dari bahan non metal, seperti polimer, elastomer, dan material ringan lainnya.
3. *Composite*. Pada *sandwich material* jenis ini, *face* dibuat dari fiber dan *core* terbuat dari bahan *foam, balsa*, polimer, elastomer, dan lain-lain.

Konfigurasi *sandwich material* berdasarkan material penyusunnya dapat disimpulkan sebagaimana dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Konfigurasi jenis bahan penyusun *sandwich material*. (SAND.Core, 2013)

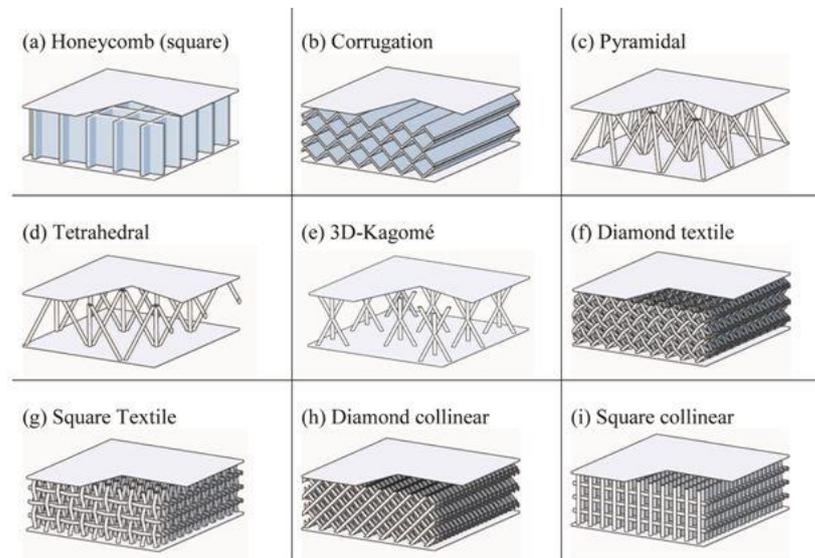
Sandwich Structures						
All-Metal			Hybrid Metal			Composite
Core Stiffeners		Solid Core Layer	Core Stiffeners		Solid Core Layer	Core Stiffeners
Unidirectional	Multi-Directional		Unidirectional	Multi-Directional		
Both the sandwich facings and core are metallic materials. The latter can consist of uni- or multi-directional core stiffeners, metallic foams, or honeycombs. The normal materials used for all-metal sandwich structures are steel and aluminium.			The sandwich contains a mixture of metallic and non-metallic materials. This usually means that the sandwich facings are metallic and the sandwich core contains some non-metallic materials (e.g. foam-filled cavities, non-metallic stiffeners, or elastomers).			Facing sheets are fibre reinforced polymers. Cores are normally polymer foams, honeycombs or balsa.

Material yang digunakan untuk lapisan kulit dapat terbuat dari polimer berserat (*fiber reinforced polymer, FRP*) atau terbuat dari bahan metal konvensional seperti baja, aluminium dan bahan metal lainnya. Pilihan bahan untuk *core material* juga lebih banyak dan lebih bervariasi, karena untuk *core material* bergantung pada konfigurasi dan jenis *core*. Untuk *core* berbahan metal, biasanya diatur konfigurasinya sedemikian rupa sehingga meningkatkan kekuatan material *sandwich* secara keseluruhan. Secara umum Konfigurasi *core* pada *sandwich material* dapat dibedakan menjadi 4 jenis, yaitu *corrugated*, *honeycomb*, dan *balsa/seluler* (Gambar 2.2). Konfigurasi yang dipakai untuk *core material* bergantung pada jenis dari *core material* yang digunakan.



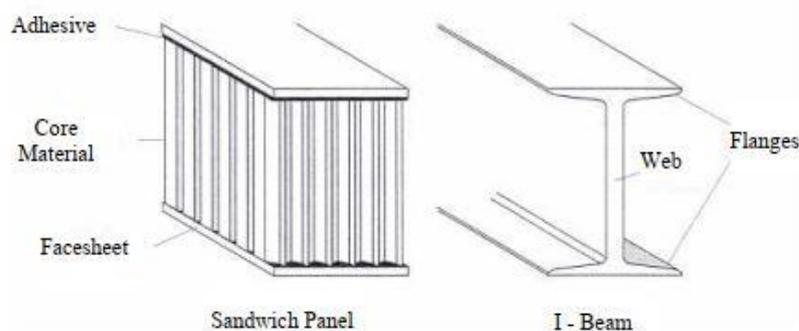
Gambar 2.2 Konfigurasi *core* dari *sandwich material* yang konvensional (Zenkert 1995)

Namun seiring dengan digunakannya material-material baru sebagai bahan *sandwich material*, maka konfigurasi *core* juga lebih bervariasi. Konfigurasi *core* berbahan metal diantaranya berbentuk honeycomb, corrugated, truss *core*, C *core*, Z cor, I *core*. Variasi konfigurasi *core material* pada *sandwich* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Contoh variasi konfigurasi *core* dari *sandwich material* (www2.virginia.edu)

Konsep dasar dari *sandwich material* adalah bahwa *face material* bertugas menahan beban *bending* dan *out-plane load* lainnya sedangkan *core material* bertugas menahan beban geser dan *in-plane load* lainnya. *Sandwich material* bekerja sebagaimana profil I konvensional yang tersusun dari 2 buah *flange* dan *web* yang menghubungkan kedua *flange* tersebut (Gambar 2.4). *web* yang menghubungkan kedua *flange* memungkinkan kedua *flange* untuk bereaksi bersama dan menahan tegangan geser. Pada *sandwich* bagian *face* dapat disamakan dengan *flange* pada profil I, sedangkan *core material* sama dengan bagian *web* dari profil I (Paik et al, 1999).

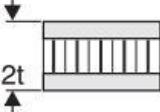
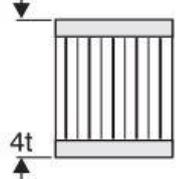


Gambar 2.4 Perbandingan *sandwich material* dan profil I (Hexweb, 2007)

Core material pada *sandwich* tidak dapat menahan tegangan tarik demikian halnya dengan tegangan tekan. Akan tetapi, *core material* memiliki beberapa fungsi, diantaranya menahan *face*, menjadikan keseluruhan material berfungsi sebagai satu unit dengan kekakuan torsional dan *bending* yang tinggi. Sebagai tambahan *core material* juga harus memiliki kekuatan geser yang tinggi agar dapat menjadikan material *sandwich* secara keseluruhan memiliki ketahanan *buckling* yang tinggi. Dan perlu dicatat pula bahwa tegangan tarik dan tekan yang bekerja pada *core* jauh lebih kecil daripada yang bekerja pada *face* (Calister, 2006).

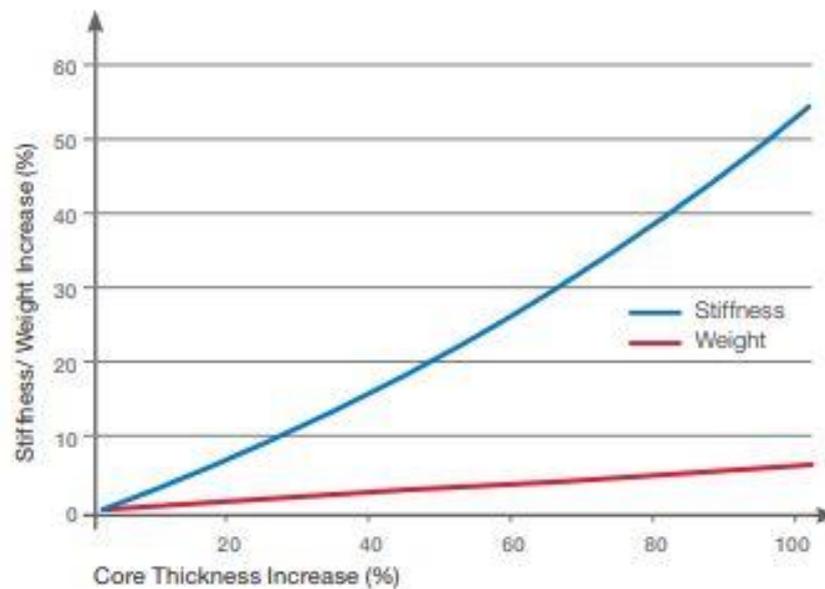
2.2. Kelebihan Penggunaan *Sandwich material*

Sebagaimana telah kita ketahui, *sandwich material* terdiri dari material *face* dan *core*. Pemisahan kedua *face* oleh *core* yang ringan meningkatkan momen area dan juga kekakuan *bending* dengan hanya sedikit peningkatan berat. Fenomena pada *sandwich material* ini biasa disebut “efek *sandwich*” (Gambar 2.5). Fenomena tersebut menunjukkan beberapa kelebihan *sandwich material*.

	Solid Material	Core Thickness t	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

Gambar 2.5 Ilustrasi “*Sandwich effect*” (Hexcel Composites, 2000)

Pada Gambar 2.5 dapat dilihat bahwa rasio kekakuan dan kekuatan tekuk terhadap berat meningkat secara signifikan, terutama pada *sandwich* dengan ketebalan *core* 3 kali tebal awal T . Bahkan ketika ketebalan *core* hanya $2T$, rasio kekakuan terhadap berat meningkat 7 kali lipat sedangkan rasio kekuatan tekuk meningkat 3 kali lipat dengan berat hanya meningkat 3% dari berat awal pelat tanpa *core material*. Untuk melihat lebih jelas laju peningkatan kekakuan *sandwich* terhadap peningkatan berat dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Laju peningkatan kekakuan dan berat terhadap peningkatan tebal *core* (DIAB, 2018)

Karena desain serta fiturnya yang mengombinasikan material yang sifat mekanis yang berbeda, secara umum *sandwich material* memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan material logam konvensional. *Sandwich material* memberikan peluang untuk memanfaatkan setiap komponen hingga ke batasnya. Kelebihan dari *sandwich material* yang sangat jelas adalah tingginya rasio kekuatan terhadap berat sebagaimana rasio kekuatan *bending* terhadap berat. Selain itu *sandwich material* juga menambah kekakuan lentur yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan material konvensional dengan berat yang tidak jauh berbeda. Pada umumnya *sandwich material* juga menawarkan kekuatan yang setidaknya sama atau bahkan lebih tinggi dari baja maupun metal lainnya dan dengan modulus yang lebih besar. *Core material* pada *sandwich* memberikan penguatan yang menerus pada *face* yang tidak didapati pada struktur berpenegar. Hal ini mengindikasikan permukaan *sandwich* dapat bertahan terhadap beban *buckling* maupun *bending* yang lebih tinggi. Karakteristik ini cenderung menguntungkan untuk aplikasi pada struktur kapal dimana akan menghasilkan permukaan lambung yang lebih rata meskipun mendapat beban dari lingkungan tempat kapal beroperasi. *Sandwich material* dalam beberapa aplikasi telah menunjukkan kekuatan fatigue yang superior, meskipun hal ini masih membutuhkan penyelidikan lebih lanjut. Kelebihan lainnya adalah pada penggunaan *core material* tipe seluler yang mengindikasikan tidak perlu adanya tambahan insulasi karena *core material* jenis seluler memiliki konduktivitas termal yang rendah. Karena *sandwich material* tidak perlu memasang insulasi tambahan menyebabkan pengurangan berat yang substansial dan memastikan berat struktur tetap ringan. *Sandwich material* juga memiliki

kemampuan menyerap energi mekanis dalam beberapa mode deformasi berkali lipat lebih baik dari struktur monocoque (Zenkert, 1997).

Menurut Brooking & Kennedy (2004) Keunggulan *sandwich material* pada aplikasi di kapal diantaranya:

1. Struktur sederhana dan mudah untuk dibangun
2. Perawatan yang dibutuhkan minimal
3. Menambah ketahanan terhadap korosi
4. Tahan terhadap retak dan masalah struktural lainnya

2.3. Aplikasi *Sandwich material* Pada Konstruksi Kapal

Penggunaan *sandwich material* pada kapal telah banyak dilakukan baik pada konstruksi bagian kapal secara parsial maupun secara keseluruhan. Aplikasi *sandwich material* juga tidak terbatas pada kapal dagang atau kapal konvensional biasa, bahkan kapal perang telah banyak yang mengadopsi *sandwich material* sebagai material untuk pembangunan kapal. Yang paling terbaru adalah kapal perusak kelas Zumwalt yang menggunakan *sandwich material* pada bagian superstruktur.

2.4. Material Penyusun *Sandwich material*

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa *sandwich material* adalah material yang tersusun dari bagian *face* dan *core*. Masing-masing dari material *face* maupun *core* memiliki karakteristik yang harus dipenuhi agar mampu membuat *sandwich material* yang baik dan memiliki sifat yang unggul.

2.4.1. *Face material*

Hampir semua material struktural yang tersedia dalam bentuk lembaran dapat digunakan sebagai *face material* untuk *sandwich* (Allen, 1969). Pernyataan tersebut dapat menjadi gambaran umum dari variasi material yang dapat dipakai sebagai *face* dari *sandwich material*. Meskipun banyak material yang dapat digunakan sebagai *face* dari *sandwich material*, namun secara umum terdapat beberapa kriteria yang harus dipenuhi oleh material tersebut, diantaranya:

1. Kekakuan yang tinggi sehingga menghasilkan kekakuan *bending* yang tinggi pula
2. Kekuatan tekan dan tarik tinggi

3. Tahan impact
4. Permukaan yang baik
5. Ketahanan terhadap kondisi lingkungan (korosi, salinasi, reaksi kimia, UV, suhu,dll)
6. Ketahanan pemakaian

Material *face* yang jamak dipakai dapat dikelompokkan menjadi 2 grup, yaitu material metal dan non metal. Material yang pertama-tama dipakai sebagai *face* diantaranya baja, stainless, dan aluminium *alloy*. Terdapat banyak jenis logam *alloy* yang dapat digunakan untuk *face* yang memiliki kekuatan bervariasi namun dengan kekakuan yang hampir homogen. Untuk material non metal memiliki variasi yang lebih banyak dibandingkan dengan material metal. Contoh dari material non metal diantaranya kayu lapis, semen, *reinforced plastic* dan komposit fiber (Zenkert, 1997).

2.4.2. Core material

Core material adalah bagian terpenting dari *sandwich material* meskipun tidak terlalu jelas. Bagian ini juga secara umum menjadi bagian yang paling sedikit diketahui oleh para insinyur. *Core material* yang digunakan dalam *sandwich* dikategorikan berdasarkan konfigurasi. Secara umum *core* harus memiliki densitas yang rendah sehingga menyumbang penambahan berat yang tidak terlalu substansial pada *sandwich material* secara keseluruhan. *Core material* utamanya terkena tegangan geser dan regangan geser pada *core* menimbulkan deformasi global dan tegangan geser *core*. Dengan demikian *core material* harus dipilih sedemikian rupa sehingga *core* tidak gagal apabila dikenai beban transversal dan memiliki modulus geser yang cukup tinggi untuk menghasilkan kekakuan geser yang dibutuhkan.

Secara umum pemilihan *core material* didasarkan pada beberapa kriteria, diantaranya:

1. Densitas
2. Modulus geser
3. Kuat geser
4. Kekakuan yang tegak lurus *face material*
5. Tingkat insulasi termal
6. Tingkat insulasi akustik

Core material, sebagaimana *face* juga dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok yaitu kelompok metal dan non metal. Untuk kelompok metal biasanya digunakan konfigurasi-konfigurasi untuk menghasilkan kekuatan tanpa meningkatkan ketebalan. Contoh konfigurasi dapat berupa honeycomb, corrugated, dll. Sedangkan untuk material non metal biasanya terbuat dari elastomer atau polimer-polimer yang memiliki densitas rendah. Untuk *core material* berbahan polimer biasanya terbuat dari campuran beberapa bahan, diantaranya *unsaturated polyester resin* (polimer), *filler*, katalis, pigmen.

a. *Unsaturated polyester resin* (UPR)

Unsaturated polyester resin (UPR) adalah salah satu jenis polimer yang sering digunakan dalam pembuatan *sandwich material*. UPR adalah kelas terbesar ketiga dari resin termoset. *Unsaturated polyester resin* terbuat dari reaksi polimerisasi antara asam dikarboksilat dengan glikol. Polimer tersebut lalu dilarutkan dalam monomer reaktif untuk menciptakan cairan berviskositas rendah. Ketika mengering, monomer bereaksi dengan ikatan tak jenuh pada polimer dan berubah menjadi struktur termosfer padat.



Gambar 2.7 Tampilan *unsaturated polyester resin*

unsaturated polyester resin memiliki beberapa kelebihan , diantaranya:

1. Ketahanan yang mencukupi terhadap air dan bermacam-macam bahan kimia
2. Ketahanan yang mencukupi terhadap cuaca dan usia
3. Rendah biaya

4. Dapat menahan temperatur hingga 80°C
5. Memiliki pembasahan yang baik pada *fiberglass*.
6. Memiliki tingkat penyusutan yang rendah yaitu 4-8%
7. Rentang ekspansi termal berkisar $100-200 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

b. *Filler*

Filler merupakan bahan yang digunakan sebagai campuran untuk *unsaturated polyester resin*. Material *filler* digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis dari resin. Selain itu penggunaan *filler* dimaksudkan untuk meningkatkan sifat fisik dari resin dan berperan sebagai *stress absorber*. Pada penelitian ini *filler* yang digunakan sebagai campuran UPR adalah cangkang kerang dan cangkang telur.



Gambar 2.8 Cangkang kerang (kiri) dan cangkang telur (kanan) yang digunakan sebagai *filler*

c. Katalis

Katalis atau metil etil Keaton peroksida (MEKP) merupakan bahan campuran pada polyester resin dan polimer lainnya. Katalis berfungsi sebagai *hardener* atau pengeras resin. Katalis berupa cairan bening dengan bau yang menyengat yang berfungsi mengeringkan dan mengeraskan resin ketika dicampurkan pada resin (Gambar 2.9). berdasarkan wujudnya, katalis dapat dibedakan menjadi katalis homogen dan katalis heterogen (Brady, 1990).



Gambar 2.9 Tampilan Katalis

d. Pigmen

Pigmen atau pewarna adalah agen yang memberikan warna pada resin. Pigmen untuk resin berupa pasta yang berwarna. Pemberian pigmen pada campuran *core material* umumnya berfungsi untuk estetika. Pigmen resin tersedia dalam berbagai pilihan warna dengan rentang warna dari warna gelap hingga warna terang. Penggunaan pigmen pada campuran bahan untuk material bersifat opsional karena perannya yang tidak terlalu signifikan. Akan tetapi dalam penelitian ini digunakan pigmen yang berwarna terang untuk mempermudah pengamatan ketika pengujian dan mempermudah evaluasi pasca pengujian pada material yang telah selesai diuji.

2.4.3. Epoxy resin

Epoxy adalah resin polimer termoset dimana molekul resin mengandung satu atau lebih gugus *epoxyda*. Material ini dapat digunakan untuk menyesuaikan berat molekul atau viskositas seperti yang disyaratkan oleh penggunaan akhir. Ada dua jenis *epoxy resin*, yaitu *glycidil epoxy* dan *non-glycidil epoxy*. *Epoxy resin* membutuhkan penambahan zat pengawet saat proses uring, yang biasa disebut *hardener* atau katalis. Jenis *hardener* yang paling umum adalah *hardener* berbasis amina. Berbeda dengan *polyester resin* dan *vinil ester* yang menggunakan *hardener* dalam jumlah kecil (1-3%), *epoxy resin* biasanya membutuhkan penambahan *hardener* dengan persentase yang besar. Rasio penggunaan *hardener* pada *epoxy resin* bisa mencapai 1:3 atau bahkan 1:2 dari jumlah *epoxy* yang digunakan. *Epoxy resin* dapat diubah agar sesuai dengan kebutuhan dengan menambahkan polimer termoplastik.



Gambar 2.10 Tampilan epoxy resin dan hardener

Bila dibandingkan dengan termoset tradisional atau resin termoplastik lainnya, *epoxy resin* memiliki beberapa kelebihan, diantaranya:

1. Penyusutan yang rendah selama curing
2. Ketahanan terhadap kelembagaan yang baik
3. Resistensi terhadap reaksi kimia yang baik
4. Sifat listrik yang baik
5. Meningkatkan kekuatan mekanik
6. Tahan benturan
7. Umur simpan yang panjang

Pada penelitian ini resin *epoxy* digunakan sebagai *adhesive* yang bertugas meningkatkan kekuatan *bonding* antara *core material* dan *face*. Selain sebagai *adhesive*, *Epoxy resin* sendiri dapat digunakan untuk menggantikan *polyester resin* (UPR). Namun disebabkan oleh harga *epoxy resin* yang tinggi, sehingga hanya digunakan sebagai *adhesive* semata.

2.5. Waste Material

Waste material secara umum dapat diartikan sebagai material sisa dari suatu bahan yang telah habis dipakai atau dikonsumsi. Penggunaan *waste material* pada penelitian ini dilandasi beberapa faktor dan pertimbangan. Yang paling utama karakteristik dan kesesuaian *waste*

material sebagai *filler* untuk *core material*. Selain itu tingkat ketersediaan material dan kemudahan dalam ekstraksi dan pengolahan menjadi salah satu faktor yang melandasi pemilihan *waste material* yang berupa cangkang kerang dan cangkang telur.

2.5.1. Cangkang Kerang

Kerang darah (*anandara granosa*) merupakan jenis hewan bertulang lunak (*mollusca*) yang termasuk pada golongan bercangkang dua (*bivalvia*) (Gambar 2.11). Kerang darah banyak ditemukan pada substrat yang berlumpur di muara sungai dengan topografi pantai yang landai sampai kedalaman 20 m dari permukaan (FAO, 2014). Kerang darah bersifat infauna yaitu hidup dengan cara membenamkan diri di bawah permukaan lumpur di perairan dangkal hingga kedalaman 30 m.

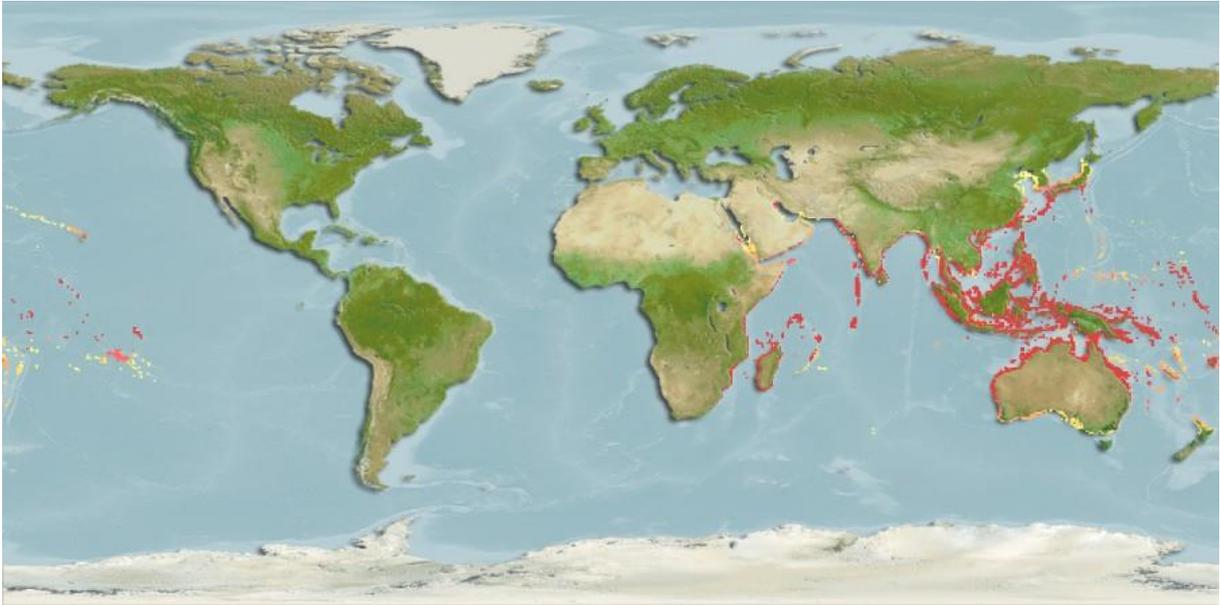


Gambar 2.11 Morfologi kerang darah (satujutaidea.blogspot.com)

Tabel 2.2 menunjukkan klasifikasi taksonomi dari kerang darah

Kerajaan:	<i>Animalia</i>
Filum:	<i>Mollusca</i>
Kelas:	<i>Pelecypode</i>
Subkelas:	<i>Lamellibranchia</i>
Ordo:	<i>Taxodonta</i>
Familia:	<i>Taxodonta</i>
Genus:	<i>Anadara</i>
Spesies:	<i>Anadara granosa</i>

Persebaran kerang darah di dunia sangat luas. Habitat kerang darah adalah di perairan hangat dekat ekuator hingga kawasan subtropis. Habitat kerang darah membentang mulai dari Jepang di utara hingga pesisir utara Australia, dan dari Polinesia di timur hingga pantai timur Afrika di sebelah barat. Persebaran kerang darah di dunia dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Peta persebaran kerang darah (www.aquamaps.org)

Sebagaimana *bivalvia* lainnya, kerang darah ditutupi oleh dua keping cangkang yang dapat membuka dan menutup karena terdapat sebuah persendian elastis yang menghubungkan kedua bagian cangkang tersebut. Kerang darah merupakan *filter feeder* dimana cara makan yang dilakukan oleh kerang darah mirip dengan proses filtrasi yaitu menyaring makanan yang ada pada air atau sedimen.

Cangkang kerang darah tersusun atas 3 lapisan, yaitu *periostakum*, *prismatik*, dan *nakreas*. Lapisan peram dan terletak paling luar adalah *periostakum*. *Periostakum* merupakan lapisan tipis dan gelap yang tersusun atas zat tanduk yang dihasilkan oleh tepi mantel sehingga sering disebut lapisan tanduk, fungsinya untuk melindungi lapisan yang ada pada bagian yang lebih dalam dan melindungi cangkang dari asam karbonat dalam air serta memberi warna cangkang. Lapisan selanjutnya adalah lapisan *prismatik*. Lapisan *prismatik* adalah lapisan tengah yang tebal yang tersusun atas kristal-kristal halus kalsium karbonat yang berbentuk prisma yang berasal dari materi organik yang dihasilkan di tepi mantel. Lapisan terdalam adalah *nakreas*. *Nakreas* merupakan lapisan terdalam cangkang kerang yang tersusun atas kristal-kristal halus kalsium karbonat. Senyawa-senyawa yang menyusun cangkang kerang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kandungan cangkang kerang darah

Senyawa	Kadar [%]
CaO	94.1
SiO ₂	1.00
Na ₂ O	1.00
TiO ₂	1.00
Fe ₂ O ₃	0.4
SO ₃	0.4
SrO	0.3
MgO	0.3
Al ₂ O ₃	0.2

2.5.2. Cangkang Telur

Cangkang telur merupakan lapisan yang membungkus embrio agar tidak mengalami kerusakan maupun terlindung dari gangguan faktor eksternal. Cangkang telur ayam yang membungkus telur umumnya memiliki berat antara 9 hingga 12% dari berat telur keseluruhan. Kulit telur memiliki warna yang bervariasi mulai dari putih kekuningan hingga coklat. Perbedaan warna pada cangkang telur ayam mengindikasikan perbedaan ketebalan dari cangkang telur tersebut. Semakin terang warna cangkang telur, maka semakin tipis pula cangkang tersebut (Wirakusumah, 2011).



Gambar 2.13 Telur Ayam (www.wellandgood.com)

Cangkang telur ayam tersusun atas 3 lapisan yaitu lapisan kutikula, lapisan busa (*sponge*) dan lapisan lamellar. Lapisan kutikula merupakan lapisan protein transparan yang membungkus permukaan cangkang telur. Lapisan ini membungkus pori-pori pada cangkang

telur, akan tetapi masih dapat dilalui oleh gas sehingga memungkinkan keluarnya uap, air dan gas. Lapisan busa (*sponge*) dan lamellar pada cangkang telur membentuk matriks yang tersusun oleh serat-serat protein yang terikat dengan kristal kalsium karbonat (CaCO_3) atau disebut juga kalsit dengan perbandingan 1:50. Lapisan ini terdiri dari protein dan lapisan kapur yang terdiri dari kalsium karbonat, kalsium fosfat, magnesium karbonat, dan magnesium fosfat (Rivera, 1999). Lapisan lamellar (*mamillary*) merupakan lapisan ketiga yang terdiri dari lapisan yang berbentuk kerucut dengan penampang bulat atau lonjong. Lapisan ini sangat tipis dan tersusun dari anyaman protein dan mineral. Di bawah lapisan lamellar terdapat lapisan membran yang merupakan lapisan cangkang telur yang terdalam. Lapisan membran terdiri dari dua lapisan selaput yang menyelubungi seluruh isi telur dan tebalnya kurang lebih 65 mikron. Lapisan membran terdiri dari lapisan membran dalam dan membran luar. Kedua membran tersebut layaknya dinding yang menghalangi bakteri untuk masuk ke dalam telur. Lapisan membran terdiri dari serabut-serabut protein yang membentuk membran yang semipermeabel (Wirakusumah, 2011). Senyawa yang terkandung dalam cangkang telur dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kandungan cangkang telur

Senyawa	Kadar [%]
CaCO_3	94.00
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1.00
Mg_2CO_3	1.00
Bahan organik	4.0

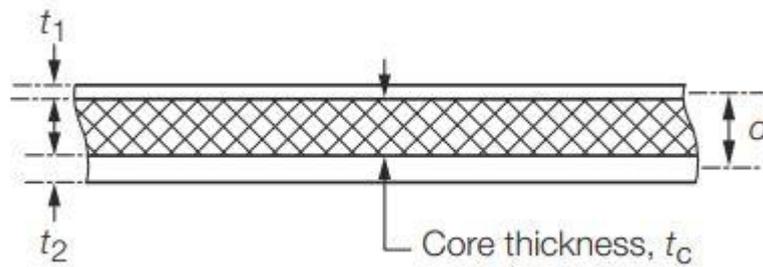
Pemanfaatan cangkang telur di Indonesia masih sangat terbatas dan bahkan dapat dikatakan bahwa cangkang telur hanya menjadi limbah buangan. Hal ini berbanding terbalik dengan ketersediaan kulit telur yang melimpah. Setiap tahun, Indonesia menghasilkan jutaan ton telur. Dengan persentase berang cangkang mencapai 9-12% dari berat telur keseluruhan, maka potensi cangkang telur di Indonesia dapat mencapai ratusan ribu ton.

Tabel 2.5 Produksi telur ayam berdasarkan provinsi di Indonesia 2009-2019 (BPS,2020)

Provinsi	Produksi Telur Ayam Petelur menurut Provinsi (Ton)										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ACEH	1868.21	1961.62	2419	3640	2198	1892	3080.17	3713.7	3503.23	57072.44	12312.09
SUMATERA UTARA	69323.5	74301.8	79204	1E+05	1E+05	1E+05	136258	141483.6	441558.1	401949.7	512431.7
SUMATERA BARAT	55537.6	55537.6	60148	62687	65688	63706	65046.4	64246.41	181807.8	201097.4	284134.5
RIAU	5049	1748.11	1384	2022	2217	1019	986.53	2396.11	81046.11	35010.86	12224.04
JAMBI	3393.11	3847.75	4771	4641	7332	4950	4878.04	5414.35	17188.03	17500.19	22702.11
SUMATERA SELATAN	46682.8	47616.5	48726	49540	59106	55354	56242	56701.04	198664.8	179467	136806.6
BENGKULU	434.69	451.82	582	576	529	561	986.93	1272.84	885.21	1361.19	10841.66
LAMPUNG	34230.7	40470.3	44878	61335	51388	50786	37839.3	39286.21	70111.77	113298.4	130824.3
KEP. BANGKA BELITUNG	1463.17	579.79	593	544	1238	669	582.78	890.57	932.1	5805.76	10579.74
KEP. RIAU	6433	6935.16	7129	3425	3154	2927	3620.18	5041.82	23164.92	3868.09	13987.15
DKI JAKARTA	-	-	-	-	-	-	0	0	38823.6	28904.49	39663.77
JAWA BARAT	95627.7	103428	1E+05	1E+05	1E+05	1E+05	133436	139192.8	693379.2	802859.6	441107.4
JAWA TENGAH	169146	174884	2E+05	2E+05	2E+05	2E+05	202110	214725	530757.3	586399.8	499631.6
DI YOGYAKARTA	26250	23361.2	26111	25802	24660	26493	28083.5	28389.11	43801.29	111612.8	62845.28
JAWA TIMUR	204147	209516	2E+05	3E+05	3E+05	3E+05	390055	445792.7	1539249	1320413	1632492
BANTEN	43619.6	41580.6	57626	47455	46751	40279	45918.2	58447.26	272153.5	218054	192476.8
BALI	28893.7	29471.6	36606	47969	36590	36602	40986.8	49004.27	160228	155161	186310.5
NUSA TENGGARA BARAT	648.13	9008.08	1268	1338	1551	2293	3598.26	5025.51	12703.66	20441.1	33946.61
NUSA TENGGARA TIMUR	607	705.13	1385	1164	1317	1333	1341.05	1346.05	3.42	18968.35	9186.99
KALIMANTAN BARAT	15987.5	16256.6	15613	23906	19875	43800	31850.6	27620.66	73583.99	80389.47	115402.4
KALIMANTAN TENGAH	522	538	120	209	285	1191	1402.79	1735.95	1312.43	1551.06	7390.75
KALIMANTAN SELATAN	30645.5	28990.3	20286	20955	33947	47651	60261.8	64574.21	55739.51	108110.8	86776.76
KALIMANTAN TIMUR	8032.42	12164.3	8032	12240	9462	5291	7451.19	6493.18	10171.32	8592.32	33346.33
KALIMANTAN UTARA	-	-	-	-	-	348	377.48	205.4	0	7335.13	607.06
SULAWESI UTARA	7218.57	7315.74	7838	8552	9774	9949	10453.3	10968.53	21422.7	14267.04	26587.85
SULAWESI TENGAH	4897.23	4445.1	5297	4621	6690	7837	7388.68	9538.05	5429.32	12068.82	13834.74
SULAWESI SELATAN	45147.8	45903	50003	60144	64017	80815	89330.6	90513.88	147554.8	140662.2	197132.5
SULAWESI TENGGARA	1248	1413.78	1369	1126	1113	1191	1524.07	2217.45	0	4578.29	2831.71
GORONTALO	1039.28	1551.19	1565	2149	2437	2773	2828.39	2784.77	5748.73	6180.16	3819.15
SULAWESI BARAT	44.36	137.72	607	638	774	770	1106.58	1187.82	1261.16	0	0
MALUKU	267.25	284.86	348	371	83	155	72.04	145.1	20.51	5.35	619.2
MALUKU UTARA	133.83	140	10838	130	325	227	108.62	157.33	0	0	88.41
PAPUA BARAT	304.91	338.19	494	705	784	2109	913.9	956	454.57	24974.68	8225.66
PAPUA	675.74	752.22	1013	1153	931	865	2709.72	4220.29	174.31	160.45	12214.19
INDONESIA	909519	945635	1E+06	1E+06	1E+06	1E+06	1372829	1485688	4632834	4688121	4753382

2.6. Penentuan Ketebalan Sandwich material

Dalam menghitung ketebalan *sandwich material*, standar yang digunakan adalah *Provisonal Rules for The Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure* (LR, 2015). Pada *rules* tersebut *sandwich material* didefinisikan sebagai material yang memiliki 3 bagian, yaitu pelat atas (*top plate*), inti (*core*), dan pelat bawah (*bottom plate*). Masing-masing bagian tersebut dianggap memiliki ketebalan masing-masing, yaitu t_1 untuk tebal pelat atas, t_2 untuk ketebalan lapisan pelat bawah, dan t_c untuk ketebalan *core material* (Gambar 2.14). tebal masing-masing bagian bergantung pada ukuran kapal yang akan dibangun dan tebal pelat asal atau pelat konvensional yang digunakan.



Gambar 2.14 Definisi skematis *sandwich material* (LR, 2015)

Standar tersebut juga mengatur ketebalan minimum dari pelat atas dan pelat bawah untuk membatasi ukuran dari *face* yang diperbolehkan. Tebal minimal dari pelat atas dan bawah yang diperbolehkan dijelaskan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Ketebalan minimal pelat (LR,2015)

Item	Minimum thickness in mm	
	New construction	Overlay construction
t_{1MIN}	3,0	3,0
t_{2MIN}	3,0	50% of the as-built thickness

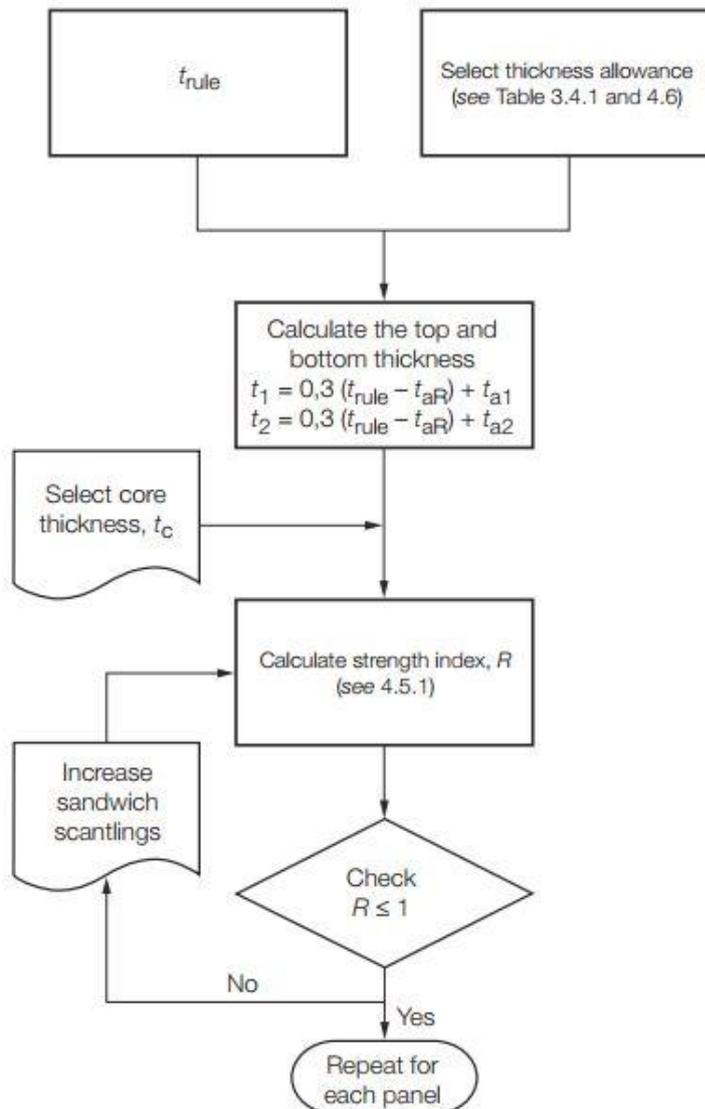
Tabel 2.7 *Thickness allowance* yang diperbolehkan pada tiap bagian kapal (LR, 2015)

Structural elements	t_{aR}	t_{a1}	t_{a2}
Bottom shell	1,0	0,0	1,0
Side shell	1,0	0,0	1,0
Inner bottom, hopper plating	2,0	1,0	1,0
Inner bottom at crown of tank	3,5	1,0	2,5
Strength deck	2,5	2,5	0,0
Internal decks	0,0	0,0	0,0
Superstructure decks	0,0	0,0	0,0
Watertight bulkheads	0,0	0,0	0,0
Deep tank bulkheads	2,5	0,0	2,5
Deep tank crowns which is also a deck	3,5	1,0	2,5
Vehicle deck clear of tanks	2,0	2,0	0,0

Pada Tabel 2.6 dapat dilihat bahwa ketebalan minimal pelat atas dan bawah untuk bangunan baru adalah 3 mm, sedangkan untuk konstruksi tambahan adalah 3 mm untuk pelat atas dan 50% dari ketebalan awal untuk pelat bawah. Konstruksi tambahan yang dimaksud dalam hal ini adalah penggunaan *sandwich* sebagai penambal pelat yang sudah tidak memenuhi persyaratan kelayakan. Penambahan *sandwich* biasanya dilakukan karena pada lokasi tersebut

tidak memungkinkan dilakukan penggantian pelat. Tabel 2.7 menunjukkan kelonggaran tebal pelat yang diperbolehkan oleh LR untuk tiap-tiap bagian struktural. Kelonggaran tersebut berbeda-beda bergantung pada posisi dari struktur masing-masing.

Selain mengatur ketebalan pelat minimal, LR juga memberikan panduan umum langkah-langkah penentuan tebal *sandwich material*. Langkah perhitungan *sandwich material* secara garis besar terlihat seperti Gambar 2.15.



Gambar 2.15 langkah perhitungan ketebalan *sandwich* (LR,2015)

Secara garis besar, *sandwich* yang disyaratkan oleh LR adalah *sandwich* dengan *strength indeks* $R \leq 1$. R untuk *sandwich material* pada bangunan baru dihitung menggunakan persamaan (2.1).

$$A = 0,01A_R 0,1 \left[\frac{b^2}{d(t_1+t_2)} + 11,7 \left(\frac{bt_c}{d^2} \right)^{1,3} \right] kP_{eq,R} ; R \leq 1 \quad (2.1)$$

Keterangan:

$$A_R = \left(\frac{a}{b}\right)^{0,65}$$

$$P_{eq,R} = 0,0017 \frac{Z_{rule}}{l^2}, \text{ (MPa)}$$

sedangkan pada penggunaan *sandwich* untuk lapisan tambahan atau *overlay construction*, indeks R dihitung menggunakan persamaan (2.2).

$$A = 0,0125 \left[0,1 \frac{s^2}{d(t_1+t_2)} + 11,7 \left(\frac{st_c}{d^2}\right)^{1,3} \right] P_{eq} ; R \leq 1 \quad (2.2)$$

Keterangan:

$$P_{eq} = 200 \left(\frac{t_{rule}}{s}\right)^2, \text{ (MPa)}$$

dengan t_{rule} ditentukan berdasarkan perhitungan ketebalan pelat yang disesuaikan dengan jenis kapal dimana *sandwich material* hendak diaplikasikan. Perhitungan ketebalan ini mengacu pada penggunaan standarisasi yang telah diatur dalam rute yang digunakan. Di dalam perhitungan ini, nilai *strength index* R harus bernilai kurang dari atau sama dengan satu. Dan jika nilai R masih bernilai 1, maka harus dilakukan perhitungan ulang.

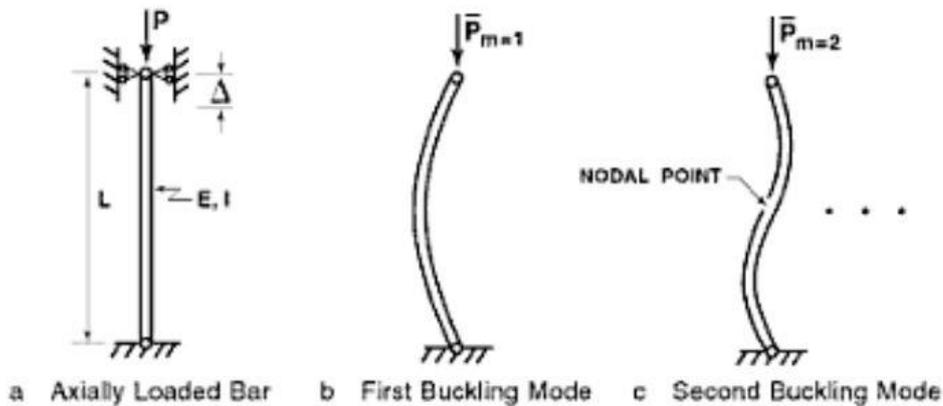
2.7. *Buckling*

Buckling adalah kondisi instabilitas matematis yang terjadi pada sembah benda atau struktur yang terjadi akibat gaya aksial yang bekerja pada benda tersebut. *Buckling* dapat terjadi ketika sebuah struktur dengan bentang yang panjang menerima tekanan secara aksial yang melebihi batas kekuatan struktur dan menyebabkan struktur tidak seimbang. *Buckling* terjadi secara tiba-tiba tanpa ada gejala ketika beban yang menekan struktur melebihi batas pembebanan struktur yang mampu ditahan struktur.

Buckling merupakan jenis kegagalan yang sangat berbahaya yang harus dihindari sebisa mungkin. Ketika sebuah struktur mulai mengalami *buckling*, maka struktur tersebut akan mengalami deformasi plastis yang terus berlanjut hingga mencapai kerusakan total. Fenomena *buckling* adalah salah satu jenis perilaku instabilitas material dan merupakan permasalahan stabilitas material.

Buckling terutama sering terjadi pada kolom dengan lengan yang panjang. Kondisi *buckling* dapat diilustrasikan sebagai berikut. Sebuah kolom yang lurus, diberikan beban aksial

dan memiliki tumpuan di kedua ujungnya akan mengalami satu dari 2 mode *buckling* sebagaimana terlihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 2 mode *buckling* awal (Jones, 2006)

Kekuatan *buckling* dari suatu material dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya:

1. Modulus elastisitas E. Modulus elastisitas mengindikasikan kekakuan material. Sebuah material yang kaku cenderung lebih tahan terhadap beban *buckling*. Karena kekuatan material tidak berpengaruh pada *buckling*, maka material yang memiliki modulus elastisitas yang tinggi cenderung lebih tahan terhadap *buckling*
2. Momen inersia geometris. Momen inersia geometris mengindikasikan ketahanan material dalam melawan defleksi yang dipengaruhi oleh penampang melintang dari kolom. Karena umumnya kolom menekuk ke arah yang paling kecil tahanannya, maka momen geometris minimum menjadi faktor penentu ketahanan kolom.
3. Panjang kolom. Panjang kolom dan jenis tumpuan menentukan panjang *buckling* dari kolom. Pengaruh panjang terhadap kekuatan *buckling* berbalik secara kuadrat. Yang artinya jika panjang kolom menjadi 2 kali lipat maka kekuatan *buckling*nya menurun menjadi seperempat dari nilai awalnya.

2.8. Standarisasi Pengujian *Buckling*

Pada penelitian ini, standar yang digunakan untuk pengujian *buckling* adalah ASTM C364-99. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat *sandwich material* ketika mendapatkan pembebanan aksial. Selain itu dari pengujian tekan ini juga dapat diketahui kekuatan *buckling* dari *sandwich*.

Pada pengujian ini, spesimen yang akan diuji diumpamakan sebagai kolom persegi panjang dengan lebar minimal 50 mm atau tidak kurang dari 2 kali ketebalan *sandwich*. Panjang spesimen uji tidak boleh lebih dari 8 kali ketebalan *sandwich material* secara total. Sebagai tambahan, suhu dalam ruang pengujian diusahakan berkisar pada $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ dengan kelembagaan $50 \pm 5\%$ untuk kondisi kontrol standar. Secara umum set up peralatan pengujian *buckling sandwich material* sesuai standar ASTM C364-99 dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Set up perlengkapan pengujian *buckling* (ASTM, 1999)

Data yang diperoleh dari pengujian adalah berupa waktu, beban dan *displacement*. Data beban dan *displacement* yang diperoleh dari pengujian tersebut merupakan data dengan fungsi satuan waktu. Satuan waktu yang digunakan tergantung berdasarkan peralatan yang digunakan dan akurasi yang diinginkan. Dari data tersebut kemudian tegangan σ titik yang diinginkan seperti pada titik beban *yield* maupun beban kritis dihitung menggunakan persamaan (2.3)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

2.9. *Acceptance criteria*

Hasil akhir dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah *sandwich material* yang telah dibuat berhasil memenuhi kriteria yang disyaratkan agar dapat diaplikasikan pada struktur kapal. oleh karena itu hasil dari pengujian harus dibandingkan dengan syarat yang telah

ditentukan oleh biro klasifikasi. Standar persyaratan *buckling* dari material salah satunya diatur oleh Lloyd's register melalui *Provisional Rules for The Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure*. Berdasarkan *rule* tersebut, *sandwich material* dianggap telah memenuhi persyaratan *buckling* apabila memenuhi persamaan (2.4) sebagai berikut:

$$\text{Uni - axial compressive load} : \frac{\sigma_c}{\sigma_d} \geq 1,1 \quad (2.4)$$

pada perhitungan tersebut σ_c adalah besarnya tegangan *buckling* dari material yang dihitung berdasarkan tegangan yield *buckling* material. Sedangkan σ_d adalah tegangan kompresif desain yang disyaratkan oleh LR. *Sandwich material* yang memenuhi syarat berdasarkan rute tersebut adalah *sandwich material* yang nilai σ_c 1,1 kali lebih besar dari σ_d atau nilai σ_c 10% lebih tinggi dari nilai σ_d .

2.10. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang terjadi pada bidang rekayasa (*engineering*) dan fisika matematis. Jenis permasalahan dalam bidang rekayasa (*engineering*) dan fisika matematis yang dapat diselesaikan melalui metode pendekatan elemen hingga diantaranya analisis struktur, perambatan panas, aliran fluida, perpindahan massa, dan potensial elektromagnetik (Logan, 2007).

Prinsip dari metode elemen hingga adalah membagi benda menjadi elemen-elemen kecil dengan jumlah tertentu yang dimaksudkan agar reaksi akibat beban (*load*) pada kondisi batas yang diberikan dapat diketahui. Metode elemen hingga merupakan representasi badan atau sistem struktur yang dirakit dari elemen-elemen badan/sistem. Elemen dalam metode ini membentuk suatu sistem yang terintegrasi melalui elemen titik. Pada prosesnya titik-titik tersebut akan disusun menjadi persamaan matriks yang dapat diselesaikan secara numerik. Dari persamaan numerik tersebut akan didapatkan hasil yang menjadi jawaban dari kondisi pembebanan yang bekerja pada benda dan reaksi dari benda pada beban tersebut. Metode elemen hingga dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tak terhingga menjadi suatu masalah dengan derajat kebebasan berhingga yang proses pemecahannya lebih sederhana.

Metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisa permasalahan baik struktural maupun non struktural. Pada bidang struktural, metode ini dapat digunakan untuk melakukan analisa tegangan, *buckling*, dan analisa getaran. Sedangkan pada bidang non

struktural mencakup perpindahan panas, aliran fluida, dan distribusi potensial elektrik dan magnetik.

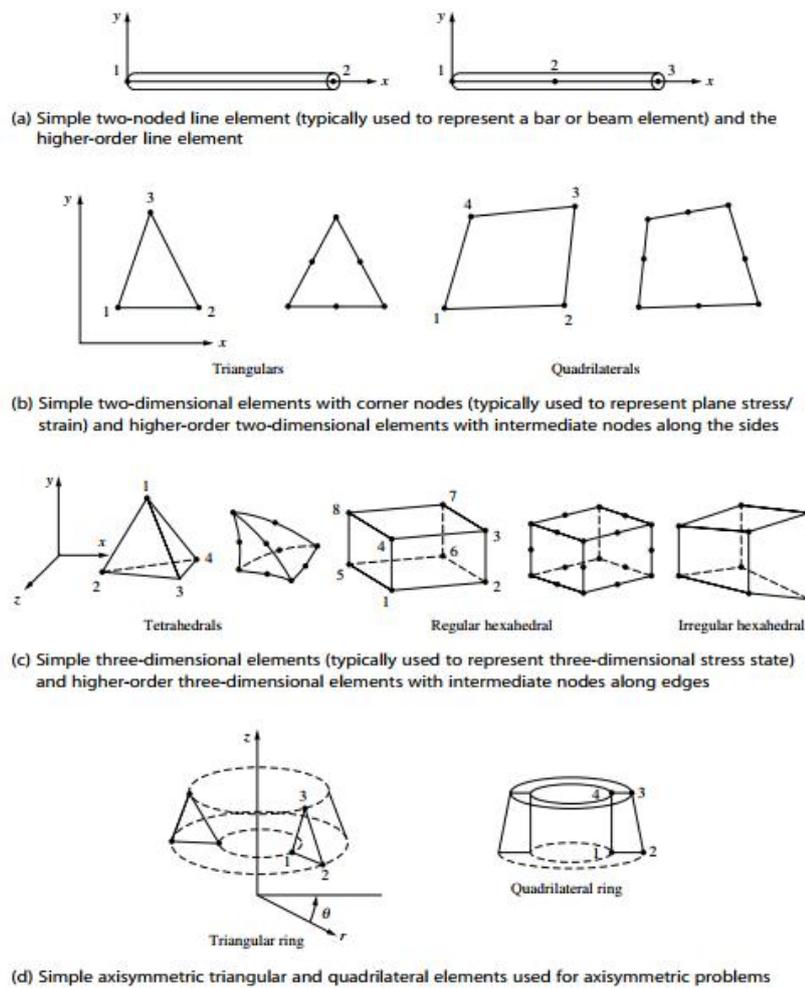
Keuntungan penggunaan metode elemen hingga dalam proses analisis diantaranya:

1. Dapat memodelkan benda yang berbentuk ireguler dengan mudah.
2. Menangani kondisi pembebanan umum tanpa kesulitan.
3. Model yang dianalisa dapat tersusun dari beberapa jenis material yang berbeda, karena persamaan elemen dievaluasi secara individu.
4. Dapat menangani berbagai jenis dan jumlah kondisi batas.
5. Ukuran elemen dapat bervariasi sehingga memungkinkan penggunaan elemen yang kecil jika dibutuhkan.
6. Perubahan model elemen hingga dapat dilakukan dengan mudah dan murah.
7. Kemampuan untuk mencakup efek dinamis yang terjadi pada model.
8. Dapat menangani perilaku nonlinier yang terjadi dengan deformasi yang besar serta material yang nonlinier.

Menurut Logan (2015),Langkah-langkah dalam melakukan pemodelan metode elemen hingga dapat diringkas sebagai berikut:

1. *Discretize the continuum* (diskretisasi rangkaian yang utuh)

Diskretisasi adalah proses pembagian sebuah struktur menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki geometri yang lebih sederhana. Elemen-elemen ini terhubung melalui titik simpul (*node*) yang membentuk rangkaian yang pada akhirnya membentuk struktur yang mendekati struktur yang sebenarnya. Pemilihan jumlah elemen, variasi ukuran dan tipe elemen yang digunakan dalam pemodelan didasarkan pada bentuk benda dan merupakan pilihan dari orang yang melakukan pemodelan. Jenis elemen yang dapat digunakan untuk mendiskretkan struktur sebenarnya dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Jenis elemen pada metode elemen hingga (Logan, 2007)

2. *Select interpolation function* (pemilihan fungsi interpolasi)

Pada tahap ini dilakukan pemilihan fungsi perpindahan pada tiap elemen. Fungsi pada elemen didefinisikan menggunakan nilai titik simpul dari elemen. Fungsi yang biasa digunakan diantaranya ungsi linier, kuadrat, kubik polinomial dan fungsi trigonometri. Untuk elemen 2 dimensi, fungsi *displacement* adalah fungsi dari koordinat sumbu dari bidangnya.

3. *Define the strain/displacement and stress/strain relationship* (menentukan hubungan regangan/pergeseran dan tegangan/regangan)

Hubungan ini bertujuan untuk mendapatkan persamaan untuk setiap elemen model. Selain itu tegangan harus berhubungan dengan regangan melalui persamaan tegangan regangan yang biasa disebut *constitutive law*.

4. *Derive the elemen stiffness matriks and equation* (menurunkan matriks kekakuan elemen dan persamaan)
5. *Assemble the element equations to obtain the global equations and introduce boundary condition* (merangkai persamaan elemen untuk mendapatkan persamaan global dan menambahkan kondisi batas)

Pada tahap ini persamaan keseimbangan titik simpul elemen individual yang telah didapatkan pada langkah sebelumnya dirangkai menjadi persamaan keseimbangan titik simpul global. Selain itu pada tahap ini juga ditambahkan kondisi batas yang bekerja pada model.

6. *Solve for the unknown degrees of freedom* (penyelesaian untuk derajat kebebasan yang tidak diketahui)

Persamaan global yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya dimodifikasi untuk mengakomodasi kondisi pembebanan .

7. *Solve for the elemen Strain and stresses* (penyelesaian untuk tegangan dan regangan elemen)

Untuk analisis permasalahan tegangan struktural, sejumlah tegangan dan regangan (atau momen dan gaya geser) dapat diperoleh karena nilai tersebut disampaikan sebagai *displacement* pada tahap 6.

8. *Interpret the Renault* (interpretasi hasil)

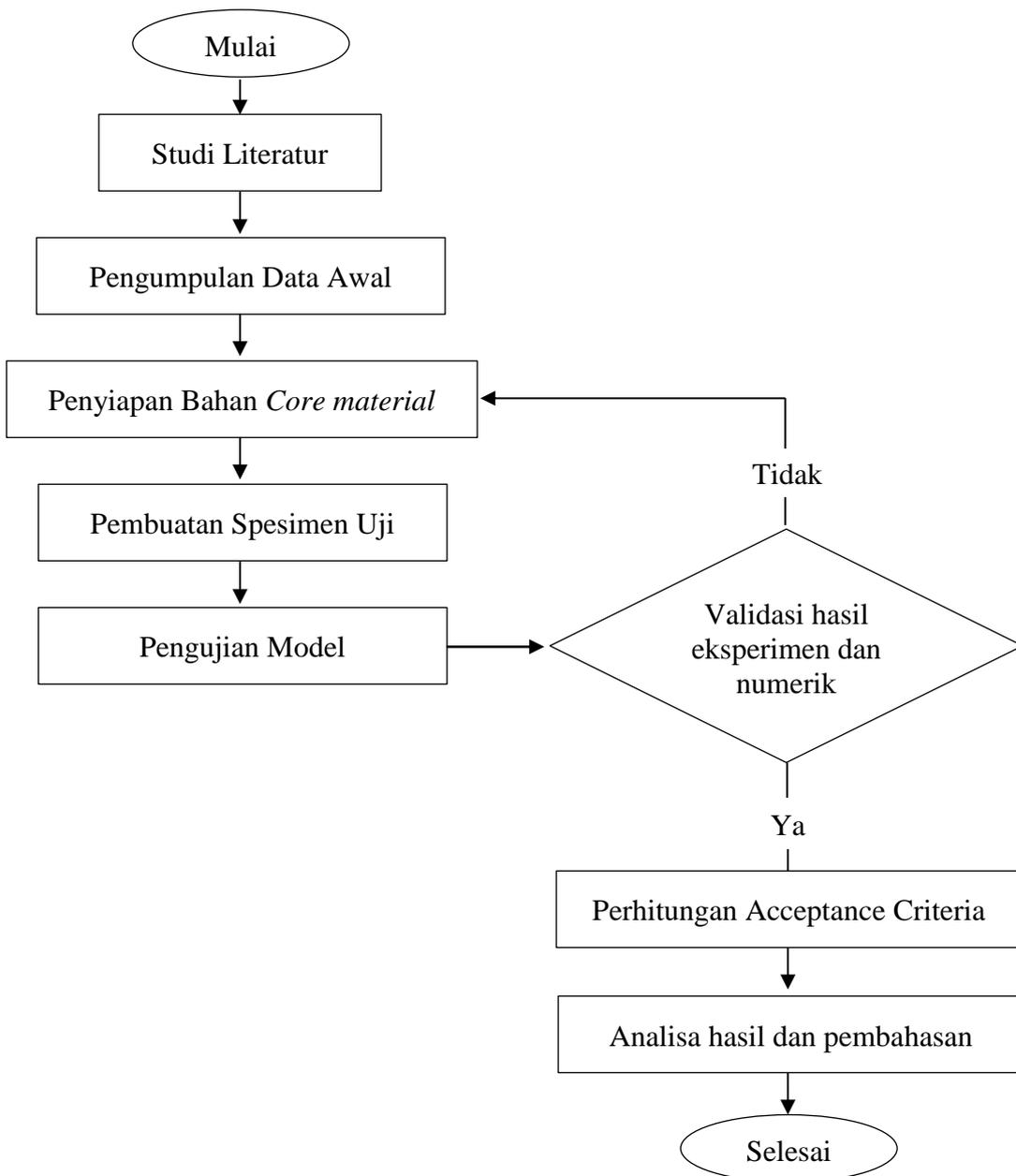
Langkah terakhir adalah menginterpretasikan dan menganalisa hasil untuk digunakan dalam proses analisa desain

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI

3.1. Bagan Alir

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini secara umum dapat dijabarkan sebagaimana gambar 3.1.



Gambar 3.1 diagram alir rencana penelitian

3.2. Studi Literatur

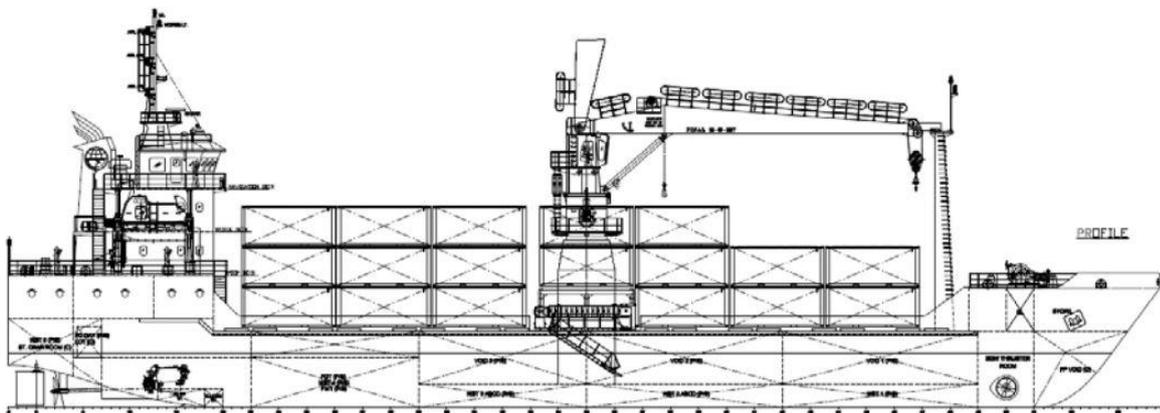
Pada tahap ini dilakukan studi terhadap materi yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan. Selain itu, studi juga dilakukan terhadap penelitian terdahulu yang berkaitan baik secara langsung maupun tidak langsung dengan penelitian yang akan dilakukan.

3.3. Pengumpulan Data Awal

Pada tahap ini, dikumpulkan data-data yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan.

3.3.1. Data kapal yang akan disimulasikan

Desain kapal yang digunakan untuk menyimulasikan aplikasi *sandwich material* pada kapal dalam penelitian ini adalah kapal container 100 TEUs. Desain kapal ini merupakan desain dari kapal TOL LAUT yang merupakan program pemerintah Republik Indonesia. Rencana umum dari desain kapal yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Rencana umum kapal container 100 TEUs

Tabel 3.1 menunjukkan ukuran dan karakteristik utama dari kapal container 100 TEUs yang akan disimulasikan untuk aplikasi *sandwich material*.

Tabel 3.1 Data ukuran utama kapal

Tipe	Container carrier
<i>Length Over All (LoA)</i>	77,05 m
<i>Length Between Perpendicular (LPP)</i>	72,2 m
<i>Breadth (B)</i>	18,2 m
<i>Draft (T)</i>	3,7 m
<i>Speed (V)</i>	12 knots
<i>Class</i>	BKI

3.4. Penyiapan Material

Pada tahap ini dilakukan penyiapan material yang akan digunakan sebagai bahan penyusun *sandwich material*. Penyiapan material ini meliputi penyiapan material *face* dan material untuk *core* terutama cangkang kerang dan cangkang telur.

3.4.1. Penyiapan Material Skin

Pada tahap ini dilakukan proses penyiapan awal material *face* untuk *sandwich material*. Material yang akan digunakan sebagai *face* pada penelitian ini adalah baja ASTM A36. Baja A36 merupakan material yang jamak digunakan dalam proses pembangunan kapal dan memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang baik. Penyiapan pelat untuk *face* dilakukan dengan melakukan *sandblasting* pada pelat. Tujuan dari proses *sandblasting* tersebut adalah untuk memberikan kekasaran pada permukaan baja sehingga dapat menambah daya rekat antara *face* dan *core* pada *sandwich material*. Pada proses ini pelat disemprot menggunakan pasir silika dengan tekanan tinggi, sehingga menyebabkan abrasi permukaan pelat dan munculnya kekasaran pelat. Setelah proses *sandblasting* selesai dilakukan, maka dilakukan pembersihan agar tidak ada sisa pasir silika yang menempel pada pelat dan menghambat pelekatan *core material* pada *face*.



Gambar 3.3 Perbandingan pelat sebelum (atas) dan sesudah dilakukan *sandblasting* (bawah)

Pada Gambar 3.3 tampak bahwa pelat baja sebelum diberi perlakuan *sandblasting* terlihat lebih halus sedangkan setelah dilakukan *sandblasting* menjadi kasar permukaannya. Tingkat kekasaran permukaan yang dihasilkan dari proses *sandblasting* tersebut adalah 69 μm . Tingkat kehalusan pembersihan adalah sebesar SA 2,5 dan telah divalidasi dengan buku standar kehalusan dari material setelah proses *sandblasting* (Institute, 2007).

3.4.2. Penyiapan Material Core

Selain material *face*, waste material yang akan dijadikan *filler* juga disiapkan agar mampu menghasilkan *filler* yang berkualitas dan menjadikan *core material* memiliki kekuatan yang baik. Proses penyiapan penyiapan *waste material* terdiri dari beberapa tahap, mulai dari pembersihan, pengeringan, penghalusan, penyaringan, dehidrasi, dan karbonisasi.

1. Pembersihan

Pembersihan terhadap cangkang kerang dan cangkang telur dilakukan secara manual. Pada proses ini, cangkang kerang dibersihkan dari lumut dan organisme lain yang menempel pada cangkang kerang. Proses pembersihan dilakukan dengan merendam cangkang kerang dengan air kemudian mengaduk cangkang kerang dengan gerak menggosok. Tujuannya adalah agar lumut dan organisme lain yang menempel pada cangkang kerang ikut terkikis akibat gesekan dengan cangkang kerang lainnya.

Pada cangkang telur, proses yang dilakukan hampir sama, namun pada cangkang telur tidak dilakukan penggosokan secara kasar sebagaimana yang dilakukan pada cangkang kerang. Hal ini dikarenakan pada cangkang telur tidak terdapat kotoran yang menempel dengan lekat sebagaimana yang terdapat pada cangkang kerang.

2. Pengeringan

Proses selanjutnya yaitu pengeringan. Proses pengeringan yang dilakukan pada cangkang kerang dan cangkang telur juga sedikit berbeda. Untuk cangkang telur, pengeringan dilakukan dengan mengeringkannya secara langsung dibawah sinar matahari selama 3 hari. Berbeda dengan cangkang telur, cangkang kerang dikeringkan dengan cara dijemur selama 5 hari dengan intensitas matahari terik. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa cangkang kerang lebih mudah ketika digiling dan tidak terjadi penggumpalan partikel gilingan cangkang kerang akibat partikel air yang masih terkandung dalam hasil gilingan cangkang kerang nantinya.

3. Penghalusan

Proses penghalusan cangkang kerang dan cangkang telur dilakukan secara mekanis, yaitu dengan menggiling kedua material tersebut. Jika untuk menggiling cangkang telur dapat menggunakan alat blender buah atau biji-bijian rumah tangga, maka untuk menghaluskan cangkang kerang dibutuhkan mesin penggiling yang lebih kuat. Hal ini dikarenakan karakteristik cangkang kerang yang keras dan padat membutuhkan mesin

penghalus material yang lebih kuat. Penghalusan cangkang kerang dan cangkang telur dilakukan hingga kedua material tersebut menjadi serbuk yang halus.

4. Penyaringan

Pada proses ini dilakukan pengayakan terhadap cangkang kerang dan cangkang telur yang telah dihaluskan dan berbentuk serbuk. Saringan yang digunakan untuk menyaring serbuk cangkang kerang dan cangkang telur adalah mes 50. Ukuran *mesh* 50 memiliki arti bahwa pada setiap 1 inch persegi saringan tersebut, terdapat 50 lubang sehingga tingkat kehalusan butiran yang mampu melewati saringan tersebut dapat dipastikan.



Gambar 3.4 Proses penyaringan serbuk cangkang kerang dan cangkang telur



Gambar 3.5 Serbuk cangkang kerang dan cangkang telur hasil pengayakan

5. Dehidrasi

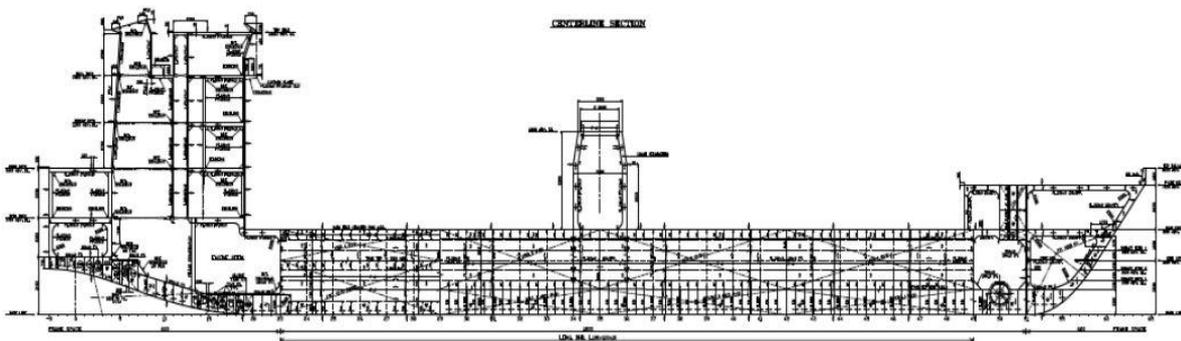
Proses dehidrasi adalah proses untuk menghilangkan kandungan air yang masih terkandung dalam serbuk cangkang kerang dan cangkang telur. Proses dehidrasi pada kedua material serbuk tersebut dilakukan dengan memanaskan serbuk cangkang kerang dan cangkang telur di dalam oven pada suhu 110°C selama 10 jam.

6. Karbonisasi

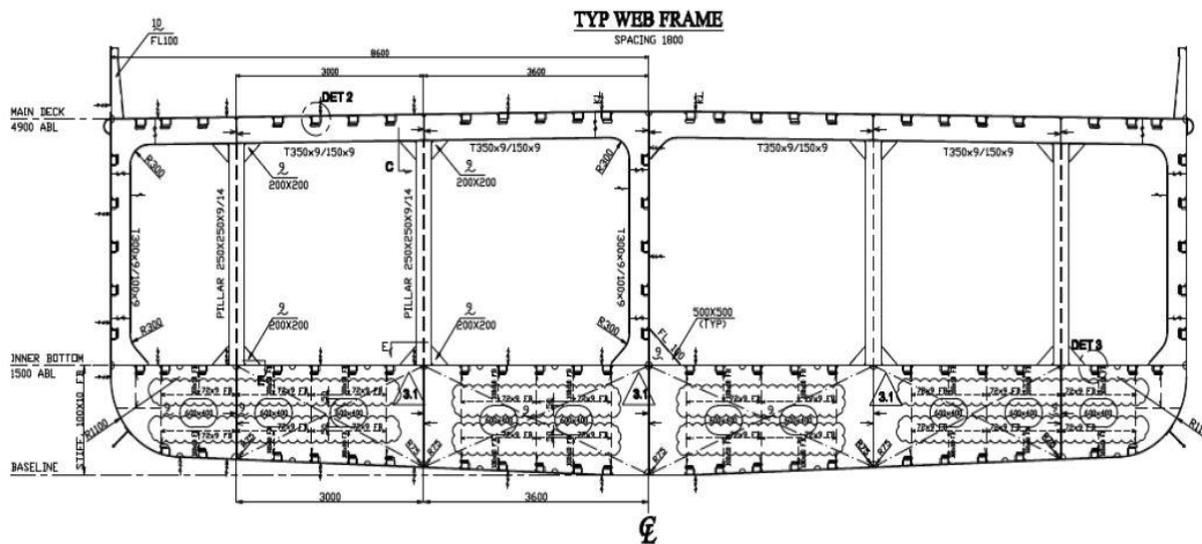
Cangkang kerang dan cangkang telur sejatinya tersusun dari bahan organik yang dapat mengalami proses pembusukan dan degradasi. Untuk menghilangkan unsur organik yang masih terkandung dalam kedua material tersebut maka dilakukan karbonisasi dengan menyangrai serbuk cangkang kerang dan cangkang telur selama 1 jam.

3.5. Perencanaan *Sandwich material*

Pada proses perencanaan *sandwich material*, dilakukan perhitungan sebelum pembuatan *sandwich material*. Perhitungan meliputi perhitungan ketebalan *sandwich material*, yaitu perhitungan ketebalan pelat atas, pelat bawah dan *core material*. Perhitungan yang digunakan untuk mendapatkan tebal dari masing-masing bagian tersebut menggunakan panduan ketentuan Lloyd'e register yang tertuang dalam *Provisional Rules for The Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure*. Untuk parameter aplikasi *sandwich material*, digunakan ukuran kapal yang telah direncanakan yaitu kapal *container* 100 TEUs. Aplikasi dari *sandwich material* yang direncanakan adalah pada bagian geladak utama kapal. rencana konstruksi dari kapal *container* 100 TEUs dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.6 Rencana konstruksi memanjang kapal



Gambar 3.7 Rencana Konstruksi melintang kapal

Pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7 terlihat rencana konstruksi dari kapal. dari desain yang telah ada diketahui tebal pelat yang dipakai pada desain awal kapal pada bagian geladak utama adalah 10 mm. Dari data ketebalan pelat awal, kemudian dihitung ketebalan pelat *sandwich material* sesuai dengan *rule* LR sehingga ketebalan untuk masing-masing bagian *sandwich material* didapatkan (Tabel 3.2).

Tabel 3.2 Hasil perhitngan tebal *sandwich material* di geladak

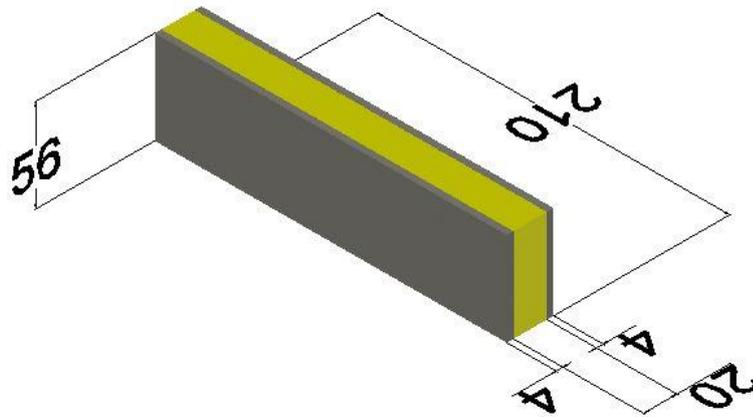
Nama bagian	tc (mm)	a (mm)	b (mm)	A_R	Z_{rule}	l	P_{eqR} (Mpa)	Face Plate			d (mm)	R	$R \leq l$
								$t1$	$t2$	k			
Deck	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	3	4	1	23,5	0,24	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke

Pada Tabel 3.2 dapat dilihat tebal masing-masing bagian *sandwich material*. Tebal *core material* yang direncanakan adalah 20 mm. Sedangkan tebal untuk *face material* bagian atas dan bawah adalah sama yaitu 4mm sehingga ketebalan total dari *sandwich material* adalah 28 mm. Setelah ukuran tebal *sandwich material* didapatkan, langkah selanjutnya adalah menentukan dimensi spesimen. Dimensi spesimen diatur dalam *rule* ASTM C 364-99 sebagaimana kondisi-kondisi kontrol pengujian yang lainnya. Batasan dari dimensi spesimen tersebut diantaranya:

- a. Spesimen pengujian berbentuk segi 4 dengan lebar minimal 50 mm namun tidak kurang dari 2 kali tebal *sandwich material*.

b. Panjang spesimen tidak boleh lebih dari 8 kali tebal dari *sandwich material*.

Dari batasan dimensi spesimen berdasarkan *rule* tersebut didapatkan *sandwich material* dengan dimensi seperti tampak dalam Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Dimensi spesimen uji *sandwich material*

untuk variasi spesimen terdiri dari 2 jenis *core material* yaitu *core* yang menggunakan *filler* cangkang kerang dan cangkang telur. sedangkan variasi persentase *filler* terdiri dari 20% dan 30% sehingga variasi material *sandwich* secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 variasi *sandwich material* yang akan diteliti

Nama <i>Sandwich</i>	Jenis <i>Filler</i>	Persentase UPR	Persentase <i>Filler</i>
<i>Sandwich A</i>	Cangkang kerang	80%	20%
<i>Sandwich B</i>	Cangkang kerang	70%	30%
<i>Sandwich C</i>	Cangkang telur	80%	20%
<i>Sandwich D</i>	Cangkang telur	70%	30%

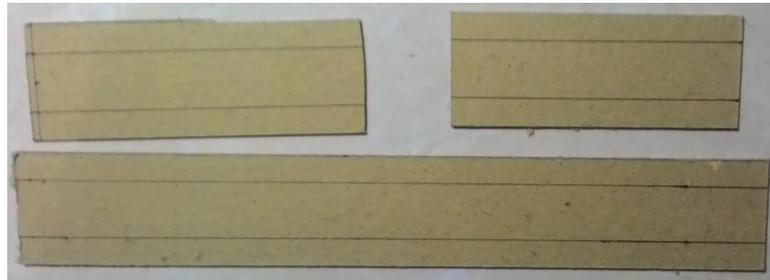
3.6. Pembuatan *Sandwich material*

Pada tahap ini dilakukan proses pencetakan *sandwich material*. Proses pencetakan dilakukan dalam berapa tahapan, diantaranya pembuatan cetakan, pencampuran bahan *core material*, dan pencetakan.

1. Pembuatan cetakan.

Proses pembuatan cetakan untuk *sandwich material* diawali dengan pemotongan kertas pembatas yang akan digunakan sebagai cetakan *sandwich material*. Untuk kertas yang digunakan adalah kertas karton yang tebal dan kaku. Kertas karton tebal dipilih karena nantinya saat proses pencetakan *sandwich material* akan dihasilkan panas dengan suhu tinggi. Pada saat itu terjadi maka kertas berperan sebagai penyerap panas yang dihasilkan

oleh reaksi antara *polyester resin* dan katalis. Selain itu kertas karton juga mudah untuk dilepas, sehingga memudahkan proses pelepasan ketika proses pencetakan telah selesai. Pembatas berupa kertas karton terdiri dari 3 bagian, yaitu pembatas bawah dan 2 sisi samping. Bentuk kertas pembatas dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Kertas pembatas untuk cetakan *sandwich material*

Setelah kertas pembatas selesai dibuat, langkah selanjutnya adalah melekatkan pelat pada kertas pembatas. Pelat baja dilekatkan pada kertas pembatas menggunakan lem tembak. Lem tembak diaplikasikan di bagian luar dari kedua sisi pelat sehingga nantinya tidak mencampuri katalis yang akan dituangkan ke bagian dalam dari kedua pelat baja. bentuk cetakan yang telah selesai dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Cetakan spesimen *sandwich material*

2. Pengaplikasian *Epoxy resin*

Setelah cetakan telah selesai dibuat, maka untuk persiapan proses pencetakan, pada cetakan diaplikasikan *epoxy resin*. Telah dijelaskan pada BAB 2 bahwa fungsi dari pengaplikasian *epoxy resin* adalah untuk meningkatkan kerekatan antara *face* dan *core*

pada *sandwich material*. Proses pengaplikasian *epoxy resin* didahului dengan pencampuran *epoxy resin* dengan *hardener*. Rasio campuran yang digunakan adalah 3 untuk *epoxy resin* dan 1 untuk *hardener*. Rasio yang digunakan untuk campuran tersebut adalah rasio berat. Untuk memastikan akurasi rasio, maka dilakukan penimbangan untuk memastikan jumlah *epoxy resin* dan *hardener* telah sesuai.



Gambar 3.11 Penimbangan *epoxy resin* (kiri) dan *hardener* (kanan)

Setelah dipastikan bahwa rasio *epoxy resin* dan *hardener* telah benar, maka kedua bahan tersebut dapat dicampurkan dan diaduk hingga merata. Setelah dirasa bahwa campuran *epoxy resin* telah tercampur sempurna, maka campuran *epoxy resin* diaplikasikan pada bagian dalam pelat tempat campuran material *core* akan dituangkan. Pengaplikasian *epoxy resin* dilakukan dengan bantuan kuas (Gambar 3.12).



Gambar 3.12 Pengaplikasian *epoxy resin* pada cetakan

Pengaplikasian *epoxy resin* dilakukan dengan mengusapkan kuas yang telah bercampur dengan *epoxy resin* ke bagian dalam cetakan spesimen *sandwich material*. Pengaplikasian dilakukan hingga *epoxy resin* telah merata pada pelat. Untuk menjaga keseragaman spesimen dalam satu variasi, maka proses aplikasi *epoxy resin* dilakukan secara

bersamaan untuk satu variasi spesimen. Setelah *epoxy resin* diaplikasikan, maka akan ada jeda waktu hingga 30 menit hingga *epoxy resin* mulai mengeras. Dalam rentang waktu ini, dapat diisi dengan proses selanjutnya yaitu pencampuran bahan *core material*, sehingga ketika *epoxy resin* mulai mengeras, campuran *core material* dapat dituangkan ke dalam cetakan. Selain itu selama jeda waktu hingga *epoxy resin* mulai mengeras, resin yang telah diaplikasikan akan selalu mengalir ke bawah. Untuk mengatasi hal tersebut, *epoxy resin* yang mengalir ke bawah dapat dioleskan kembali secara periodik hingga terasa *epoxy resin* mulai mengeras.

3. Pencampuran bahan *core material*

Proses selanjutnya dari pembuatan spesimen uji adalah proses pencampuran bahan untuk *core material*. Proses pencampuran bahan diawali dengan penimbangan masing-masing bahan yang akan digunakan, diantaranya *polyester resin*, *filler*, dan katalis. Proses penimbangan bahan dan pencampuran material dilakukan sekali untuk tiap variasi, yang berarti bahan untuk sejumlah spesimen dalam satu variasi dibuat dalam sekali buat. Hal ini dilakukan untuk menghindari perbedaan kondisi yang mungkin terjadi saat proses pencampuran, pengadukan atau perbedaan perlakuan lainnya. Dengan pembuatan material untuk seluruh spesimen dalam sekali proses akan menjamin bahwa keseluruhan material dalam satu variasi tersebut sama dan seragam.



Gambar 3.13 Proses penimbangan bahan untuk pembuatan *sandwich material*

Setelah proses penimbangan selesai dan masing-masing material telah dipastikan sesuai dengan persentase yang telah ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah pencampuran seluruh bahan *core material*. Proses pencampuran bahan *core material*

dilakukan secara bertahap dan berurutan. Bahan pertama yang dicampurkan adalah *polyester resin* dengan material *filler*.



Gambar 3.14 Pencampuran bahan *core material*

Setelah *polyester resin* dan *filler* tercampur dengan merata, maka selanjutnya katalis dan pigmen dapat ditambahkan. Setelah katalis dan pigmen ditambahkan, campuran tersebut diaduk hingga seluruh bahan tercampur dengan merata. Untuk memastikan bahwa campuran *core material* yang dihasilkan merata, maka pengadukan dilakukan terus menerus hingga campuran *core* tersebut dituangkan ke cetakan.



Gambar 3.15 Campuran *core material*

4. Pencetakan

Setelah proses pencampuran selesai, maka campuran yang telah dibuat harus segera dituangkan ke dalam cetakan yang telah dilapisi dengan *epoxy resin* pada tahap sebelumnya.



Gambar 3.16 Penuangan campuran *core material* ke dalam cetakan

Setelah proses penuangan selesai, maka *polyester resin* pada *core material* akan mulai mengeras. Ketika *core* mulai mengeras, maka terjadi pula kenaikan suhu dari *core material* hingga spesimen *sandwich material* secara keseluruhan menjadi sangat panas. Kenaikan suhu ini berlangsung hingga *core material* memadat dan menjadi kering yang biasanya berlangsung hingga 2-3 jam. Waktu yang dibutuhkan *core material* untuk mengeras dan menempel dengan sempurna ke pelat *face* adalah 24 jam.

3.7. Identifikasi Spesimen *Sandwich material*

3.7.1. Penghitungan massa jenis *sandwich material*

Penghitungan massa jenis dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai massa jenis dari *sandwich material* secara keseluruhan. Identifikasi nilai massa jenis *sandwich material* dapat digunakan sebagai referensi sifat fisik dari *sandwich material* dengan variasi *filler* cangkang kerang dan cangkang telur dan variasi persentase 20% dan 30%. Perhitungan massa jenis *sandwich material* dilakukan dengan 2 tahap yaitu pengukuran dan penimbangan. Pengukuran dilakukan dengan mengukur geometri dari spesimen *sandwich material*.

Sedangkan penimbangan dilakukan dengan menimbang spesimen *sandwich material*. Dari hasil pengukuran dan penimbangan kemudian dapat dihitung nilai dari massa jenis *sandwich material* tersebut.

3.7.2. Pengujian *Buckling*

Standarisasi pengujian tekan pada penelitian ini menggunakan standar ASTM C 364-99; *Standard Testing Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Construction*. Standar tersebut mengatur tentang standar pengujian tekan uni-aksial pada *sandwich material*. Pengujian dilakukan dengan variasi material *filler* berupa cangkang kerang dan cangkang telur, dengan variasi persentase sebesar 20% dan 30% untuk masing-masing variasi material. Untuk melakukan pengujian tekan digunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 50 Ton dengan kecepatan pembebanan sebesar 1mm/menit. Keseluruhan tata letak dari pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 set up peralatan eksperimen

Data yang dihasilkan dari uji *buckling* ini berupa data waktu, beban dan *displacement* yang akan menunjukkan laju beban terhadap waktu atau laju beban terhadap *displacement*. Dari data tersebut dapat dianalisa perilaku masing-masing spesimen ketika mengalami pembebanan aksial.

3.8. Pemodelan Numerik *Sandwich material* Menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM)

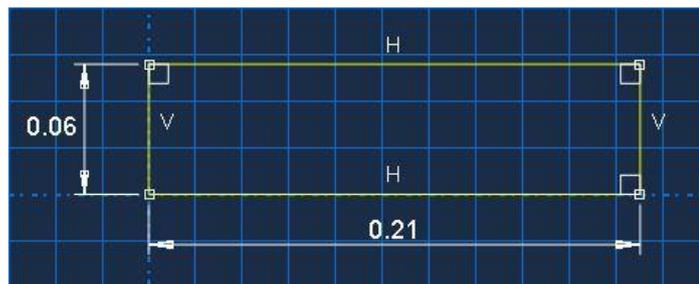
Pemodelan numerik pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak pemodelan elemen hingga di mana pada pemodelan ini dimodelkan spesimen uji yang diteliti beserta kondisi batas dan kondisi pembebanan yang sesuai dengan pengujian *buckling* yang telah dilakukan. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk memvalidasi hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Variasi yang digunakan pada tahap ini juga disamakan dengan variasi yang digunakan pada proses pengujian eksperimen, yaitu variasi *filler* 20% dan 30%. *Material properties* sebagai *input* fitur identifikasi *core material* yang digunakan pada tahap pemodelan ini didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Untuk *input* kondisi pembebanan dan kondisi batas pada pemodelan ini diberikan beban tekan *aksial* searah sumbu memanjang model dengan kondisi batas berupa tumpuan jepit pada kedua ujung model dengan salah satu tumpuan jepit diberi satu derajat kebebasan ke arah sumbu memanjang model.

Langkah-langkah pemodelan spesimen uji pada perangkat lunak pemodelan elemen hingga menghasilkan simulasi pembebanan dan reaksi spesimen dimulai dengan pembuatan *part* baik *top* dan *bottom plate* maupun *core material*. Langkah selanjutnya adalah mendefinisikan *mechanical properties* dari masing-masing material. Kemudian dilakukan perangkaian masing-masing *part* hingga menjadi spesimen yang utuh.

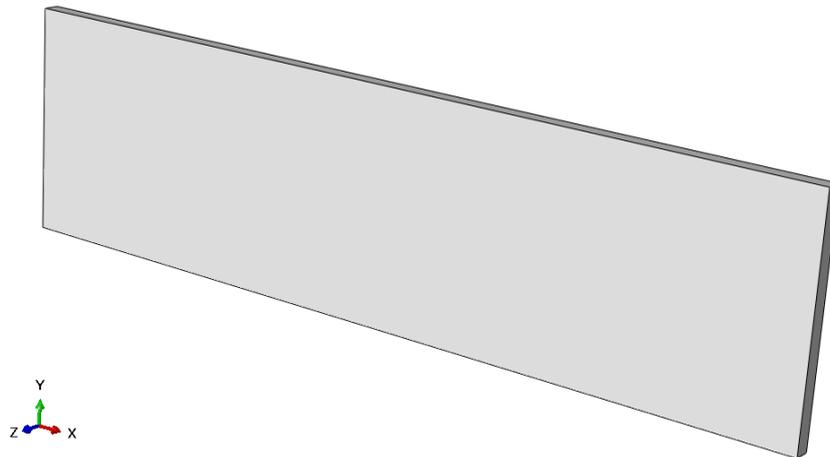
1. Pembuatan *Part*

Pada tahap ini bagian-bagian penyusun *sandwich material* didefinisikan secara geometris. Bagian *top plate*, *bottom plate* dan *core material* sama-sama didefinisikan sebagai bentuk 3 dimensi *solid shape*, dengan tipe *extrusion* dan *deformable*. Setelah itu kemudian bentuk geometris dari *top plate*, *bottom plate* dan *core material* di definisikan. Pada penelitian ini dibuat model *top plate*, *bottom plate* dan *core material* berukuran panjang 0,21 m dan lebar 0,056 m.

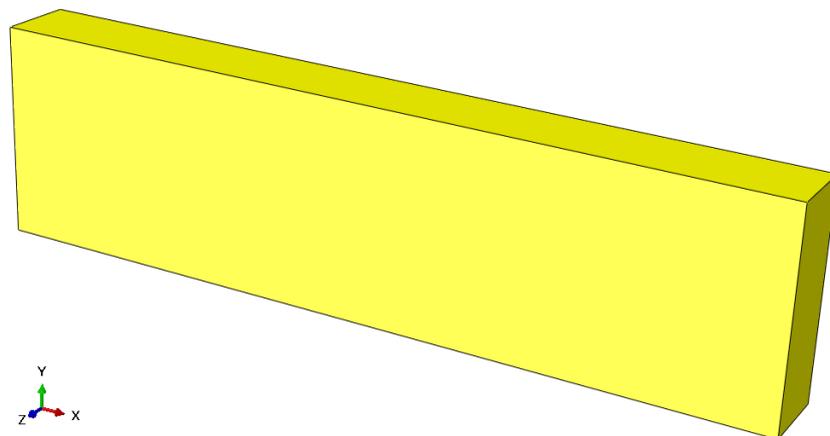


Gambar 3.18 Pendefinisian geometris *face plate* dan *core material*

Setelah bentuk geometris dibuat, maka bentuk tersebut di *extrude* untuk menjadikannya 3 dimensi. *Input* ketebalan untuk masing-masing *face plate* dan *core material* adalah 0,004 m dan 0,02 m. Setelah dilakukan proses *extrusion*, maka *plate* dan *core material* akan tampak sebagaimana Gambar 3.19 dan Gambar 3.20.



Gambar 3.19 Tampilan *face plate* hasil proses *extrusion*



Gambar 3.20 Tampilan *core material* hasil proses *extrusion*

2. Pendefinisian *material properties*

Pada tahap ini dilakukan proses *input* sifat fisis dan mekanis dari material material penyusun *sandwich material*, baik *face plate* maupun *core material*. Material yang digunakan sebagai *face plate* adalah baja ASTM A36, sedangkan untuk *core material* digunakan campuran *unsaturated polyester resin* dan *filler* yang berupa cangkang kerang dan cangkang telur. Sifat fisis dan mekanis dari *face plate* dan *core material* dapat dilihat dalam tabel Tabel 3.4.

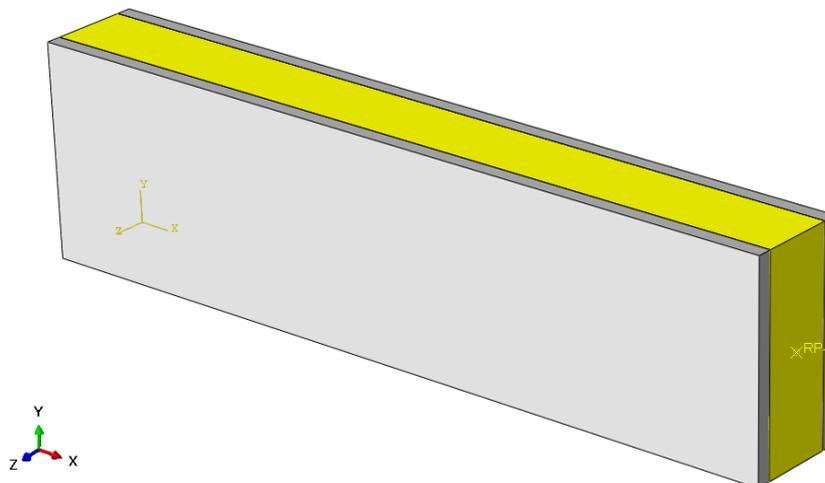
Tabel 3.4 Sifat fisis dan mekanis material penyusun *sandwich material*

Material	Massa Jenis [kg/m ³]	Kuat Tarik [MPa]	Poisson's ratio ν
Baja ASTM A36	7850	206000	0,3
UPR+cangkang kerang 20%	1329	249,35	-
UPR+cangkang kerang 30%	1465	331,80	-
UPR+cangkang telur 20%	1300	281,45	-
UPR+cangkang telur 30%	1396	300,30	-

Nilai-nilai tersebut lalu dimasukkan pada saat melakukan pendefinisian *material properties*. Setelah melakukan *input* sifat fisis dan mekanis dari material, langkah selanjutnya adalah mendefinisikan *part* yang telah dibuat sesuai sifat fisis dan mekanis yang telah dimasukkan. Dengan demikian hasil dari tahap ini adalah model *top plate*, *bottom plate*, dan *core material* yang mempunyai nilai sifat fisis dan mekanis.

3. Assembly

Pada tahap ini *part* yang telah dibuat dan didefinisikan sifatnya dirangkai menjadi satu kesatuan material yang utuh. Hasil dari tahap ini tampak sebagaimana Gambar 3.21.

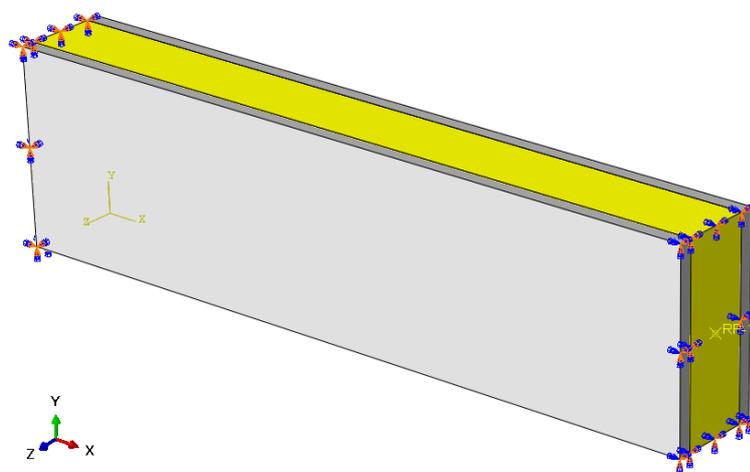


Gambar 3.21 Tampilan *assembly* dari *sandwich material*

4. Melakukan *input constraint* dan kondisi batas

Pada tahap ini, dilakukan *input* berupa *constraint* dan kondisi batas yang dialami *sandwich material*. Untuk *input constraint* berupa *tie constraint* pada masing-masing permukaan dari *face plate* dan *core material* yang mengalami kontak. Hal ini dimaksudkan untuk menyimulasikan *adhesive* yang merekatkan antara *core material*

dan *face plate* pada kondisi *sandwich material* yang sebenarnya. Dengan diaplikasikannya *tie constraint* permukaan *part face plate* dan *core material* yang mengalami kontak akan saling terikat dan saling mempengaruhi ketika beban bekerja. Untuk kondisi batas pada pemodelan ini dimodelkan kedua ujung model *sandwich material* diberikan tumpuan jepit, dengan salah satu ujung spesimen diberi 1 derajat kebebasan yaitu pada sumbu aksial model. Kondisi batas pada pemodelan ini menyimulasikan spesimen yang ditahan oleh *clamp* pada kedua ujungnya sehingga bagian ujung spesimen tidak dapat berotasi. Tampilan model setelah kondisi batas dan *constraint* diaplikasikan tampak sebagaimana Gambar 3.22.



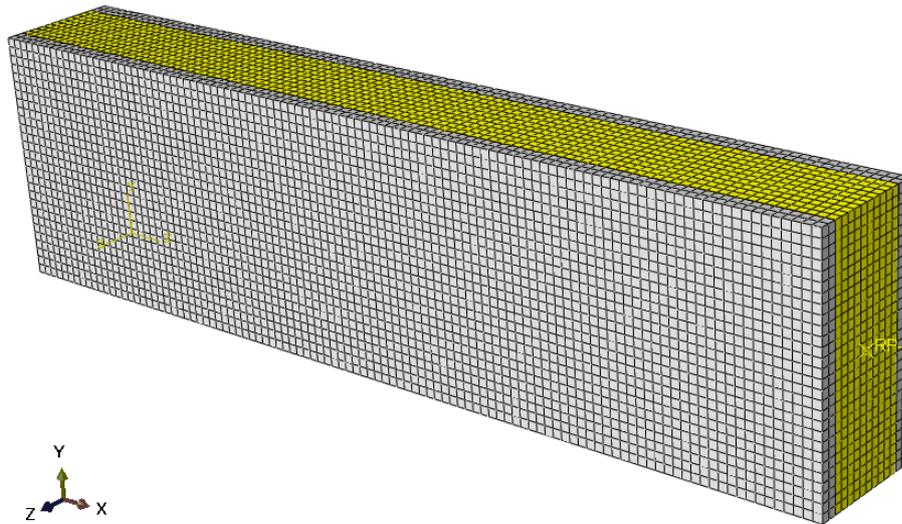
Gambar 3.22 Tampilan model setelah kondisi batas dan *constraint* diaplikasikan

5. Penentuan *step* dan *load*

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian *step-step* dan *load* yang bekerja pada model. *Step* menggambarkan kondisi atau fase yang akan dialami oleh model selama simulasi. Pada pemodelan ini digunakan *step* awal sebelum model diberi beban dan *step* pembebanan yaitu saat beban mulai bekerja pada model. Untuk *step* pembebanan prosedur yang dipilih adalah *linear perturbation* dengan pembebanan yang dipilih adalah *buckle*. Untuk *eigensolver* yang digunakan adalah *subspace* dan jumlah pengulangan maksimum 500 kali. Setelah pendefinisian *step* dilakukan langkah selanjutnya adalah memodelkan *load*. *Load* yang digunakan adalah jenis *concentrated load* yang bekerja pada *reference point*, yang telah dibuat menjadi satu set dengan penampang melintang model spesimen. *Load* yang diberikan bekerja pada sumbu x ke arah negatif yaitu menuju ke sumbu memanjang model spesimen.

6. Meshing

Proses selanjutnya adalah penentuan tipe, jumlah dan ukuran *mesh*. Pada tahap ini, masing-masing *face plate* dan *core material* dibagi menjadi elemen-elemen dengan ukuran tertentu. Tipe elemen yang digunakan pada proses pemodelan ini adalah elemen kubus dengan ukuran elemen 0,002 m dengan jumlah 41.160 elemen untuk keseluruhan model. Hasil dari tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Tampilan model setelah dilakukan *meshing*

7. Running model

Pada tahap ini model yang telah dibuat beserta kondisi-kondisi yang telah didefinisikan pada tahap sebelumnya disimulasikan hingga menghasilkan hasil sebagaimana yang telah dilakukan pada uji eksperimen.

3.9. Analisa Hasil dan Pengambilan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan analisa secara keseluruhan dari hasil pengujian *buckling* dari *sandwich material* baik secara pengujian eksperimen maupun hasil pemodelan dan juga pengambilan kesimpulan dari analisa dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Pada bagian kesimpulan akan disimpulkan hasil dari proses analisa secara menyeluruh terhadap hasil penelitian dan memperoleh jawaban dari rumusan masalah yang telah disampaikan pada BAB 1.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Identifikasi *Sandwich material*

Identifikasi pada *sandwich material* diperlukan untuk mengetahui perubahan bentuk dan karakteristik material dari kondisi setiap material penyusunnya, dikarenakan *sandwich material* tersusun dari beberapa material yang berbeda baik secara fisik maupun sifat mekaniknya, maka material yang dihasilkan tentunya akan berbeda dengan material asalnya. Dengan adanya pemberian variasi persentase, tentunya akan memberikan perbedaan pada sifat fisiknya. Dengan melakukan identifikasi pada spesimen *sandwich material* tersebut, maka akan diketahui pengaruh variasi *filler* dan persentasenya terhadap sifat fisik dari *sandwich material*. Sesuai dengan tahapan penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil perhitungan massa jenis *sandwich material* sebagaimana tampak pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Identifikasi massa jenis *sandwich material*

Nama <i>Sandwich</i>	Jenis <i>Filler</i>	Persentase <i>Filler</i>	Massa Jenis [kg/m ³]
<i>Sandwich A</i>	Cangkang kerang	20%	3147,994
<i>Sandwich B</i>	Cangkang kerang	30%	3230,295
<i>Sandwich C</i>	Cangkang telur	20%	3087,863
<i>Sandwich D</i>	Cangkang telur	30%	3167,257

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa untuk jenis *filler* yang sama, persentase *filler* dalam *core material* mempengaruhi massa jenis dari *sandwich material* secara keseluruhan. Pada *sandwich material* dengan *filler* cangkang kerang, *sandwich* dengan persentase *filler* 30% memiliki massa jenis sebesar 3230,295 kg/m³. Nilai ini 2,61% lebih besar jika dibandingkan dengan nilai massa jenis *sandwich material* dengan persentase *filler* 20% yang sebesar 3147,994 kg/m³. Demikian pula untuk *sandwich* dengan *filler* cangkang telur. *Sandwich* dengan persentase *filler* 30% memiliki massa jenis 2,57% lebih tinggi dari *sandwich* dengan persentase *filler* 20%. Dengan demikian dapat dikatakan jika penambahan persentase *filler* dalam *core material* berpengaruh pada meningkatnya massa jenis dari *sandwich material*.

Dengan cara yang sama dapat dibandingkan antara *sandwich* dengan *filler* cangkang kerang dan cangkang telur pada persentase yang sama. Pada persentase 20%, *sandwich* dengan

filler cangkang kerang memiliki massa jenis 1,95% lebih tinggi dari *sandwich* dengan *filler* cangkang telur. Dan pada persentase 30% *sandwich* dengan *filler* cangkang kerang memiliki massa jenis 1,99% lebih tinggi dari cangkang telur. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa untuk tiap persentase *filler* cangkang kerang menghasilkan *sandwich* yang memiliki massa jenis lebih besar dibandingkan cangkang telur. dari hasil ini dapat dilihat bahwa *sandwich material* dengan *filler* cangkang kerang lebih unggul dalam massa jenis dibandingkan *sandwich* dengan *filler* cangkang telur. Akan tetapi untuk mengatakan bahwa cangkang kerang menghasilkan *sandwich material* yang lebih baik daripada cangkang telur masih diperlukan parameter karakteristik lainnya.

4.2. Pengujian *Buckling* Pada *Sandwich*

Pengujian *buckling* dilakukan untuk mendapatkan nilai kekuatan suatu material dalam menahan beban yang bekerja pada benda tersebut dalam sumbu aksial benda. Pengujian *buckling* dilakukan dengan membebani benda dengan rasio panjang terhadap lebar dan tebal yang tinggi. Pada proses pengujian benda uji diberi beban yang bekerja searah dengan sumbu memanjang benda. Pemberian beban dilakukan dengan cara meningkatkan intensitas beban secara perlahan sehingga terjadi pertambahan intensitas beban seiring pertambahan waktu. Pada *sandwich material*, pengujian *sandwich* dilakukan untuk mengetahui kekuatan *buckling* dari material dan mode kegagalan serta perilaku *buckling* dari *sandwich material*. Dengan melakukan analisa lebih lanjut seperti analisa pasca *buckling* bahkan akan didapati hasil yang lebih akurat yang dapat merepresentasikan sifat *sandwich material* dengan lebih baik.

4.2.1. Proses Kegagalan Material

Pada pengujian *buckling* ini, spesimen uji diberikan beban yang searah dengan sumbu memanjangnya. Spesimen uji dibuat sedemikian rupa sehingga menggambarkan kolom yang mengganggu beban aksial. Kondisi awal dari pengujian *buckling* tersebut adalah benda diatur agar statis agar stabilitasnya tinggi. Hal ini karena *buckling* sendiri merupakan kegagalan hasil dari instabilitas benda dalam menahan beban aksial. Sebagai akibatnya terjadi defleksi lateral pada benda tersebut. Pembebanan pada pengujian *buckling* dilakukan dengan menambah intensitas beban secara berkala hingga benda mencapai kondisi dimana stabilitas benda terganggu akibat intensitas beban yang bekerja dalam sumbu aksial. Pada saat stabilitas benda terganggu, maka terjadi indikasi berupa defleksi lateral pada benda. Dengan intensitas beban yang secara gradual semakin besar, maka defleksi lateral yang terjadi juga semakin tinggi hingga benda mengalami keruntuhan secara total.

Gambar 4.1 hingga Gambar 4.4 menggambarkan proses pengujian *buckling* yang dilakukan. Gambar 4.1 menunjukkan kondisi awal pengujian ketika proses pembebanan awal.



Gambar 4.1 Kondisi pembebanan awal

Dengan seiring pertambahan intensitas beban yang bekerja, maka kestabilan spesimen uji juga semakin berkurang dan di satu titik, mulai terjadi defleksi lateral pada *sandwich material*. Proses ini dapat dilihat seperti dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Kondisi defleksi awal pada benda uji

Ketika defleksi lateral semakin membesar dan intensitas beban yang bekerja juga semakin bertambah, maka terjadi *initial crack*. Dengan terjadinya peningkatan defleksi, maka pada suatu titik, material mengalami transisi dari zona elastis ke zona plastis. Pada saat defleksi masih berada pada rentang elastis, apabila beban dihilangkan maka material akan kembali ke bentuk semula, sedangkan apabila defleksi yang terjadi sudah berada di zona plastis maka

meskipun beban dihilangkan, maka material tidak akan kembali ke bentuk semula. Hal ini sebagaimana yang terlihat dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3 crack yang terjadi akibat defleksi yang terlalu besar

Ketika defleksi yang terjadi semakin besar maka lama kelamaan seiring bertambahnya beban maka benda uji akan mengalami kegagalan sepenuhnya. Hal ini juga ditandai dengan terjadinya delaminasi antara *core* dan *face*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.4.

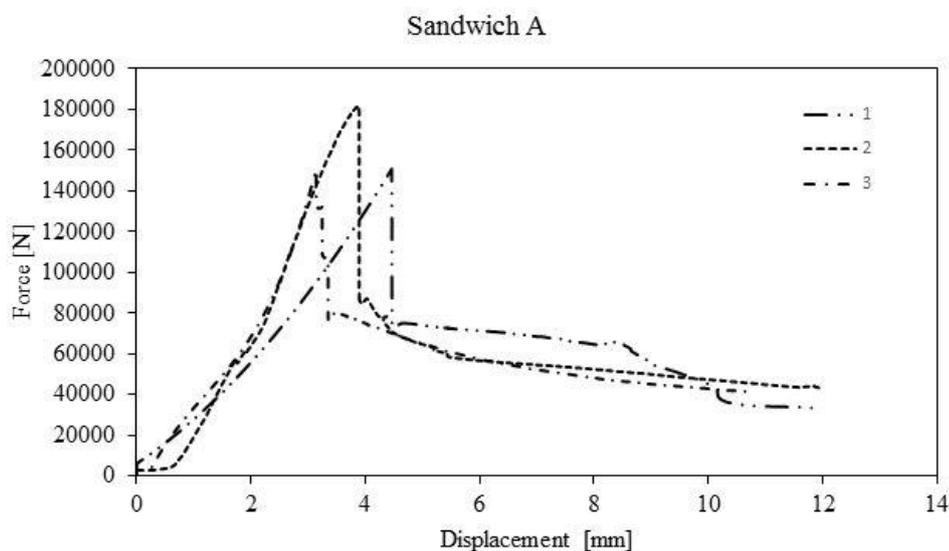


Gambar 4.4 Kegagalan spesimen

4.2.2. Hasil Pengujian *Buckling*

Sebagaimana yang telah disinggung pada bab sebelumnya, pengujian *buckling* menghasilkan data berupa waktu, beban dan *displacement*. Data berupa beban dan *displacement*

yang dihasilkan merupakan fungsi dari satuan waktu yang ditentukan oleh mesin yang digunakan. Pada penelitian ini digunakan satuan waktu 0,05 detik, yang berarti nilai *load* dan *displacement* didapatkan setiap 0,05 detik. Data tersebut kemudian diubah menjadi grafik untuk mempermudah pengamatan dalam penentuan nilai *yield point*. Nilai *yield point* secara dasarnya adalah nilai *load* dimana pada titik beban tersebut spesimen uji berubah dari material elastis menjadi material plastis. Nantinya nilai *yield point* ini akan digunakan sebagai modal dalam perhitungan *acceptance criteria* dari *sandwich material*. Jika nilai *yield point* telah didapatkan, nilai *load* tersebut lalu dikonversi menjadi nilai *stress* dan biasa disebut *yield stress*. Gambar 4.5 menunjukkan grafik *load* terhadap *displacement* pada material *sandwich A* yang didapatkan dari pengujian *buckling*.

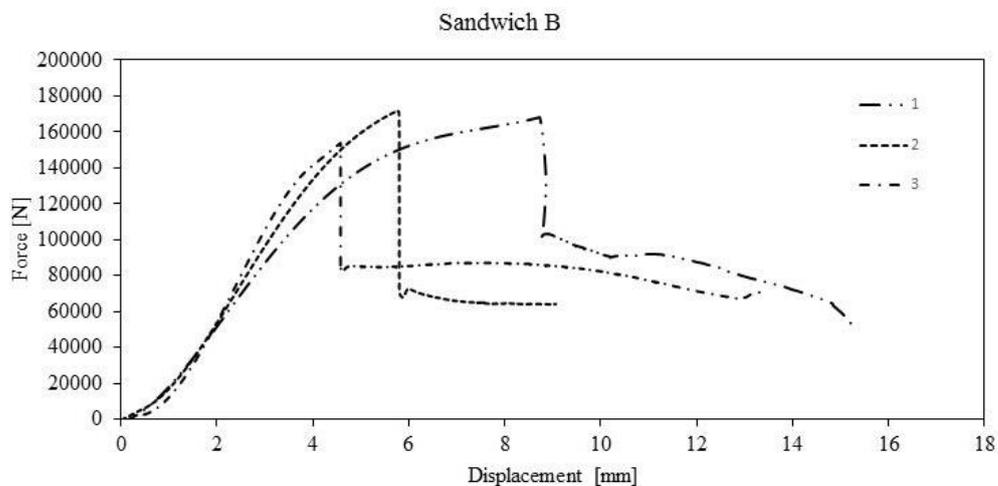


Gambar 4.5 Grafik hasil pengujian *sandwich A*

Dari Gambar 4.5 berdasarkan grafiknya, dapat dilihat bahwa secara umum material mengalami peningkatan intensitas beban secara linier terhadap defleksi. Bahkan hingga mencapai titik puncak P_{ult} , penambahan *displacement* masih linier. Hal ini mengindikasikan bahwa material *sandwich A* adalah material yang *brittle*. Material *brittle* dapat dibedakan dari material *ductile* berdasarkan perilakunya sesaat sebelum terjadi kegagalan. Pada material *brittle* material tidak di dahului perubahan lokal pada material menjadi plastis, akan tetapi material secara tiba-tiba runtuh begitu saja. Sedangkan pada material *ductile*, sebelum mengalami kegagalan, material akan mengalami perubahan lokal dari elastis menjadi plastis. Perubahan ini menyebabkan terjadinya deformasi plastis apabila pembebanan dilanjutkan hingga mencapai nilai beban kritis lalu runtuh. Dari Gambar 4.5 juga dapat diketahui bahwa pada spesimen 2 terjadi *initial crack* pada *displacement* ± 2 mm. Nilai P_{ult} untuk material *sandwich A* secara

berurutan untuk spesimen 1, 2, dan 3 adalah 150881,148 N, 181476,600 N, dan 151107,107 N dengan nilai P_{ult} rata-rata sebesar 161154,952 N.

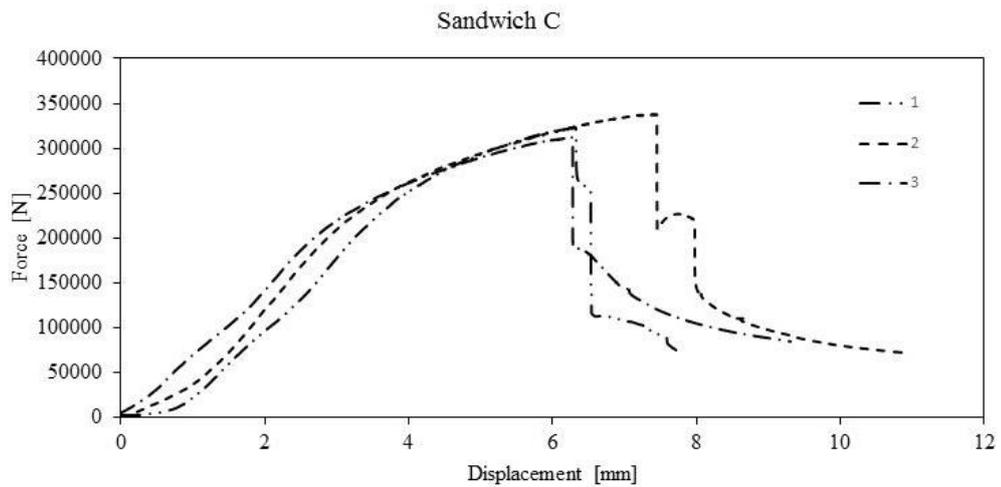
Pada material *sandwich* B, hasil pengujian yang sudah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.6. apabila dilihat berdasarkan bentuk grafiknya, *sandwich* B cenderung lebih *ductile* karena bentuk kurva yang tidak linier. Spesimen dengan tingkat *ductile* paling tinggi pada *sandwich* B adalah spesimen 1 dengan *displacement* mencapai lebih dari 9 mm sebelum mengalami kegagalan.



Gambar 4.6 Grafik hasil pengujian *sandwich* B

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa *sandwich* B memiliki kekuatan yang lebih baik, selain juga lebih *ductile*. Meskipun kedua *sandwich material* menggunakan material *filler* yang sama, namun perbedaan persentase *filler* memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap sifat material. Hasil pengujian *sandwich* B menghasilkan P_{ult} untuk masing-masing spesimen 1,2 dan 3 adalah sebesar 168110,793 N, 171820,300 N, dan 153789,100 N dengan nilai P_{ult} sebesar 164573,398 N.

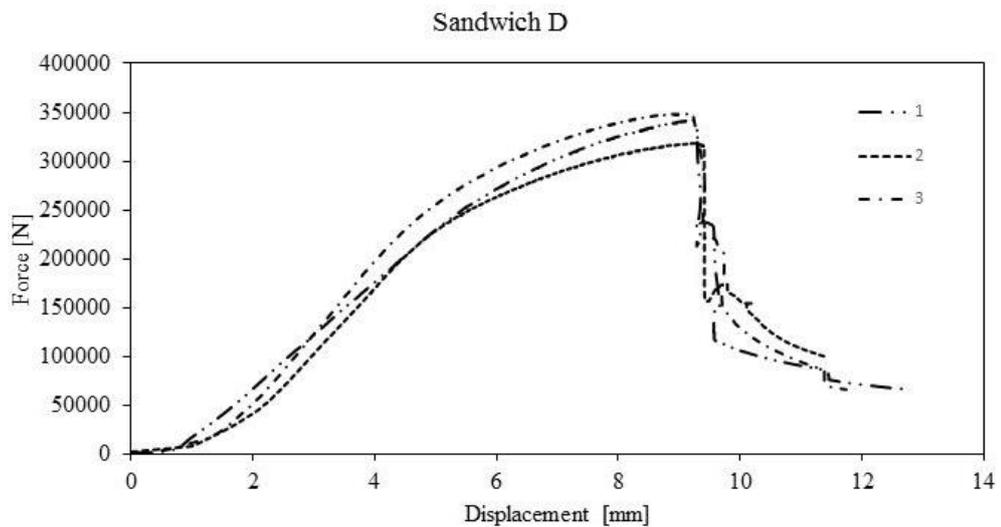
Hasil pengujian dari *sandwich* C dapat dilihat pada Gambar 4.7. *Sandwich* berbeda dengan *sandwich* A dan B. *Sandwich* C menggunakan *filler* cangkang telur dengan persentase *filler* 20%. Bila dilihat dari grafiknya, secara umum *sandwich* C memiliki karakteristik yang sedikit lebih baik dari *sandwich* B. Akan tetapi jika dilihat nilai P_{ult} *sandwich* C, maka terlihat bahwa *sandwich* C jauh lebih kuat dari *sandwich* B.



Gambar 4.7 Grafik hasil pengujian *sandwich c*

Dari Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa *sandwich C* adalah material yang *ductile*. Hasil pengujian *sandwich C* menghasilkan bentuk grafik yang tidak linier dengan nilai P_{ult} yang tinggi. Dari hasil pengujian *buckling sandwich C*, didapatkan nilai P_{ult} untuk masing-masing spesimen 1, 2, dan 3 adalah sebesar 322218,800 N, 337406,300 N, dan 311578,100 N. Dari nilai ini didapatkan nilai P_{ult} rata-rata sebesar 323734,400 N.

Sedangkan hasil pengujian untuk *sandwich D* dapat dilihat pada Gambar 4.8. dalam gambar tersebut bahwa nilai P_{ult} *sandwich D* lebih besar dari *sandwich C*. Sebagaimana *sandwich C*, jika melihat kurvanya, maka dapat dilihat bahwa *sandwich D* juga merupakan material yang bersifat *ductile*.



Gambar 4.8 Grafik hasil pengujian *sandwich D*

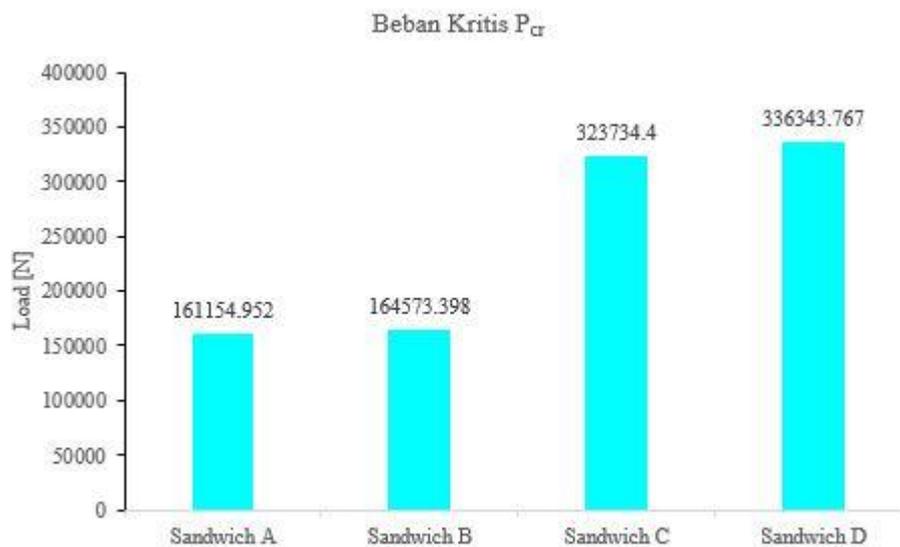
Berdasarkan grafik di atas, maka didapatkan nilai P_{ult} untuk masing-masing spesimen 1, 2, dan 3 sebesar 342062,500 N, 317859,400 N dan 349109,400 N. Dari hasil tersebut maka P_{ult} untuk *sandwich* D didapatkan nilainya sebesar 336343,767 N.

Tabel 4.2 Nilai P_{ult} hasil pengujian *buckling*

Nama <i>Sandwich</i>	<i>Filler</i>	Persentase <i>filler</i>	P_{ult} [N]
<i>Sandwich A</i>	Cangkang kerang	20%	161154,952
<i>Sandwich B</i>	Cangkang kerang	30%	164573,398
<i>Sandwich C</i>	Cangkang telur	20%	323734,400
<i>Sandwich D</i>	Cangkang telur	30%	336343,767

Tabel 4.2 menunjukkan nilai P_{ult} rata-rata dari masing-masing variasi yang merupakan hasil pengujian *buckling* yang telah dilakukan.

Perbandingan nilai P_{ult} berdasarkan persentasenya untuk tiap jenis *filler* dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan nilai beban kritis *sandwich material*

Dari Gambar 4.9, dapat dilihat bahwa secara umum persentase *filler* pada *sandwich material* meningkatkan keuletan dan kekuatan *buckling* dari *sandwich material*. *Sandwich B* dengan persentase *filler* 30% memiliki nilai P_{ult} 2,12% lebih tinggi dari *sandwich A* dengan persentase *filler* 20%. *Sandwich D* dengan persentase *filler* 30% memiliki nilai P_{ult} 3,89% lebih tinggi dari *sandwich C* dengan persentase *filler* 20%. Selain itu jika dibandingkan antara *filler* cangkang kerang pada *sandwich A* dan *B* dengan *filler* cangkang telur pada *sandwich C* dan *D* maka akan didapati bahwa *filler* cangkang telur dapat menambah keuletan *sandwich* dengan

lebih baik bila dibandingkan dengan cangkang kerang. Dari Tabel 4.2 dan gambar 4.9 didapatkan bahwa pada persentase *filler* yang sama, cangkang telur menghasilkan *sandwich material* yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan cangkang kerang. Untuk persentase *filler* 20%, nilai beban kritis untuk *sandwich C* dengan *filler* cangkang telur lebih tinggi 100% dibandingkan *sandwich A* dengan *filler* cangkang kerang. Sedangkan pada persentase 30%, *sandwich D* memiliki nilai beban kritis 104% lebih tinggi dari *sandwich B*.

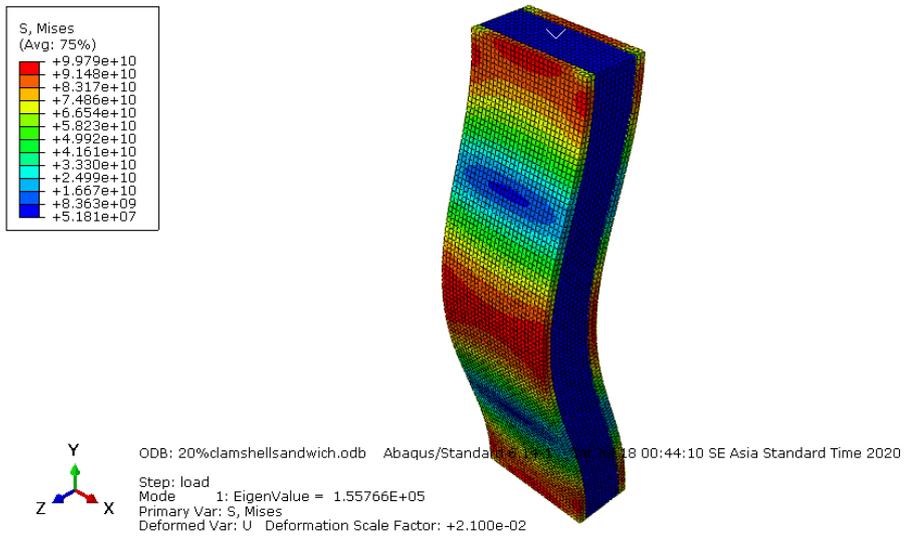
4.3. Pemodelan Numerik Pengujian *Buckling*

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak pemodelan elemen hingga digunakan pada penelitian ini untuk memvalidasi hasil dari pengujian eksperimen. Tahapan-tahapan dan kondisi yang diterapkan pada pemodelan ini mengacu pada kondisi sebenarnya pada saat pengujian eksperimen. Hal ini dilakukan agar hasil yang didapatkan dari proses pemodelan semakin mendekati hasil eksperimen dan memberikan gambaran yang valid tentang pengujian yang telah dilakukan.

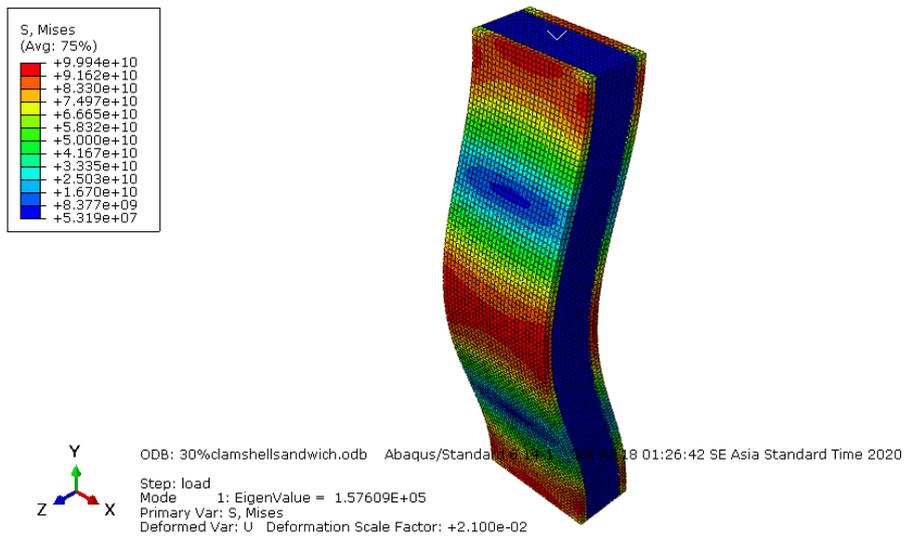
4.3.1. Hasil pemodelan Numerik

Proses pemodelan pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai sebuah model yang terdiri dari 3 material yang saling terikat pada permukaan masing-masing material yang mengalami kontak. Akibat keterikatan tersebut, maka masing-masing material akan saling mempengaruhi satu sama lain. Model tersebut mendapat beban yang arahnya menuju ke sumbu memanjang model. Pada salah satu ujung model ditumpu dengan tumpuan jepit tanpa derajat kebebasan. Demikian pula pada ujung lainnya juga ditumpu dengan tumpuan jepit, namun memiliki derajat kebebasan arah memanjang model. Sebagai akibat dari material penyusun model yang terikat satu sama lain, maka ketika beban bekerja pada model material-material penyusun model akan bereaksi menurut sifatnya masing-masing. Akan tetapi akibat saling terikat, maka reaksi dari masing-masing material akan saling mempengaruhi.

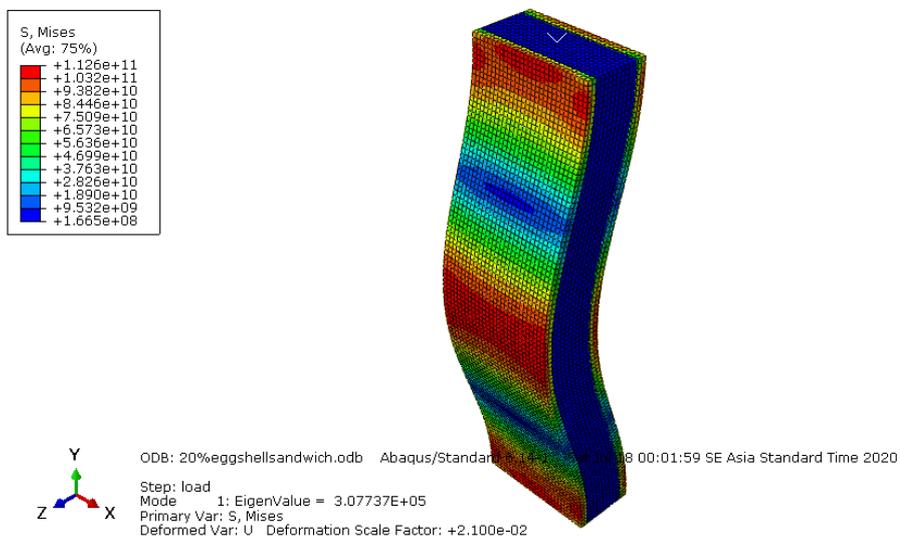
Hasil dari pemodelan numerik untuk masing-masing variasi *sandwich material* dapat dilihat pada Gambar 4.10 hingga Gambar 4.13.



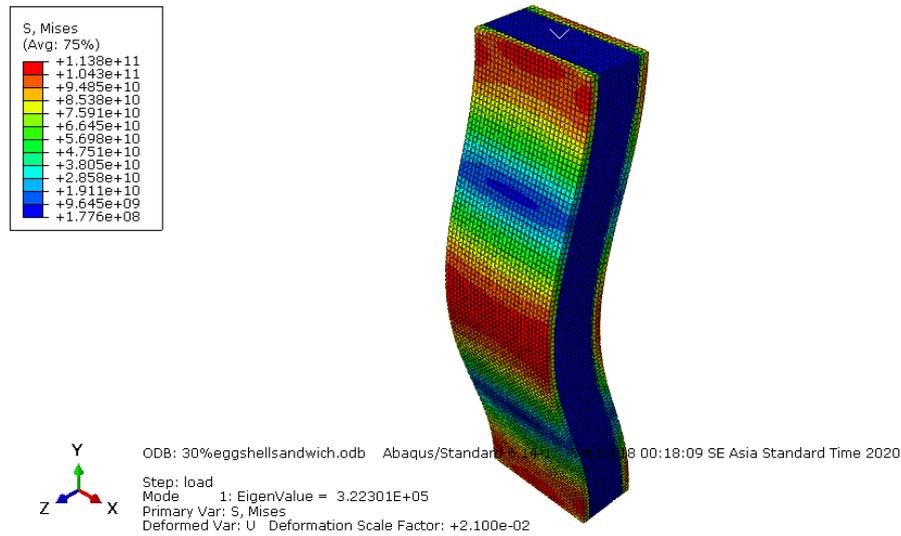
Gambar 4.10 Hasil pemodelan numerik *sandwich A*



Gambar 4.11 Hasil pemodelan numerik *sandwich B*



Gambar 4.12 Hasil pemodelan numerik *sandwich C*



Gambar 4.13 Hasil pemodelan numerik *sandwich D*

Berdasarkan pemodelan yang sudah dilakukan, didapatkan nilai beban *ultimate* P_{ult} untuk masing-masing *sandwich material* sebagaimana tampak dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai beban kritis P_{ult} *sandwich material* hasil pemodelan

Nama material	Beban <i>ultimate</i> P_{ult} [N]
<i>Sandwich A</i>	155766
<i>Sandwich B</i>	157609
<i>Sandwich C</i>	307737
<i>Sandwich D</i>	322301

Dari Tabel 4.3 dapat kita lihat bahwa variasi *sandwich material* nilai beban kritis P_{ult} yang paling besar adalah *sandwich D* sedangkan yang terkecil adalah *sandwich A*. Berdasarkan material *filler* yang digunakan, secara umum dapat dikatakan bahwa *sandwich material* dengan *filler* cangkang telur memiliki nilai beban kritis yang lebih besar dibandingkan dengan *sandwich material* yang menggunakan *filler* cangkang kerang. Demikian juga jika dibandingkan persentasenya, *sandwich material* yang menggunakan persentase *filler* 30% (*sandwich B* dan *D*) memiliki nilai beban kritis P_{ult} yang lebih besar dari *filler* 20% (*sandwich A* dan *C*).

4.4. Perbandingan Hasil Pengujian Eksperimen dan Pemodelan Numerik

Prinsip dasar dari sebuah material yang mengalami kegagalan *buckling* adalah beban yang bekerja pada material tersebut melebihi beban kritis atau beban yang mampu ditahan oleh material. Beban kritis adalah beban terbesar yang tidak membuat benda yang mendapat beban

tersebut mengalami defleksi lateral. Besarnya nilai beban kritis yang mampu ditahan material berkaitan secara langsung dengan kondisi stabilitas dari benda. Jika besarnya beban yang bekerja pada sumbu aksial benda melebihi nilai beban kritis yang mampu ditahan oleh benda, maka benda tersebut akan mengalami defleksi lateral atau *buckling*.

Dalam penelitian ini data yang didapatkan dari pengujian eksperimen akan dibandingkan dengan data yang dihasilkan dari pemodelan numerik untuk mengetahui validitas data dari pengujian *buckling* yang telah dilakukan. Dari pengujian eksperimen dan pemodelan numerik yang telah dilakukan didapatkan nilai beban *ultimate* P_{ult} sebagaimana tampak dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai beban *ultimate* P_{ult} hasil eksperimen dan pemodelan

Nama material	Beban <i>ultimate</i> P_{ult} [N]		Deviasi [%]
	Eksperimen	Pemodelan	
<i>Sandwich A</i>	161154.952	155766	3.46
<i>Sandwich B</i>	164573.398	157609	4.42
<i>Sandwich C</i>	323734.400	307737	5.20
<i>Sandwich D</i>	336343.767	322301	4.35

Dari Tabel 4.4 diketahui perbedaan antara nilai P_{ult} yang didapatkan dari uji eksperimen dan pemodelan berkisar antara 3.5% hingga 5.2% sehingga dapat dikatakan bahwa data yang didapatkan dari uji eksperimen cukup representatif.

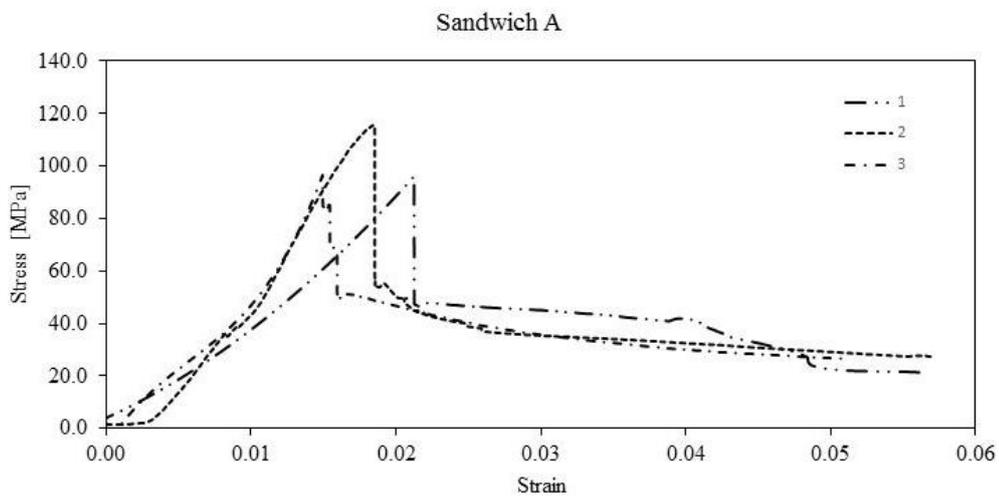
4.5. Penentuan *Yield Stress* dan Analisa *Yield Stress* dari *Sandwich material*

Setelah data hasil pengujian *buckling* didapatkan dan diubah ke dalam bentuk diagram *load* terhadap *displacement*, didapati bahwa titik *yield point* pada grafik *load-displacement* tidak tampak. Nilai *yield point* pada penelitian ini tidak terlihat dikarenakan tingkat keuletan material yang tergolong rendah bila dibandingkan material *ductile* lainnya. Karena itu, saat dilakukan pengujian *buckling*, *yield point* tidak tampak. Pada penelitian ini nilai *yield point* sangatlah penting, karena *yield point* tersebut nantinya akan digunakan untuk menghitung *acceptance criteria* berdasarkan *rules* dari LR.

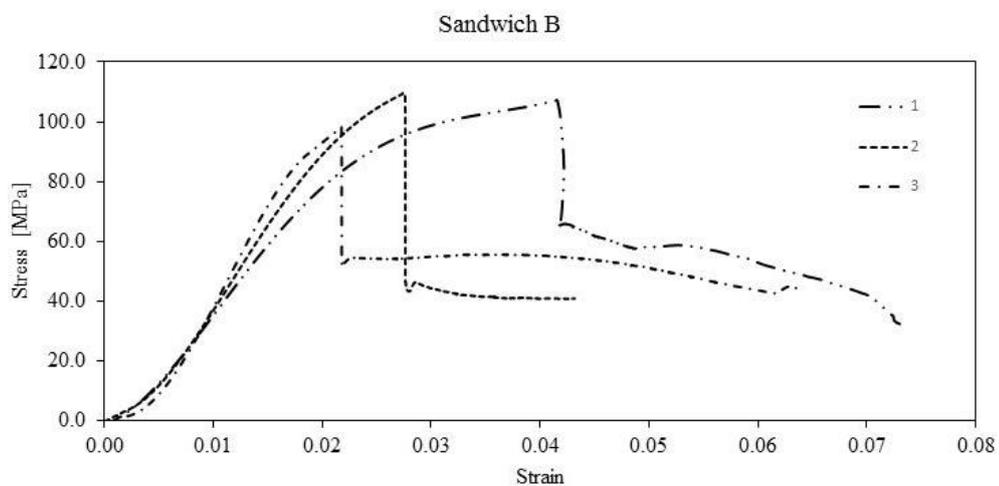
Karena bentuk grafik, maka untuk mendapatkan nilai *yield point* harus menggunakan metode garis ofset. Metode garis ofset dilakukan dengan menggambar garis yang sejajar dengan kurva *stress-strain* pada daerah linier. Garis ofset yang digambar berjarak 0,002 atau 0,2% dari

garis diagram *stress-strain*. Hasil perpotongan antara garis ofset dengan diagram *stress-strain* inilah yang disebut dengan titik *yield offset*.

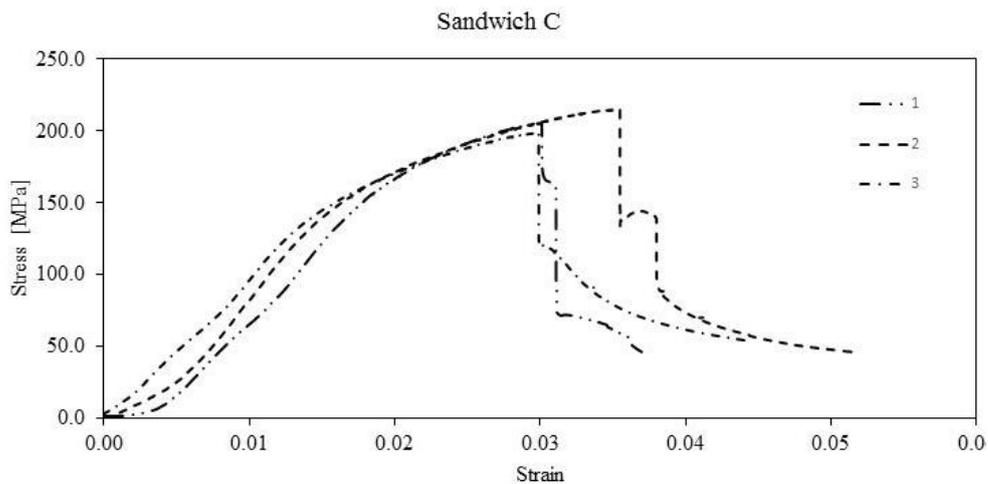
Langkah awal dalam metode untuk mendapatkan titik *yield offset* ini adalah mengonversi diagram *load-displacement* menjadi diagram *stress-strain*. Data *load* yang merupakan fungsi dari waktu diubah menjadi *stress* melalui persamaan 2.3. konversi ini dilakukan terhadap setiap data *load* yang menghasilkan data *stress* dengan fungsi waktu. Selain itu data *displacement* yang merupakan fungsi waktu juga diubah menjadi data *strain* melalui persamaan $\Delta l/l_0$, sehingga didapatkan nilai *strain* dengan fungsi waktu. Dengan melakukan konversi ini maka untuk masing-masing variasi *sandwich* didapatkan diagram *stress-strain* sebagaimana terlihat pada Gambar 4.14 sampai Gambar 4.17.



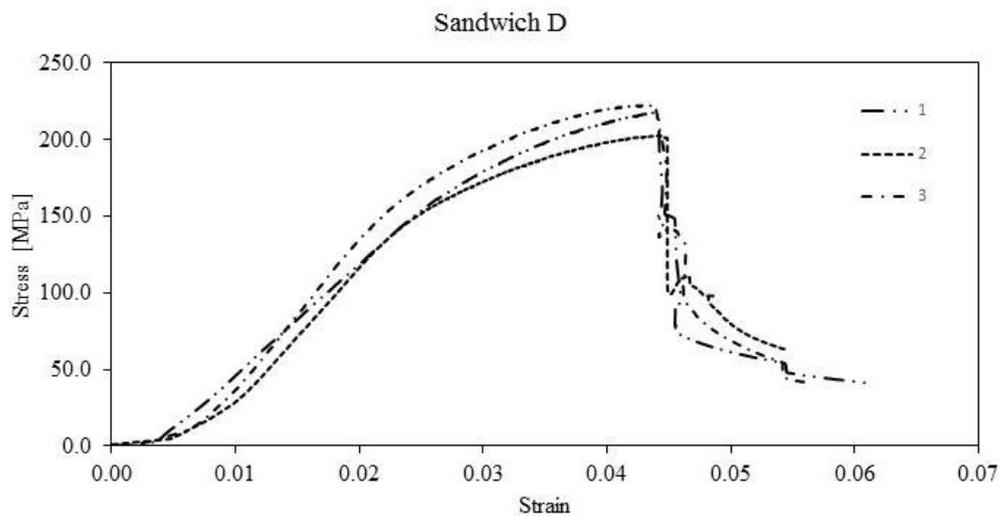
Gambar 4.14 Diagram *stress-strain* dari *sandwich A*



Gambar 4.15 Diagram *stress-strain* dari *sandwich B*

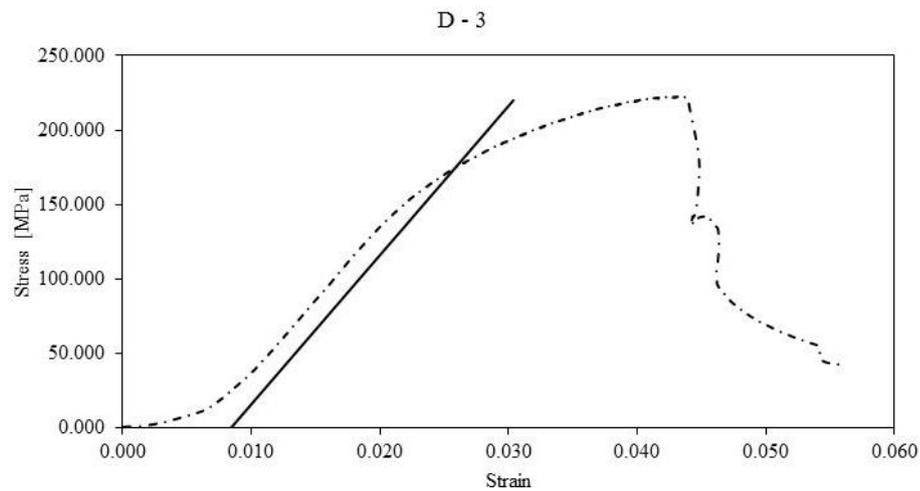


Gambar 4.16 Diagram *stress-strain* dari *sandwich C*



Gambar 4.17 Diagram *stress-strain* dari *sandwich D*

Setelah konversi diagram *load-displacement* menjadi diagram *stress-strain*, langkah selanjutnya adalah mencari nilai *yield* ofset dari material. Garis ofset dibuat dengan menggambar garis yang paralel dengan grafik *stress-strain* yang linier dengan jarak +0,002 dari grafik *stress-strain*. Langkah tersebut tampak sebagaimana Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Penggambaran garis ofset pada diagram *stress-strain*

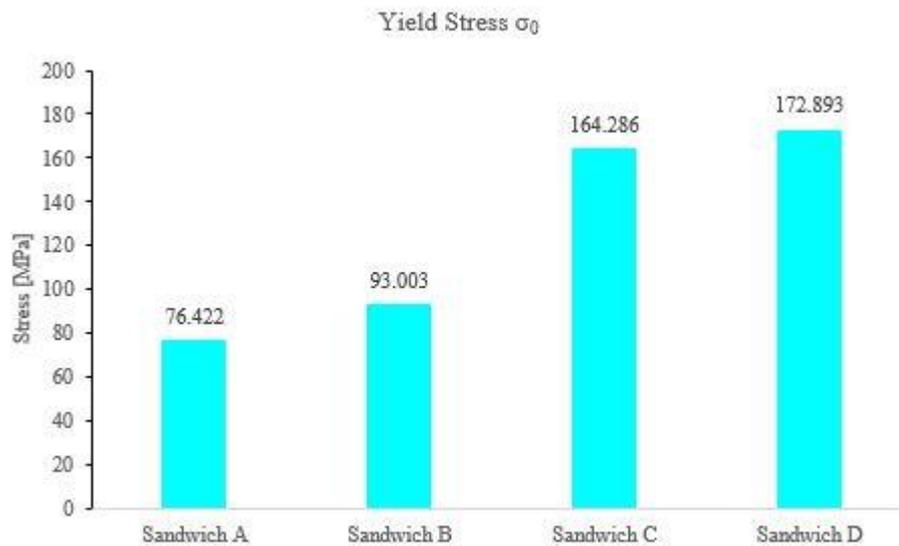
Dari langkah tersebut akan didapatkan nilai *yield* ofset untuk satu spesimen. Langkah tersebut diulangi untuk spesimen yang lainnya. Setelah nilai *yield point* ofset untuk semua material didapatkan, maka dihitung nilai *yield stress* rata-rata dari tiap variasi *sandwich material*. Selain rata-rata *yield stress* untuk tiap variasi, didapatkan juga nilai *critical buckling stress* rata-rata dari tiap variasi *sandwich material* sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai *yield stress* dan *critical buckling stress*

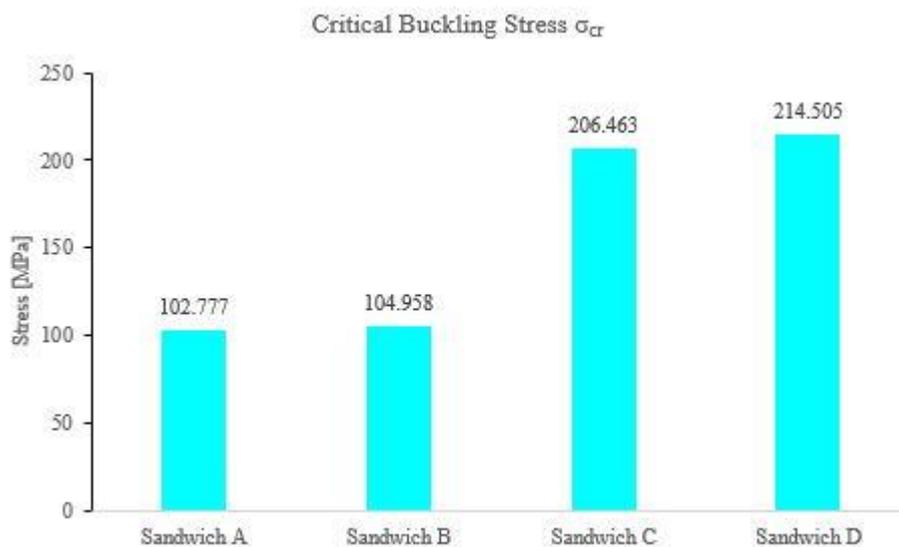
Nama <i>Sandwich</i>	Jenis <i>Filler</i>	Persentase <i>Filler</i>	σ_0 [MPa]	σ_{cr} [MPa]
<i>Sandwich A</i>	Cangkang kerang	20%	76,422	102,777
<i>Sandwich B</i>	Cangkang kerang	30%	93,003	104,958
<i>Sandwich C</i>	Cangkang telur	20%	164,286	206,463
<i>Sandwich D</i>	Cangkang telur	30%	172,893	214,505

Tabel 4.5 menunjukkan nilai *yield stress* yang didapatkan menggunakan metode garis ofset. Selain itu didapatkan pula nilai *critical buckling stress* yang dapat digunakan sebagai parameter perbandingan dalam menganalisa perbandingan masing-masing variasi *sandwich material* yang diteliti.

Perbandingan nilai *yield stress* dan *critical buckling stress* untuk masing-masing variasi *sandwich material* dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20.



Gambar 4.19 Perbandingan nilai *yield stress* dari *sandwich material*



Gambar 4.20 Perbandingan nilai *critical buckling stress* dari *sandwich material*

Dari Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa pada setiap jenis *filler*, kenaikan persentase *filler* juga menyebabkan kenaikan nilai *yield stress* dan *critical buckling stress* pada *sandwich material*. Untuk *filler* cangkang kerang, *sandwich B* memiliki nilai *yield stress* 21,6% lebih tinggi dari *sandwich A*. Selain itu nilai *critical buckling stress* pada *sandwich B* juga lebih tinggi 2,12% dari *sandwich A*. Untuk *filler* cangkang telur, *sandwich D* memiliki nilai *yield stress* 5,24% lebih tinggi dari *sandwich C*. Nilai *critical buckling stress* pada *sandwich D* juga lebih tinggi 3,90% dibandingkan dengan *sandwich C*. Dengan melihat hasil dari tabel 4.3 diatas, diketahui pula bahwa untuk tiap persentase, *filler* cangkang telur lebih unggul dari cangkang kerang dengan keunggulan yang sangat signifikan. Dari fakta ini dapat disimpulkan bahwa persentase *filler* 30% menghasilkan *sandwich material* yang lebih baik dari *filler* 20%. Selain

itu dengan melihat parameter yang berupa nilai *yield stress* dan *critical buckling stress* maka dapat dinyatakan bahwa *filler* cangkang telur menghasilkan *sandwich material* yang lebih kuat secara struktural. Pada persentase 20%, nilai *yield stress* dan *critical buckling stress sandwich* C bernilai masing-masing 114% dan 100% lebih tinggi dari *sandwich* A. Sedangkan untuk persentase 30%, nilai *yield stress* dan *critical buckling stress sandwich* D bernilai masing-masing 85,9% dan 104% lebih tinggi dibanding *sandwich* B.

4.6. Penghitungan *Acceptance criteria Sandwich material*

Setelah nilai *yield stress* didapatkan maka dilakukan perhitungan *acceptance criteria* terhadap semua varian *sandwich material*. Perhitungan *acceptance criteria* dilakukan berdasarkan kriteria yang telah ditentukan oleh LR dalam *Posisional Rules For For The Application Of Sandwich Panel Construction To Ship Structure* sebagaimana telah dijelaskan pada bab 3. Dalam *rule* tersebut, untuk setiap material yang akan digunakan pada struktur kapal harus memenuhi *requirement* yang telah ditentukan. Demikian halnya dengan pengujian *buckling* pada penelitian ini. *Sandwich material* dalam penelitian ini yang nantinya direncanakan akan diaplikasikan pada struktur geladak kapal yang disimulasikan juga harus memenuhi *buckling requirement* yang ditentukan yaitu rasio σ_c/σ_d yang nilainya harus lebih dari atau sama dengan 1,1. Selain itu pada *rule* tersebut juga ditentukan pada area mana *sandwich material* akan diaplikasikan. Pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan *buckling requirement* untuk aplikasi *sandwich material* pada seluruh geladak utama kapal. dengan demikian pada saat perhitungan *buckling requirement* akan dihitung aplikasi *sandwich material* pada bagian 0,4L *amidship* atau bagian tengah kapal dan bagian diluar 0,4L *amidship*. Bagian di luar 0,4L *amidship* yang dimaksud adalah bagian geladak di haluan dan di buritan beserta geladak akomodasi.

Dari perhitungan yang telah dilakukan didapatkan hasil untuk pengaplikasian *sandwich material* struktur geladak di *midship* sebagaimana tampak dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan *buckling requirement* dari *sandwich material* untuk aplikasi 0,4L *amidship*

Nama <i>Sandwich</i>	<i>Filler</i>	σ_d [MPa]	σ_c [MPa]	σ_c / σ_d	Status
<i>Sandwich A</i>	Kerang 20%	175	83,422	0,477	Unsatisfy
<i>Sandwich B</i>	Kerang 30%	175	89,872	0,514	Unsatisfy
<i>Sandwich C</i>	Telur 20%	175	144,153	0.824	Unsatisfy
<i>Sandwich D</i>	Telur 30%	175	151,496	0.866	Unsatisfy

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 bahwa semua material *sandwich* tidak memenuhi *buckling requirement* yang disyaratkan oleh LR. Hal ini dikarenakan nilai perbandingan *buckling stress* terhadap *design compressive stress* pada semua varian material *sandwich* tidak mencapai 1,1.

Sedangkan hasil perhitungan untuk aplikasi *sandwich material* pada struktur geladak diluar *midship* (bagian haluan dan buritan) didapatkan sebagaimana tampak dalam Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan *buckling requirement* dari *sandwich material* untuk aplikasi diluar 0,4L *amidship*

Nama <i>Sandwich</i>	<i>Filler</i>	σ_d [MPa]	σ_c [MPa]	σ_c / σ_d	Status
<i>Sandwich A</i>	Kerang 20%	75	75,422	1,005	Unsatisfy
<i>Sandwich B</i>	Kerang 30%	75	86,872	1,198	Satisfy
<i>Sandwich C</i>	Telur 20%	75	144,153	1,922	Satisfy
<i>Sandwich D</i>	Telur 30%	75	151,496	2,100	Satisfy

Dari Tabel 4.7 didapatkan bahwa hampir semua varian *sandwich material* yang diuji memenuhi *buckling requirement* yang disyaratkan oleh LR. Material *sandwich B, C, dan D* memenuhi *buckling requirement* sedangkan *sandwich A* tidak memenuhi persyaratan karena nilai rasio *buckling stress* terhadap *design compressive stress* yang tidak mencapai 1,1.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah:

1. Jenis material *filler* sangat berpengaruh pada kekuatan *buckling sandwich material*. Pada persentase *filler* yang sama, cangkang telur menghasilkan *sandwich material* yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan cangkang kerang. Untuk persentase *filler* 20%, nilai beban kritis, *yield stress* dan *critical buckling stress* untuk *sandwich C* dengan *filler* cangkang telur bernilai masing-masing 100%, 114% dan 100% lebih tinggi dibandingkan *sandwich A* dengan *filler* cangkang kerang. Sedangkan pada persentase 30%, *sandwich D* dengan *filler* cangkang telur memiliki nilai beban kritis, *yield stress* dan *critical buckling stress* masing-masing 104%, 85,9% dan 104% lebih tinggi dari *sandwich B* dengan *filler* cangkang kerang. Selain itu berdasarkan analisa grafik hasil pengujian, diketahui bahwa cangkang telur menghasilkan *sandwich material* yang lebih *ductile* dibandingkan cangkang kerang.
2. Persentase *filler* material memiliki pengaruh yang tidak terlalu signifikan terhadap kekuatan *buckling sandwich material*. Untuk jenis *filler* cangkang telur dengan persentase 30% memiliki nilai beban kritis, *yield stress*, dan *critical buckling stress* masing-masing sebesar 3,89%, 5,24%, dan 3,90% lebih tinggi jika dibandingkan dengan persentase *filler* 20%. Sedangkan pada *filler* cangkang kerang, persentase *filler* 30% menghasilkan *sandwich material* dengan nilai beban kritis, *yield stress* dan *critical buckling stress* masing-masing sebesar 2,12%, 21,6% dan 2,12% lebih tinggi dibandingkan persentase *filler* 20%.
3. Berdasarkan perhitungan *buckling* requirement yang ditetapkan oleh LR melalui *Provisional Rules for The Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure* didapatkan hasil bahwa pengaplikasian *sandwich material* pada geladak utama kapal dibagian 0,4L *amidship* tidak memenuhi syarat untuk seluruh varian *sandwich material*. Akan tetapi pengaplikasian *sandwich material* pada geladak kapal diluar 0,4L *amidship* memenuhi syarat untuk varian *sandwich* dengan *filler* cangkang kerang 20% dan *filler* cangkang telur 20% dan 30%

5.2. Saran

Guna perbaikan dan pertimbangan mengenai penelitian – penelitian selanjutnya, berikut memeberikan beberapa saran yang kiranya akan bermanfaat untuk penulis sendiri khususnya maupun pembaca pada umumnya. Saran tersebut adalah sebagai berikut:

1. Sebelum melakukan mengambil penelitian dengan menggunakan metode eksperimen, diharapkan telah mencoba melakukannya terlebih dahulu agar langsung memahami cara paling efektif dan efisien dalam melakukan eksperimen baik dalam proses pembuatan spesimen sampai proses pengujian.
2. Masih diperlukan berbagai penelitian mengenai *sandwich material* dengan mempergunakan material lain untuk menambah tingkat kompetitif dan referensi material.
3. Masih diperlukannya banyak penelitian mengenai *sandwich material* baik pada proses produksi yang efisien, maupun hal-hal lain untuk mendukung terwujudnya pengaplikasian *sandwich material* pada kapal lokal.
4. Pada penelitian selanjutnya, selain analisa linier disarankan juga dilakukan analisa non linier dan *Post-buckling* agar hasil penelitian lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, K. Z. (2017). Development of Sandwich Panel with Core from Clamshell Powder for Ship Structure. *SENTA 2017 International Confrence on Marine Technology*. SENTA.
- Allen, H. (1969). *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. Oxford: Pergamon Press.
- AquaMaps. (2019, January 21). *Computer Generated Species Distribution Map*. Retrieved from Aquamaps.org: https://www.aquamaps.org/receive.php?type_of_map=regular
- ASTM. (1999). *Standard Testing Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*. Pennsylvania: ASTM.
- Baidowi, A. U. (2015). Penggunaan Sandwich Panel System (SPS) pada Konstruksi Inner Bottom. *KAPAL Vol. 12(2)*, 60-68.
- BPS. (2020). *Produksi Telur Ayam Petelur Menurut Provinsi*. Jakarta: Badan Pusat Statitik.
- Brooking, M. K. (2004). The Performance, Safety, and Production benefits of SPS Structures for Double Hull Tankers. *The RINA Confrence on Double Hull Tankers*, (pp. 1-2). London.
- Brown, K. J. (2020, January 21). *9 Unexpected Eggshell Uses for Your Kitchen, Garden and More*. Retrieved from <https://www.wellandgood.com/https://www.wellandgood.com/eggshell-uses/>
- Callister, W. (2006). *Materials Science and Engineering; An Introduction*. New Jersey: Wiley Publishing.
- Composites, H. (2000). *Honeycomb Sandwich Design Technology*. Duxford: Hexel Composites.
- DIAB. (2015). *Sandwich Composites and Core Materials*. Laholm: DIAB Group.
- FAO. (2014). *Species Fact Sheet Anadara granosa (linnaeus 1758)*. FAO.
- Group, W. R. (2019, January 21). *Ultralight cellular material*. Retrieved from [www.virginia.edu: https://www2.virginia.edu/ms/research/wadley/cellular-materials.html](http://www.virginia.edu/https://www2.virginia.edu/ms/research/wadley/cellular-materials.html)
- Hexweb. (2019, desember 15). *Honeycomb Sandwich Design Technology*. Retrieved from [www.hexcel.com: https://www.hexcel.com/](https://www.hexcel.com/)
- ISO. (2007). *ISO 8501-1:2007 The Rust Grade Book*. ISO.
- Jones, R. M. (2006). *Buckling of Bars, Plates and Shells*. Virginia: Bull Ridge Publishing.
- Lloyd's Register. (2015). *Provisional Rules for The Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure*. London: Lloyd's Register Group Limited.
- Logan, D. L. (2007). *A First Course in The Finite Element Method*. Toronto: Thomson Canada Limited.
- Mahshuri, Y. A. (2014). Hardness and Compressive Properties of Calcium Carbonate Derived from Clamshell Filled Unsaturated Polyester Composites. *Materials Research Innovations Vol. 18*, 291-294.
- Momcilovic, M. &. (2009). Estimation of Ship Lightweight Reduction by Means of Application of Sandwich Plate System. *FME Transaction 37*, 123-128.
- Mula, I. Z. (2017). Properties of Sandwich Panel Core from Clamshell Powder for Ship Structure. *SENTA 2017 International Confrence on Marine Technology*. Surabaya: SENTA.
- Paik J.K., T. A. (1999). The Strength Characteristics of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels. *Thin-Walled Structures*, 2015-231.

- Purwoko, M. B. (2017). Study on Wood Sawdust for Core Material of Ship Structure. *SENTA 2017 International Confrence on Marine Technology*. Surabaya: SENTA.
- Ramakrishnan, K. &. (2016). Application of Sandwich Plate System for Ship Structures. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 83-90.
- Rivera, E. A.-E. (1999). Synthesis of Hydroxyapatite from Eggshells. *Materials Letters*, 128-134.
- S.B. Hassan, V. A. (2012). Development of Polyester/Eggshell Particulate Composites. *Tribology in Industry*, 217-225.
- SAND.core. (2016). *Best Practice Guide for Sandwich Structures on Marine Applications*. University of Newcastle upon Tyne.
- satujutaidea. (2019, Januari 21). *Projek Kebun Kerang Selangor*. Retrieved from satujutaidea.blogspot.com: <http://satujutaidea.blogspot.com/2016/06/projek-kebun-kerang-selangor.html>
- Toro, P. Q.-P. (2007). Eggshell, a new bio-filler for propylene composites. *Materials Letters*, 4347-4350.
- Wirakusumah, F. F. (2011). *Obstetri Fisiologi*. Jakarta: Buku Kedokteran EGC.
- Yudiono, B. A. (2017). Tests on Sandwich Plate Core Materials with Rice Husk Filler for Ship Deck Structure. *SENTA 2017- International Confrence on Marine Technology*. Surabaya: SENTA.
- Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. Warley: Engineering Materials Advisory Services.

LAMPIRAN

Lampiran A Perhitungan ketebalan *sandwich material*

Lampiran B Hasil pengujian *buckling* dari *sandwich material*

Lampiran C Hasil Pemodelan Numerik

Lampiran D Perhitungan *buckling requirement* dari *sandwich material*

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN KETEBALAN SANDWICH MATERIAL



LAMPIRAN
KALKULASI KETEBALAN PANEL SANDWICH

Nama Kapal : **TOL LAUT NUSANTARA**
 Type Kapal : **CONTAINER 100 TEUS**
 Sistem Konstruksi : **MELINTANG**
 Kelas : **BKI**

I. KETEBALAN MINIMUM LAPISAN FACE PLATE

Ketebalan minimum dari rancangan panel sandwich, dihitung berdasarkan persamaan berikut ini, berdasarkan aturan yang ditetapkan oleh LR (2015).

Tabel A : Minimum thicknesses

Item	Minum thickness in mm	
	New construction	Overlay construction
t_{1MIN}	3,0	3,0
t_{2MIN}	3,0	50 % of the as-built thickness

The thickness of the core is not to be less than:

$$t_c = 15 \text{ mm}$$

Tabel B : Thickness allowance

Structure	t_{aR}	t_{a1}	t_{a2}
Bottom shell	1	0	1
Side shell	1	0	1
Inner bottom, hopper plating	2	1	1
Inner bottom, at crown of tank	3,5	1	2,5
Strength deck	3,5	2	0
Internal deck	0	0,0	0
Superstructure Deck	0	0,0	0
Watertight bulkheads	0	0,0	0
Deep tank bulkheads	2,5	0,0	2,5
Deep tank crown which is also a deck	3,5	1,0	2,50
Vahicle deck clear of tanks	2	2	0

Strength Indel R

$$R = 0,01 A_R \left[0,1 \frac{b^2}{d(t_1 + t_2)} + 11,7 \left(\frac{bt_c}{d^2} \right)^{1,3} \right] k P_{eq,R}$$

Dimana : $A_R = \left(\frac{a}{b} \right)^{0,56}$

$$P_{eq,R} = 0,0017 \frac{Z_{rule}}{l^2} \text{ in N/mm}^2$$

l = length of panel, in meters

Z_{rule} = equivalent section modulus, in cm^3 , see Ch 3, 4.4 Thickness of sandwich panel

t_c = selected core thickness, in mm

a, b, d = see Ch 1, 7.2 Symbols

t_1, t_2 = thicknesses of the top bottom plating, in mm, see Figure 3.4.2 Determination of top and bottom plate thickness and core thickness

k = see Pt 3, Ch 2, 1.2 Steel of the Rules for Ship

t_{rules}	=	10 mm	existing
t_c	=	20 mm	
t_{aR}	=	3,5 mm	
t_{a1}	=	2 mm	
t_{a2}	=	0 mm	
a	=	2400 mm	(length of the panel at longest edge, in mm)
b	=	1500 mm	(breadth of the panel at shortest edge, in mm)
t_1	=	3,95 mm	(Thickness of the top plate, in mm)
		4 mm	

$t_2 = 1,95 \text{ mm}$ (thickness of the bottom plate, in mm)

$A_R = \frac{2 \text{ mm}}{1,36}$

$P_{eq,R} = 1,36$

$P_{eq,R} = 0,01 \text{ N/mm}^2$

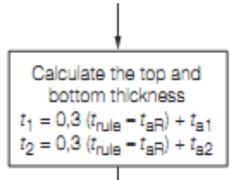
$Z_{Rules} = 417288$

$l = 240 \text{ mm}$

$d = 23 \text{ mm}$

$k = 1$

$R = 0,2895 \text{ oke}$



$$R = 0,01 A_R \left[0,1 \frac{b^2}{d (t_1 + t_2)} + 11,7 \left(\frac{bt_c}{a^2} \right)^{1,3} \right] k P_{eq,R}$$

a = length of the panel at longest edge, in mm

b = breadth of the panel at shortest edge, in mm

$d = 0,5(t_1 + t_2) + t_c$, in mm

t_1 = thickness of the top plate, in mm

t_2 = thickness of the bottom plate, in mm

t_{a1} = thickness allowance for the top plate, in mm

t_{a2} = thickness allowance for the bottom plate, in mm

t_c = thickness of the core, in mm

t rules	t _{aR}	t _{a1}	t _{a2}	Face plate	
				t1	t2
10	3,5	2	0	3,95	1,95

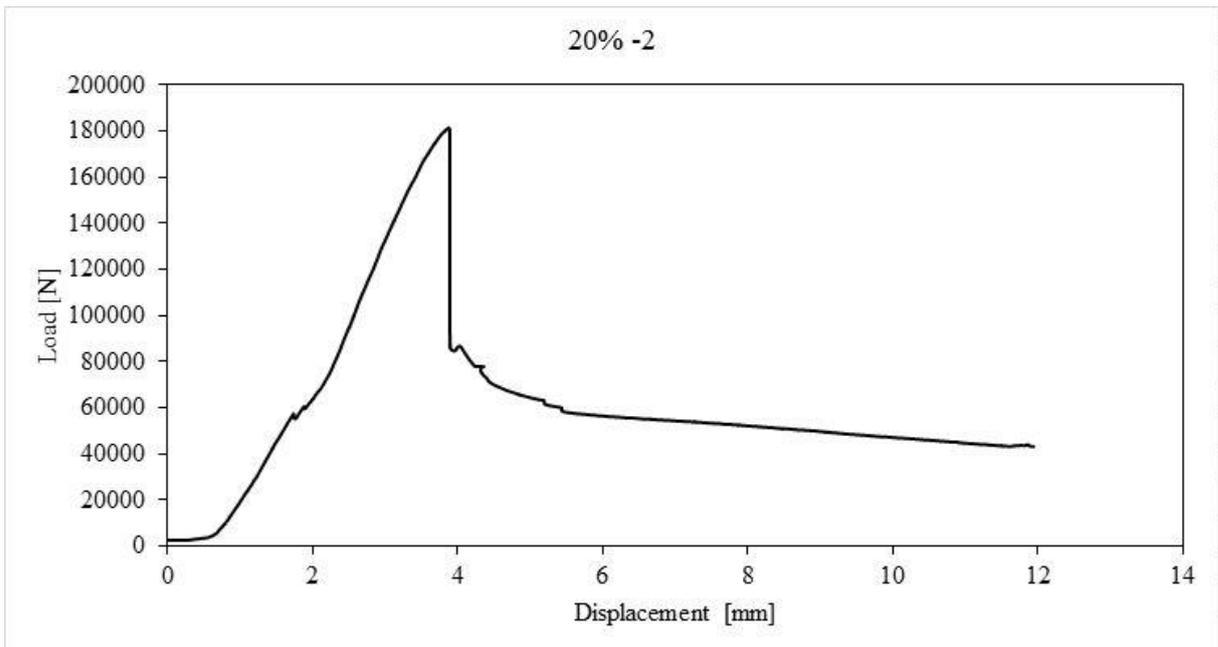
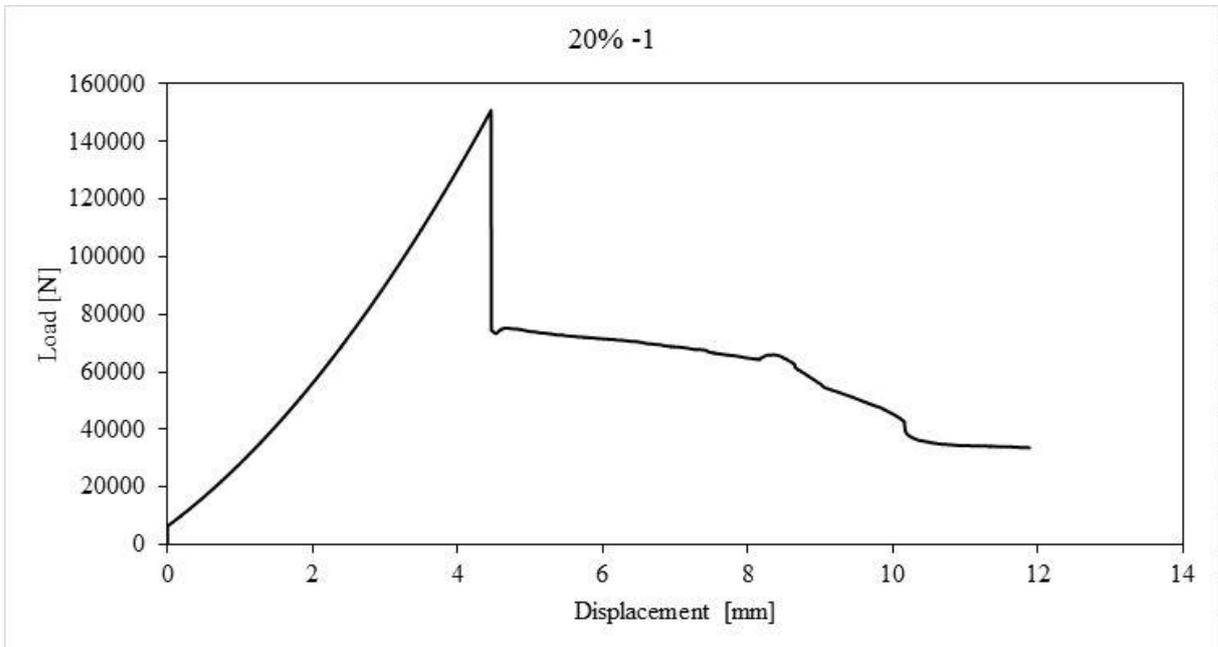
Pembulatan

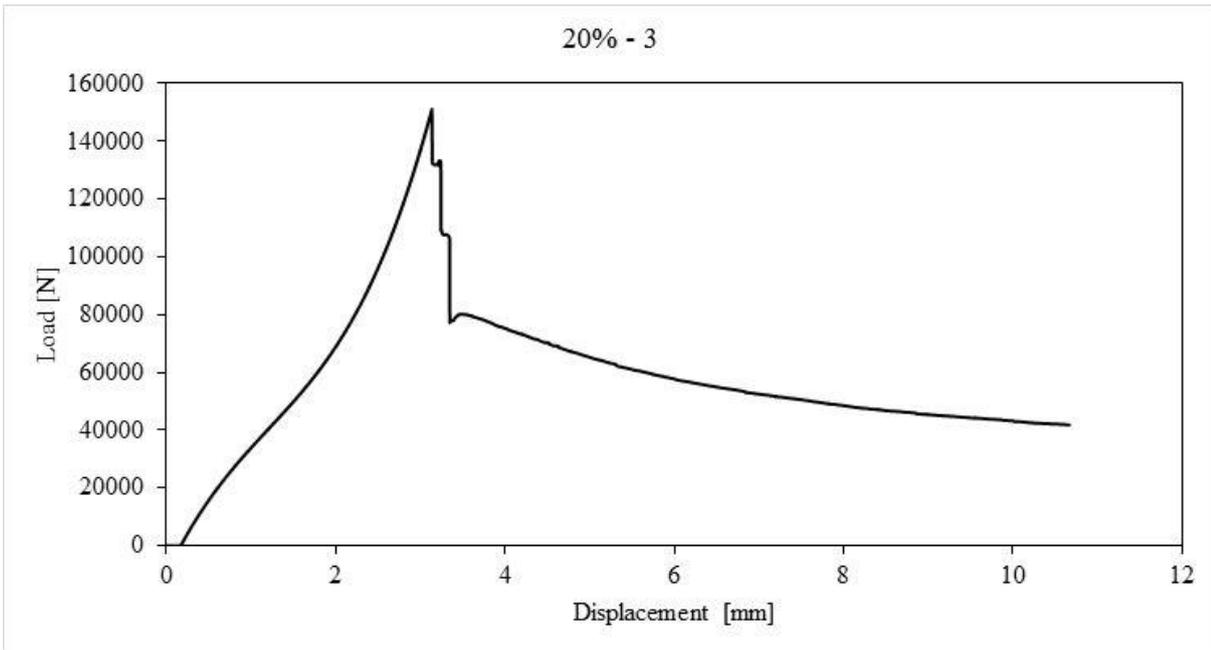
Nama bagian	t _c (mm)	a (mm)	b (mm)	A _R	Z _{rule}	l	P _{eqR} (Mpa)	Face Plate			d (mm)	R	R ≤ l
								t1	t2	k			
Deck	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	3	4	1	23,5	0,24	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke
	20	2400	1500	1,36	417288	240	0,01	4	4	1	24	0,21	oke

LAMPIRAN B
HASIL PENGUJIAN *BUCKLING* DARI SANDWICH
MATERIAL

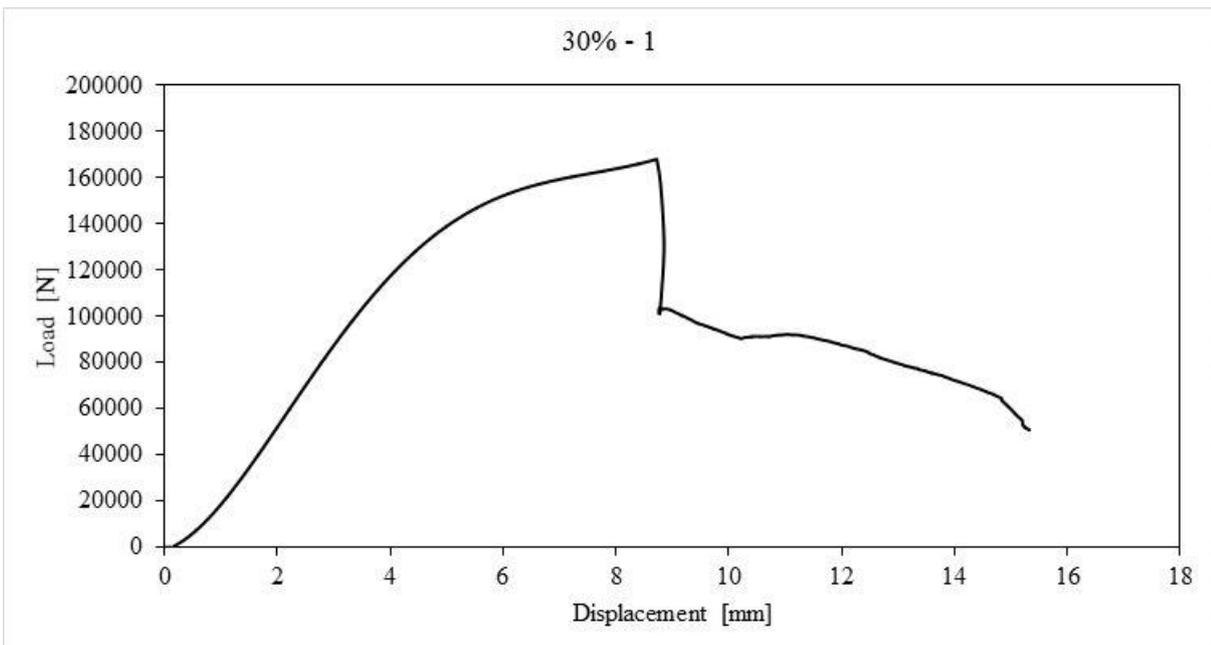
CANGKANG KERANG

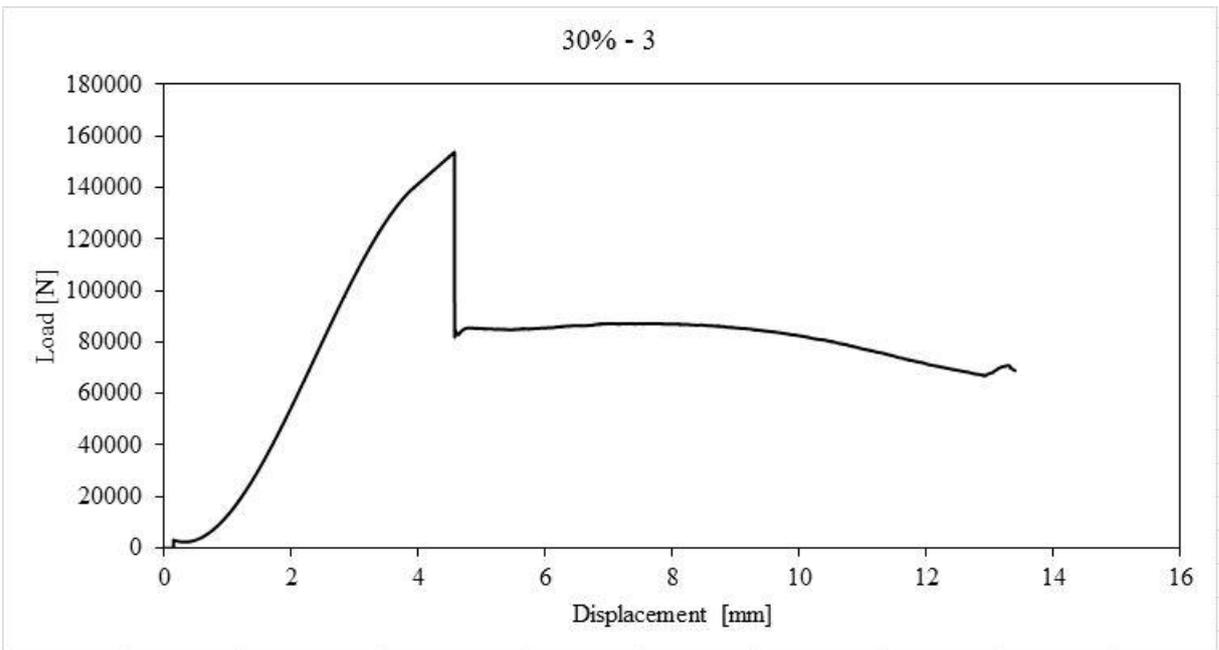
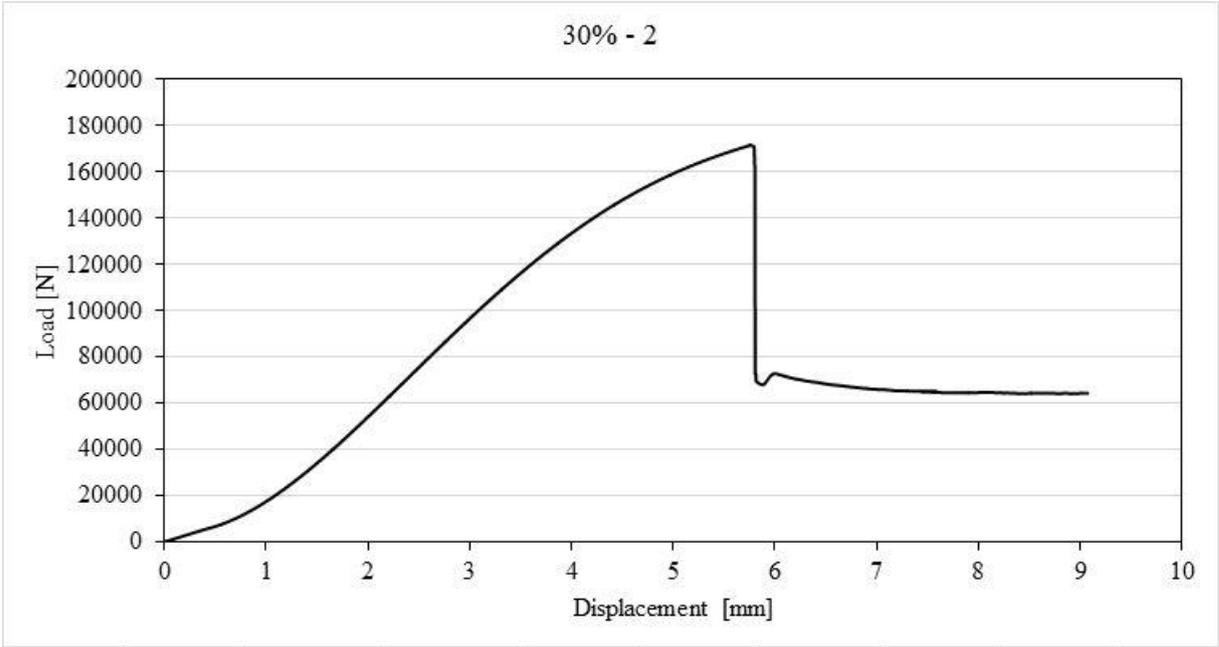
1. Cangkang Kerang 20%





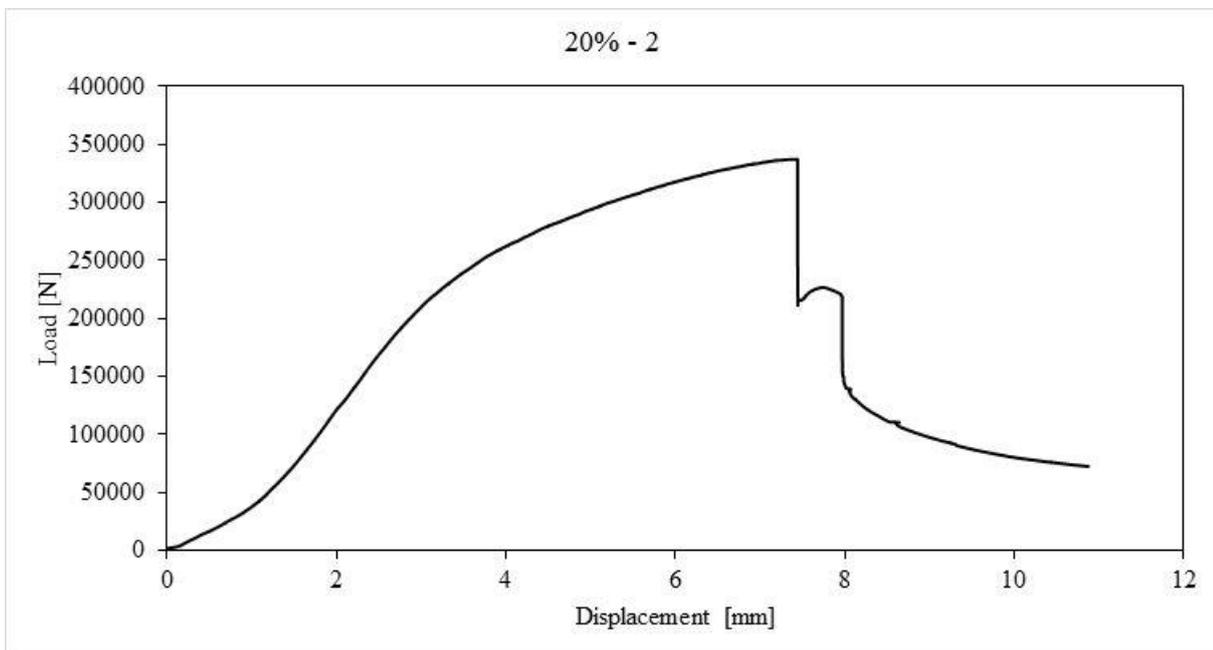
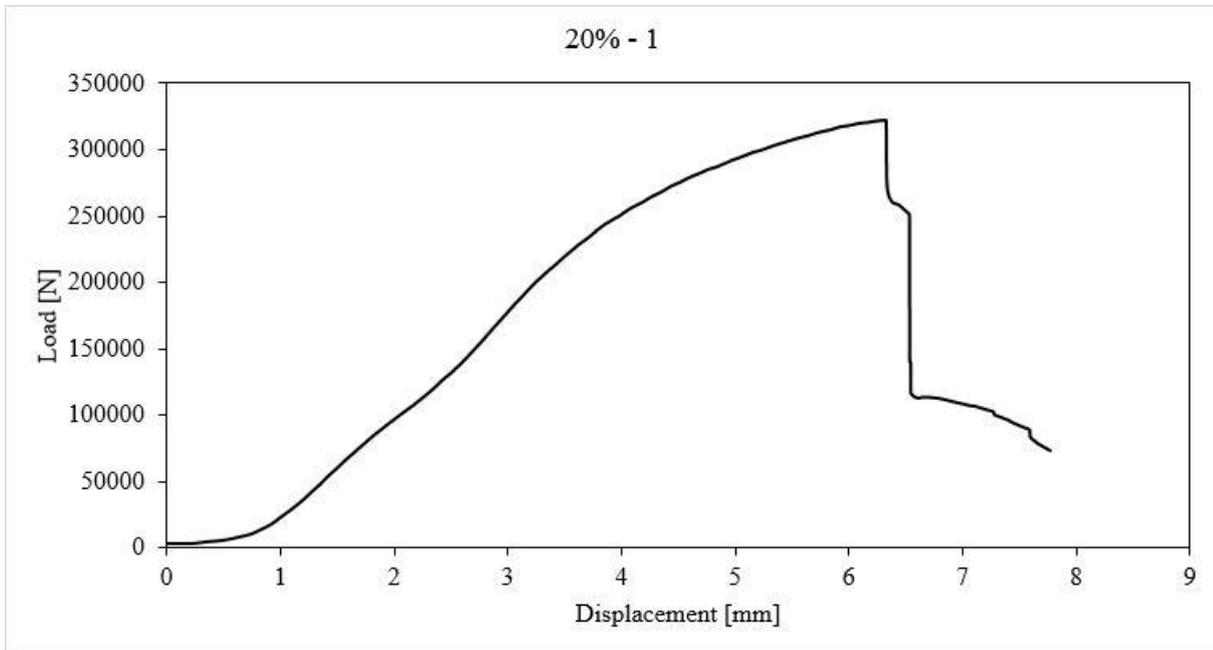
2. Cangkang Kerang 30%

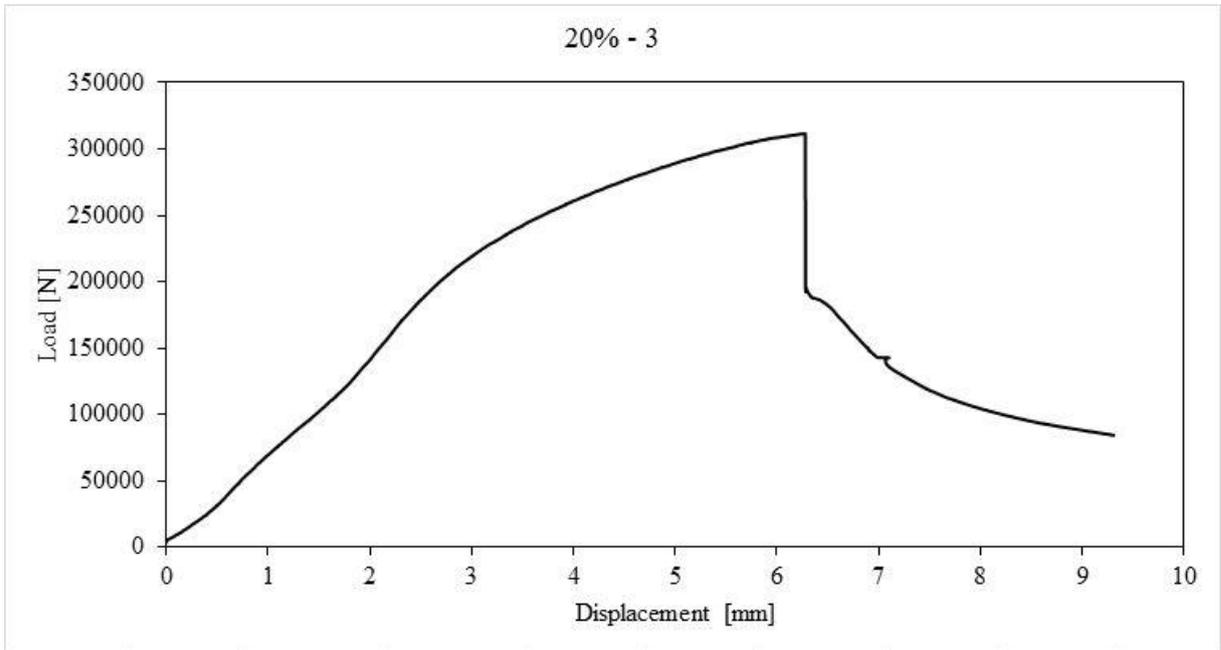




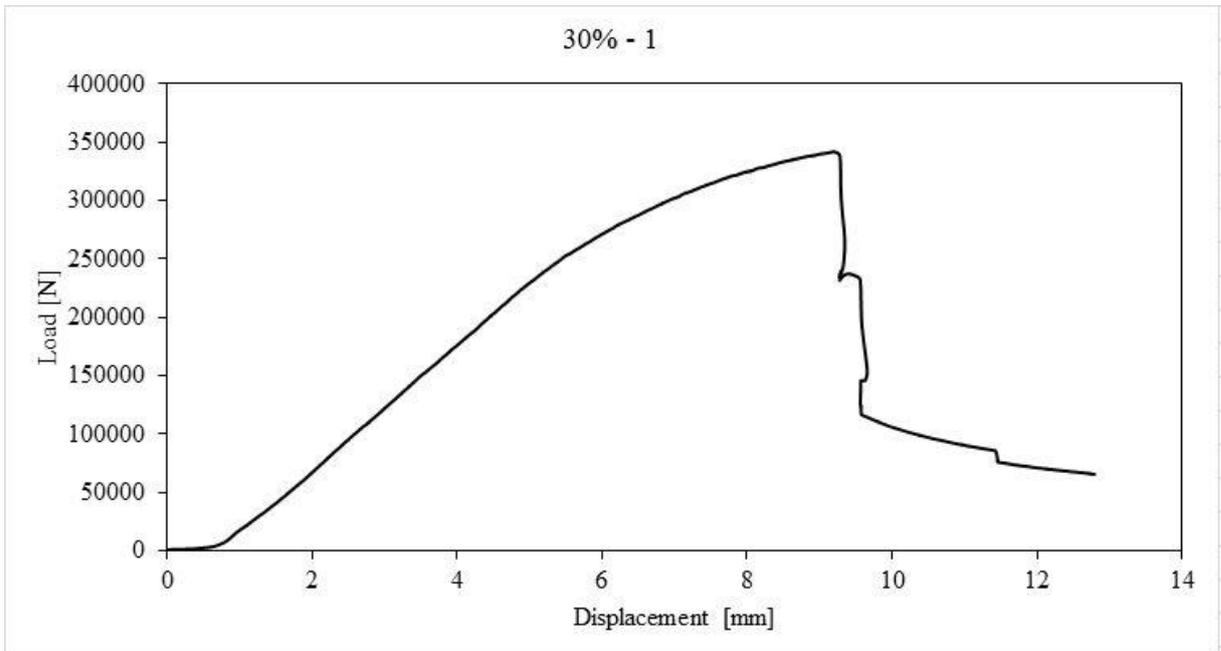
CANGKANG TELUR

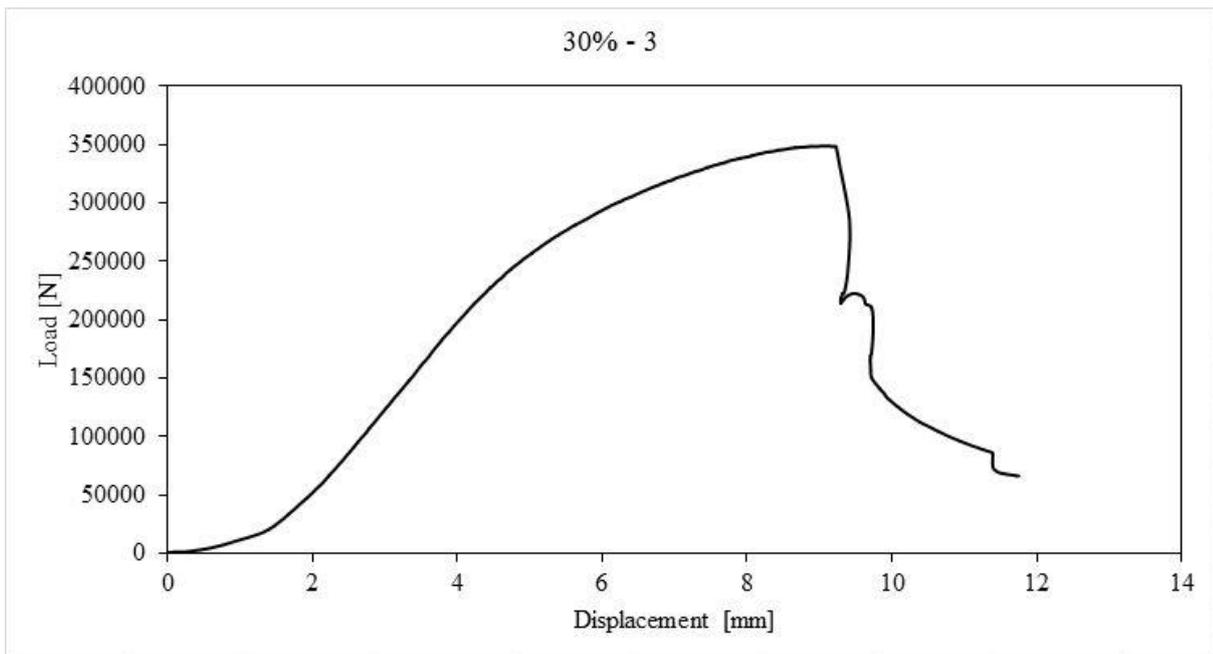
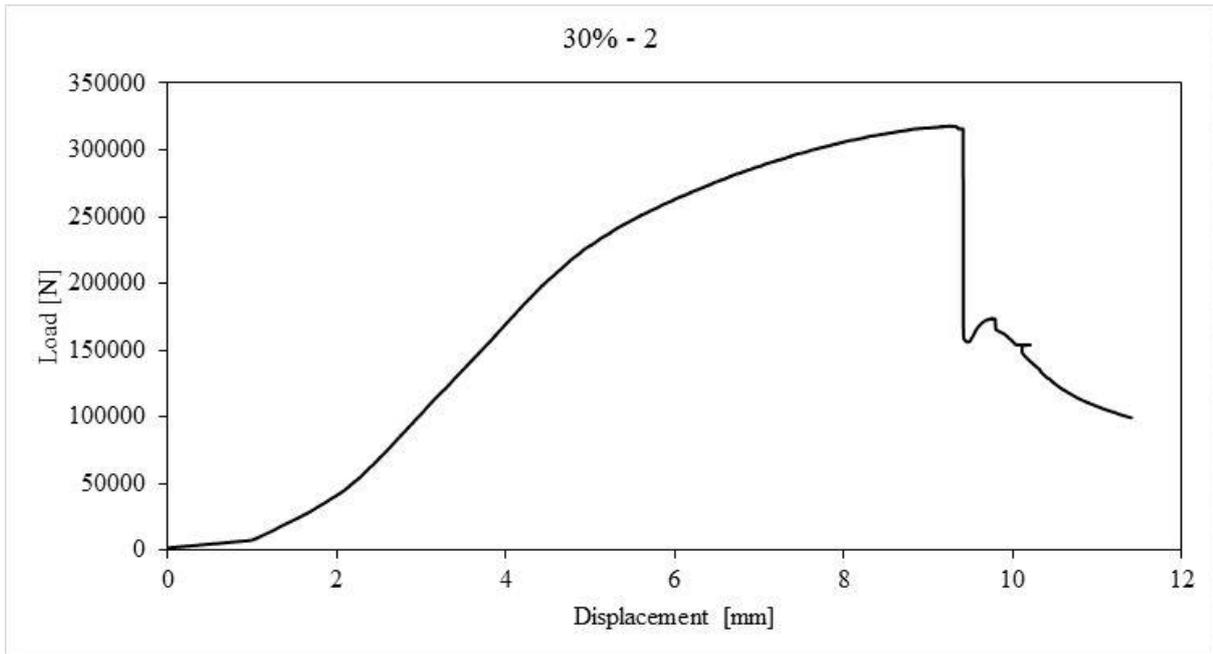
1. Cangkang Telur 20%





2. Cangkang Telur 30%

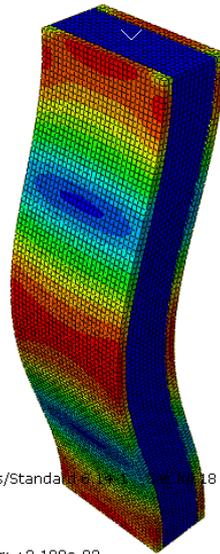
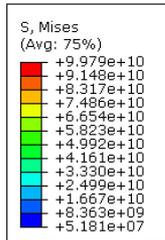




LAMPIRAN C
HASIL PEMODELAN NUMERIK

CANGKANG KERANG

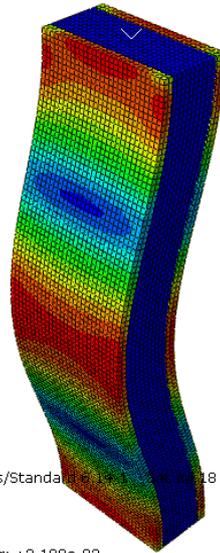
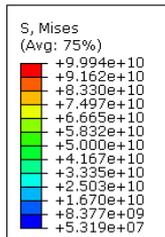
1. Cangkang Kerang 20%



ODB: 20%clamshellsandwich.odb Abaqus/Standard 18/01/2018 00:44:10 SE Asia Standard Time 2020

Step: load
Mode 1: EigenValue = 1.55766E+05
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.100e-02

2. Cangkang Kerang 30%

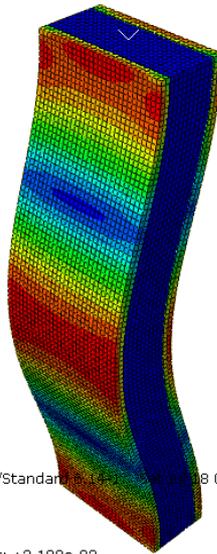
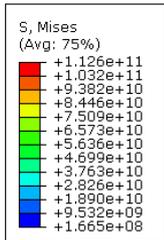


ODB: 30%clamshellsandwich.odb Abaqus/Standard 18/01/2018 01:26:42 SE Asia Standard Time 2020

Step: load
Mode 1: EigenValue = 1.57609E+05
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.100e-02

CANGKANG TELUR

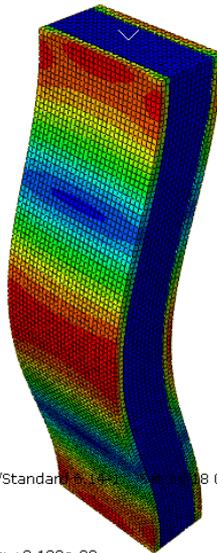
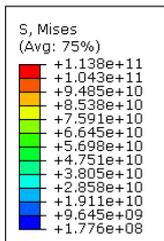
1. Cangkang Telur 20%



ODB: 20%eggshellsandwich.odb Abaqus/Standard 08/08/2020 00:01:59 SE Asia Standard Time 2020

Step: load
Mode 1: EigenValue = 3.07737E+05
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.100e-02

2. Cangkang Telur 30%



ODB: 30%eggshellsandwich.odb Abaqus/Standard 08/08/2020 00:18:09 SE Asia Standard Time 2020

Step: load
Mode 1: EigenValue = 3.22301E+05
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.100e-02

LAMPIRAN D
PERHITUNGAN *BUCKLING REQUIREMENT*

UNI-AXIAL COMPRESSIVE TEST SPECIMENT DIMENTIONAL CALCULATION

**Standar : LR Provisional Rules for The Application of
Sandwich Material to Ship Structures**

Referensi Perhitungan : Lloyd's Register

Perhitungan / Uraian

Buckling Requirements

**Obtain based on the Lloyds Register's Prvisional Rules For The Application of
Sandwich Panel Construction to Ship Structure**

Uni-axial compressive load = $\frac{\sigma_c}{\sigma_d} \geq 1,1$

σ_d = design compressive stress (to be taken as global hull girder bending stress σ)

σ_c = elastic critical buckling stress

$\sigma_c = \sigma_E$ if $\sigma_E \leq 0,5 \sigma_0$

$\sigma_c = \sigma_0 \times (1 - (\sigma_0/4\sigma_E))$ if $\sigma_E \geq 0,5 \sigma_0$

σ_0 = specified minimum yield stress of the material, in MPa

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \times D \times f}{l^2 \times (t_{p1} + t_{p2}) \times (1 - \nu^2)}$$

$f = \frac{4}{(1 + \mu)^2}$ if $\mu \leq 1,0$

$= 1 / \mu$ if $\mu \geq 1,0$

$$\mu = \frac{\pi^2 \times D}{(1 - \nu)^2 \times l^2 \times K}$$

$$K = \frac{G_c \times D^2}{t_c}$$

D = flexural rigidity of sandwich in N.mm

$$D = \frac{E_f \times t_1 \times t_2 \times d^2}{(t_1 + t_2)}$$

ν = poisson's ratio
= 0.3

$d = 0,5 \times (t_1 + t_2) + t_c$

t_1 = thickness of the top plate, in mm

t_2 = thickness of bottom plate, in mm

t_c = thickness of the core, in mm

G_c = minimum design shear modulus of core material, in N/mm²

l = breadth of panel in the loaded direction, in mm

E_f = modulus of elasticity of top and bottom plates, in N/mm²

= $2,06 \times 10^5$ for steel

$t_{pl} = t_1 - t_{corr}$

$$t_{p2} = t_2 - t_{corr}$$

t_{corr} = standard deduction of corrosion

σd = design compressive stress (to be taken as global hull girder bending stress σ)

$$\sigma d = \sigma$$

σ = permissible combined stress for hull bending, in MPa

$$\sigma = \frac{175}{kL} \text{ N/mm}^2 \quad \text{for 0.4L amidship}$$

$$\sigma = (75 + 543(d/L) - 699(d/L)^2) \times 1/kL \quad \text{N/mm}^2 \quad \text{for outside 0.4L amidship}$$

σ_0 = specified minimum yield stress of the material obtain from experiment, in MPa

σ_0	Material	
	Clamshell	Eggshell
20%	76.422	164.286
30%	93.003	172.893

t_1 = thickness of the top plate, in mm

$$t_1 = 4 \text{ mm}$$

t_2 = thickness of the bottom plate, in mm

$$t_2 = 4 \text{ mm}$$

t_c = thickness of the core, in mm

$$t_c = 20 \text{ mm}$$

$$tp_1 = t_1 - t_{corr}$$

$$tp_2 = t_2 - t_{corr}$$

t_{corr} = standard deduction for corrosion, in mm

Structure	d_1 mm	d_1 range mm min. - max.
(a) Compartments carrying dry bulk cargoes	—	—
(b) One side exposure to water ballast and/or liquid cargo.	Vertical surfaces and surfaces sloped at an angle greater than 25° to the horizontal line.	0.05t 0.5 - 1
(c) One side exposure to water ballast and/or liquid cargo.	Horizontal surfaces and surfaces sloped at an angle less than 25° to the horizontal line.	0.10t 2 - 3
(d) Two side exposure to water ballast and/or liquid cargo.	Vertical surfaces and surfaces sloped at an angle greater than 25° to the horizontal line.	
(e) Two side exposure to water ballast and/or liquid cargo.	Horizontal surfaces and surfaces sloped at an angle less than 25° to the horizontal line.	0.15t 2 - 4

NOTES
 1. The standard deduction d_1 is to be taken as appropriate and within the range given above.
 2. For direct calculation purposes, standard deductions will be specially considered.

$$t_{corr} = 0.10t \quad \text{with thickness range 2-3 mm}$$

$$= 0.10 \times 4$$

$t_{corr} = 0.4 \text{ mm}$ less than 2 mm, so the t_{corr} is using the minimum value of t_{corr} range

$$t_{corr} = 2 \text{ mm}$$

$$tp_1 = t_1 - t_{corr}$$

$$t_{p1} = 4 - 2$$

$$t_{p1} = 2 \quad \text{mm}$$

$$t_{p2} = t_2 - t_{\text{corr}}$$

$$t_{p2} = 4 - 2$$

$$t_{p2} = 2 \quad \text{mm}$$

$$d = 0.5 \times (t_1 + t_2) + t_c$$

$$= 0.5 \times (4 + 4) + 20$$

$$d = 24$$

E_f = modulus of elasticity of top and bottom plates, in N/mm^2

$$= 2.06 \times 10^5 \quad \text{for steel}$$

D = flexural rigidity of sandwich in Nmm

$$D = \frac{E_f \times t_1 \times t_2 \times d^2}{(t_1 + t_2)}$$

$$D = \frac{2.06 \times 10^5 \times 4 \times 4 \times 24^2}{(4 + 4)}$$

$$D = \frac{18984.96 \times 10^5}{8}$$

$$D = 2373.12 \times 10^5$$

G_c = minimum design shear modulus of core material, in N/mm^2

G	Material	
%	Clamshell	Eggshell
20%	119.984	100.298
30%	123.531	118.331

$$K = \frac{G_c \times d^2}{t_c}$$

$$K = \frac{119.984 \times (24)^2}{20}$$

$$K = 3455.550$$

K	Material	
%	Clamshell	Eggshell
20%	3455.550	2888.595
30%	3557.704	3407.940

$$\mu = \frac{\pi^2 \times D}{(1 - \nu)^2 \times l^2 \times K}$$

$$\mu = \frac{\pi^2 \times 237312000}{(1 - 0.3)^2 \times 2400^2 \times 3456}$$

$$\mu = 0.12931$$

μ	Material	
%	Clamshell	Eggshell
20%	0.129	0.155
30%	0.126	0.131

$$f = \frac{4}{(1 + \mu)^2} \quad \text{if } \mu \leq 1,0$$

$$= \frac{1}{\mu} \quad \text{if } \mu \geq 1,0$$

$$f = \frac{1}{\mu} \quad \text{because } \mu \text{ value for all variations } \geq 1,0$$

$$f = 4 / (1 + 0.129)^2$$

$$f = 3.13641$$

f	Material	
%	Clamshell	Eggshell
20%	3.136	3.000
30%	3.157	3.126

l = breadth of panel in the loaded direction, in mm

$$l = 2400 \text{ mm}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \times D \times f}{l^2 \times (tp_1 + tp_2) \times (1 - \nu^2)}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \times 2373.12 \times 10^5 \times 3.13640543}{2400^2 \times (2 + 2) \times (1 - 0.3^2)}$$

$$\sigma_E = 350.371 \text{ N/mm}^2$$

σ_E	Material	
%	Clamshell	Eggshell
20%	350.371	335.137
30%	352.686	349.252

from the result of σ_E calculation, it showed that the value of σ_E in all variation of material as well as material percentage is more than $0.5 \sigma_0$, hence the elastic critical buckling stress σ_c can be calculated as follows:

$$\sigma_c = \sigma_0 \times (1 - (\sigma_0 / 4\sigma_E)) \quad \text{if } \sigma_E \geq 0.5 \sigma_0$$

$$= 76.42182 \times (1 - (76.42182 / (4 \times 350.371)))$$

$$\sigma_c = 72.25459727$$

σ_c	Material	
%	Clamshell	Eggshell
20%	72.255	144.153
30%	86.872	151.496

$$\sigma_d = \sigma$$

$$\sigma = 175 / k_L \quad \text{for 0.4L amidship}$$

$$\sigma = (75 + 543(d/L) - 699(d/L)^2) \times (1/k_L) \quad \text{for outside 0.4L amidship}$$

d = distance from FP (for fore region) or distance from AP (for aft region)

$$d = 0 \quad \text{m} \quad (\text{the point taken right at the AP and FP of the ship})$$

$$L = 74.05 \quad \text{m}$$

k_L = higher tensile steel factor

$$k_L = 1.0 \quad \text{for mild steel}$$

for 0.4L amidship

$$\sigma = 175 / k_L$$

$$= 175 / 1.0$$

$$\sigma = 175 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_d = \sigma = 175 \quad \text{N/mm}^2$$

for outside 0.4L amidship

$$\sigma = (75 + 543(d/L) - 699(d/L)^2) \times (1/k_L)$$

$$= 75 + 543(0/74.05) - 699(0/74.05)^2 \times (1/(1.0))$$

$$\sigma = 75.00 \quad \text{N/mm}^2$$

LR buckling requirement = $\sigma_c / \sigma_d \geq 1.1$

for 0.4L amidship

for clamshell	for eggshell
$20\% = \sigma_c / \sigma_d$ $= 72.255 / 175$ $20\% = 0.41288$ REJECTED	$20\% = \sigma_c / \sigma_d$ $= 144.153 / 175$ $20\% = 0.82373$ REJECTED
$30\% = \sigma_c / \sigma_d$ $= 86.872 / 175$ $30\% = 0.49641$ REJECTED	$30\% = \sigma_c / \sigma_d$ $= 151.496 / 175$ $30\% = 0.86569$ REJECTED

for outside 0.4L amidship

for clamshell	for eggshell
$20\% = \sigma_c / \sigma_d$ $= 72.255 / 75$ $20\% = 0.96339$ REJECTED	$20\% = \sigma_c / \sigma_d$ $= 144.153 / 75$ $20\% = 1.92204$ ACCEPTED

$$\begin{aligned} 20\% &= \sigma_c / \sigma_d \\ &= 86.872 / 75 \end{aligned}$$

$$30\% = 1.15829$$

ACCEPTED

$$\begin{aligned} 30\% &= \sigma_c / \sigma_d \\ &= 151.496 / 75 \end{aligned}$$

$$30\% = 2.01995$$

ACCEPTED

BIODATA PENULIS



Pradicha qolub nauval, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Sukoharjo pada 9 Mei 1995 silam, Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada MI Muhammadiyah 05 Gempol Pading, SMP Muhammadiyah 06 Pucuk, dan SMA Muhammadiyah 1 Babat. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2012 melalui jalur SBMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Konstruksi dan Kekuatan Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi Ketua Bidang Pengkajian Ilmu Pengetahuan Ikatan Mahasiswa Muhammadiyah Sepuluh Nopember 2013, Ketua Umum IMM Sepuluh Nopember 2013-2015, dan Departemen Dana dan Usaha JMMI ITS 2014/2015

Email: pradicha12@mhs.na.its.ac.id/pradikanauval@gmail.com