

# Analisis Kekuatan *Transverse Corrugated Bulkhead* Kapal Tanker Akibat Beban *Buckling* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Faris Ardhiansyah Zahir, Achmad Zubaydi, Septia Hardy Sujatanti  
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: zubaydi@na.its.ac.id

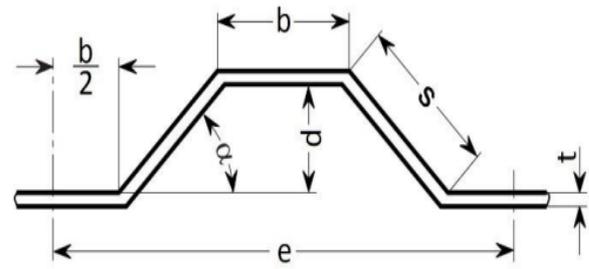
**Abstrak**—Sekat bergelombang kerap kali digunakan pada kapal tanker dan kapal *bulk carrier*. Penggunaan sekat bergelombang dapat mengurangi potensi terjadinya kontaminasi muatan cair karena lebih mudah dibersihkan dibanding dengan menggunakan sekat berpenegar. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis kekuatan sekat bergelombang akibat beban *buckling* yang diberikan secara aksial menggunakan metode elemen hingga. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui tegangan kritis dari masing-masing variasi model. Data sekat bergelombang diambil dari data konstruksi ruang muat kapal tanker 17500 LTDW dengan ukuran sudut lekukan  $64^\circ$  dan tebal pelat sekat sebesar 14 mm. Variasi sudut yang digunakan adalah  $65^\circ, 70^\circ$ , dan  $75^\circ$  dengan variasi ketebalan pelat 14 mm, 16 mm, dan 18 mm. Tegangan kritis terbesar terletak pada variasi model sekat bergelombang dengan sudut lekukan sebesar  $65^\circ$  dengan tebal pelat sekat 18 mm. Nilai tegangan kritis terbesar adalah 334.47 MPa. Berat konstruksi paling ringan terletak pada model sekat bergelombang existing dengan sudut lekukan sebesar  $64^\circ$  dan tebal pelat 14 mm yaitu sebesar 29.51 ton.

**Kata Kunci**—Sekat Bergelombang, Tegangan Kritis, Metode Elemen Hingga, Berat Konstruksi.

## I. PENDAHULUAN

PEMBAGIAN konstruksi kapal pada umumnya dibedakan menjadi 3 jenis yaitu sistem konstruksi melintang (*transverse framing system*), sistem konstruksi memanjang (*longitudinal framing system*), dan sistem konstruksi campuran (*mixed framing system*). Bagian dari konstruksi kapal adalah lunas (*keel*), dasar ganda (*double bottom*), gading-gading (*frame*), geladak (*deck*), dan sekat kedap air (*watertight bulkhead*). Terdapat dua jenis sekat yang kerap digunakan dalam konstruksi kapal yaitu sekat berpenegar dan sekat bergelombang (*corrugated bulkhead*). Sekat bergelombang biasa digunakan pada kapal tanker dan kapal *bulk carrier*. Kapal tanker adalah kapal yang dibangun atau disesuaikan terutama untuk mengangkut minyak dalam jumlah besar di ruang muatnya. Minyak tersebut dapat berupa minyak mentah, produk olahan, sludge dan sisa minyak [1].

Penggunaan sekat bergelombang dapat mengurangi potensi terjadinya kontaminasi muatan cair karena lebih mudah dibersihkan dibanding dengan menggunakan sekat berpenegar. Proses pembersihan ruang muat akan lebih sulit dengan sekat berpenegar karena terdapat bagian dari sekat yang tertutup oleh penegar sekat tersebut. Penggunaan sekat bergelombang juga memiliki beberapa kelebihan diantaranya berat konstruksi yang lebih ringan, permasalahan korosi yang lebih mudah diatasi, dan pemeliharaan yang mudah [2]. Sekat bergelombang memiliki kekuatan lebih besar dibanding dengan sekat berpenegar yang diidentifikasi dari faktor keamanannya.



Gambar 1. Elemen sekat bergelombang.

Penentuan dimensi dan scantling dalam konstruksi sekat bergelombang dibutuhkan untuk mencapai kriteria yang sesuai dengan regulasi yang berlaku. Oleh karena itu analisis pada sekat bergelombang perlu dilakukan untuk menentukan dimensi optimal pada sekat bergelombang terhadap fenomena *buckling* akibat beban aksial.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Sekat Bergelombang

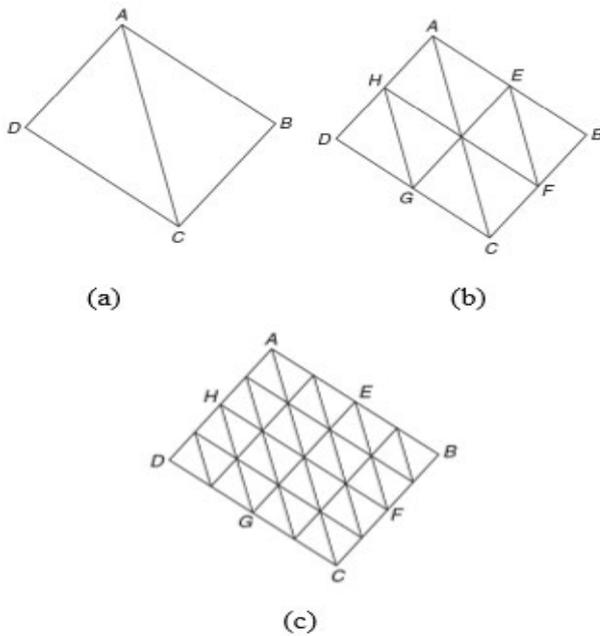
Sekat bergelombang (*corrugated bulkhead*) kerap digunakan sebagai sekat ruang muat beberapa jenis kapal agar memudahkan perawatan dan bongkar muat. Sekat bergelombang pada umumnya digunakan pada kapal *bulk carrier*, *product oil carrier*, dan *chemical tankers*. Sudut kemiringan minimum sekat bergelombang adalah  $45^\circ$  [2].

Sekat bergelombang dibuat menggunakan pelat paralel dan pelat miring yang menghubungkan dua pelat paralel. Pelat tersebut dapat menahan tekanan dari muatan fluida karena memiliki kekuatan yang sama. Sekat bergelombang dapat dibuat dari satu lembar pelat dengan cara ditekuk (*bending*) [3].

Sekat bergelombang pada umumnya terbagi menjadi dua pengelompokan berdasarkan arah lekukannya, yaitu sekat dengan lekukan vertikal (*vertically corrugated*) dan sekat dengan lekukan horizontal (*horizontally corrugated*). Sekat dengan lekukan vertikal dapat dipasang tanpa menggunakan konstruksi *upper stool*. Kedua macam jenis sekat tersebut dapat digunakan sebagai sekat melintang dan sekat memanjang [4].

### B. Modulus Penampang Sekat Bergelombang

Modulus penampang sekat bergelombang dihitung berdasarkan aturan Biro Klasifikasi Indonesia Volume II Tahun 2021 Section 11 B.4. Perhitungan modulus sekat dihitung menggunakan Persamaan (1). Elemen sekat bergelombang ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 3. Pengurangan ukuran mesh.

$$W = t \times d(b + s/3) \tag{1}$$

Diketahui:

- $W$  = modulus sekat ( $\text{cm}^3$ )
- $t$  = tebal pelat (cm)
- $d$  = jarak antara pelat hadap (cm)
- $b$  = lebar pelat hadap (cm)
- $s$  = lebar pelat bilah (cm)

C. Beban Aksial

Apabila sepasang gaya tekan aksial mendorong suatu batang, akibatnya batang ini cenderung untuk memperpendek atau menekan batang tersebut. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbuinya.

D. Kekuatan Buckling

*Buckling* digunakan sebagai istilah umum untuk menggambarkan kekuatan struktur, umumnya di bawah bidang tekan atau beban geser dan lateral. Kekuatan atau kapasitas *buckling* dapat memperhitungkan redistribusi internal beban tergantung pada situasi beban dan jenis struktur. Kapasitas *Buckling* berdasarkan prinsip ini memberikan perkiraan batas bawah atau beban maksimum yang dapat dipikul panel tanpa mengalami deformasi permanen. *Utilisation factor* atau rasio antara beban yang diterapkan dengan *ultimate capacity* merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam fenomena *buckling*, dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{act} = \frac{w_{act}}{w_u} = \frac{1}{\gamma_c} \tag{2}$$

Dimana:

- $w_{act}$  = tegangan total yang diberikan ( $\text{N/mm}^2$ )
- $w_u$  = kapasitas *buckling* total ( $\text{N/mm}^2$ )
- $\gamma_c$  = stress multiplier factor saat gagal

E. Eigen Value Buckling Analysis

*Eigenvalue* merupakan nilai karakteristik dari suatu matriks berukuran  $n \times n$ , sementara vektor *Eigen* adalah



Gambar 2. Model sekat bergelombang.

vektor kolom bukan nol yang bila dikalikan dengan suatu matriks berukuran  $n \times n$  akan menghasilkan vektor lain yang memiliki nilai kelipatan dari vektor *Eigen* itu sendiri. Pola pembebanan inkremental didefinisikan dalam langkah prediksi *buckling eigenvalue*. Besarnya beban ini tidak karena akan diskalakan oleh pengali beban yang diprediksi oleh analisis *buckling* dengan *eigenvalue*[5].

*Eigenvalue buckling* pada umumnya digunakan untuk memperkirakan critical buckling load pada struktur kaku. Struktur kaku menahan beban desainnya terutama dengan aksi aksial atau membran, bukan dengan aksi lentur. Critical buckling load dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{cr} = P^N + \lambda_i Q^N \tag{3}$$

Dimana:

- $P_{cr}$  = beban kritis (N)
- $P^N$  = pembebanan awal (N)
- $\lambda_i$  = *eigen value*
- $Q^N$  = beban *incremental* (N)

F. Finite Element Method

*Finite Element Method* (FEM) adalah prosedur numerik yang dapat digunakan untuk mendapatkan solusi dalam bidang engineering yang melibatkan analisis tegangan, perpindahan panas, elektromagnet, dan aliran fluida [6].

*Finite Element Method* digunakan untuk menganalisis masalah structural dan nonstructural. Pada umumnya digunakan untuk menganalisis tegangan, *buckling*, dan getaran. Adapun kelebihan dari metode elemen hingga adalah [7]:

1. Dapat menganalisis model dengan bentuk tidak beraturan dengan cukup mudah.
2. Mengaplikasikan pembebanan dengan mudah.
3. Dapat menganalisis model dengan material yang berbeda karena persamaan elemen dievaluasi secara individual.
4. Dapat mengaplikasikan berbagai macam kondisi batas pada model.
5. Ukuran elemen dapat diatur sedemikian rupa agar hasil analisis lebih mendekati nilai sebenarnya.
6. Dapat mengubah model elemen hingga dengan relatif mudah.
7. Dapat menganalisis pembebanan dinamik

Tabel 1.  
Variasi Model.

Variasi Model			
Model		Sudut (°)	Tebal Pelat (mm)
1	A	65	10
	B	65	12
	C	65	14
	D	65	16
	E	65	18
2	A	70	10
	B	70	12
	C	70	14
	D	70	16
	E	70	18
3	A	75	10
	B	75	12
	C	75	14
	D	75	16
	E	75	18

Tabel 2.  
Hasil Konvergensi Variasi Sekat Bergelombang Model 1C.

Konvergensi			
Meshing	Ukuran Sekat	Jumlah Elemen	Stress (Pa)
0.25	65°14mm	1922	30338.6
0.2	65°14mm	3198	70546.4
0.15	65°14mm	6188	70865.4
0.1	65°14mm	13272	103877
0.095	65°14mm	15272	97599.5
0.09	65°14mm	16095	99397.4
0.085	65°14mm	19065	113752
0.08	65°14mm	20972	122365
0.075	65°14mm	23625	122276

G. Pemodelan Sekat Bergelombang dan Simulasi Beban Buckling Menggunakan Finite Element Software

Proses pemodelan *Finite Element Software* dijalankan melalui sekelompok perintah yang dikumpulkan masing-masing dalam sejumlah modul, setiap modul berisi perintah dan alat yang melayani tugas-tugas tertentu dalam proses pemodelan. Terdapat 11 modul pada *Finite Element Software* yaitu, *Part Module, Property Module, Assembly Module, Step Module, Interaction Module, Load Module, Mesh Module, Optimization Module, Job Module, Visualization Module, dan Sketch Module*. Semua bagian yang disimulasikan dievaluasi terlebih dahulu untuk mengetahui apakah model akan mengalami deformasi yang signifikan atau dapat mengabaikan deformasi dan menganggapnya sebagai benda tegar.

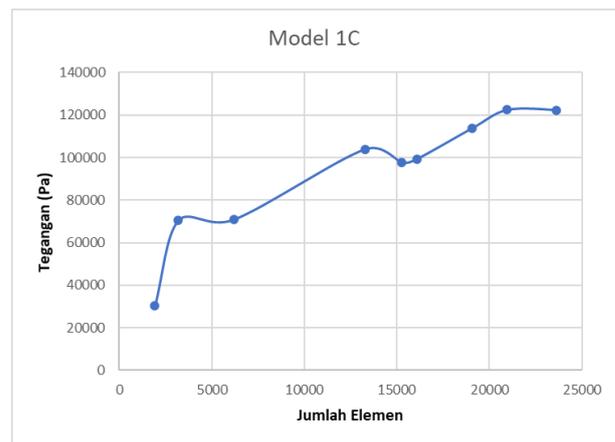
H. Material Konstruksi Sekat Bergelombang

Material yang digunakan dalam pemodelan sekat bergelombang adalah baja dengan grade A36. Baja jenis tersebut memiliki kuat tarik normal dan merupakan baja yang banyak digunakan pada konstruksi kapal. Baja ini memiliki spesifikasi material sebagai berikut:

- Massa jenis material = 7850 kg/m<sup>3</sup>;
- Modulus Young = 200 GPa atau 2 x 10<sup>11</sup> Pa;
- Rasio Poisson = 0.3;
- Yield Strength = 235 N/mm<sup>2</sup>

I. Konvergensi

Metode elemen hingga merupakan teknik numerik sehingga untuk mendapatkan hasil analisis mendekati nilai dari kondisi sebenarnya diperlukan pengaturan ukuran



Gambar 4. Grafik hasil konvergensi sekat bergelombang model 1C.

elemen. Hasil analisis akan berurutan seiring dengan berkurangnya ukuran elemen dan bertambahnya jumlah elemen [8]. Contoh pengurangan jumlah elemen dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 menunjukkan jumlah elemen sebanyak 2 buah (a), menunjukkan jumlah elemen sebanyak 8 buah (b), dan menunjukkan jumlah elemen sebanyak 32 buah (c). Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran elemen diikuti dengan jumlah elemen yang bertambah, sehingga hasil analisis akan mendekati hasil sesungguhnya karena perhitungan numerik akan semakin akurat.

III. METODOLOGI

A. Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data tidak dilakukan secara langsung, melainkan dari sumber lain yang dapat dipertanggungjawabkan sehingga data yang digunakan merupakan data sekunder. Data yang digunakan untuk analisis kekuatan sekat bergelombang merupakan data ukuran utama kapal, gambar rencana umum kapal, gambar pembagian blok untuk proses pembangunan kapal, dan gambar penampang melintang kapal.

B. Penentuan Variasi

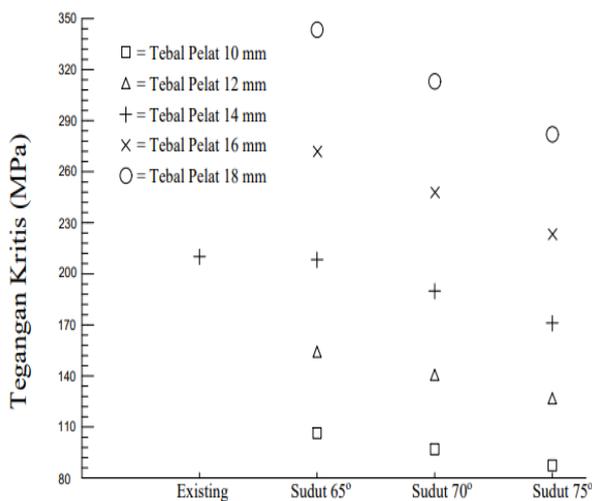
Dalam penelitian ini dibuat beberapa variasi pada sudut lekukan elemen dan tebal pelat sekat. Variasi dibuat 3 macam pada sudut lekukan elemen dan 5 variasi tebal pelat sekat sehingga menghasilkan 15 model variasi. Analisis dilakukan pada 15 model variasi dan 1 model sekat *existing*. Variasi dapat dilihat pada Tabel 1.

C. Pemodelan Sekat Bergelombang

Pembuatan model sekat bergelombang dilakukan menggunakan perangkat lunak *Finite Element Software*. Sekat bergelombang hanya dimodelkan lekukannya saja karena untuk konstruksi *lower stool* dan *upper stool* dianggap teteap. Hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3.

D. Konvergensi Meshing

Konvergensi dilakukan agar hasil analisis model mendekati nilai yang sebenarnya. Konvergensi dapat dilakukan dengan membandingkan hasil *running* tegangan pada model yang dianalisis. Simulasi dilakukan pada model untuk mendapatkan nilai tegangan dengan 9 ukuran *mesh*



Gambar 5. Tegangan kritis variasi model sekat bergelombang.

yang berbeda. Ukuran *mesh* yang digunakan dimulai dari 0.25 meter sampai 0.075 meter.

E. Analisa Hasil Running Model

Model yang telah melalui proses perhitungan komputasi pada tahap *module Job* akan memberikan hasil visualisasi maupun data dari pembebanan dan kondisi batas yang diberikan kepada model. Untuk mengetahui *critical buckling load* perlu mengalikan nilai *eigen* tiap mode dengan beban yang diberikan kepada model sekat bergelombang. Kemudian untuk mengetahui tegangan *buckling* dapat dilakukan pembagian dari *critical buckling load* dengan luas penampang model.

F. Perhitungan Berat Konstruksi Model Sekat Bergelombang

Berat konstruksi model sekat bergelombang didapatkan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dengan memilih **Module Property > Query Information > Mass Properties**.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Konvergensi Model

Analisis model pada penelitian ini menggunakan metode elemen hingga. Oleh karena itu perlu dilakukan konvergensi untuk menentukan ketelitian *software* analisis. Konvergensi dilakukan pada tiap variasi model dengan membandingkan hasil *running* dari tegangan akibat beban yang diberikan secara aksial. Ukuran meshing awal dimulai dari 0.25 m hingga ukuran terkecil. Konvergensi dilakukan hingga selisih dari tegangan model sekat bergelombang tidak melebihi 10%. Hasil dari konvergensi Model 1C dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan data Tabel 2 kemudian dibuat grafik untuk memudahkan melihat perubahan tegangan akibat ukuran *mesh* yang berbeda. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan data hasil *running* variasi sekat bergelombang Model 1C dapat diketahui bahwa pada ukuran *mesh* 0.075 dengan jumlah elemen sebanyak 23625 memiliki *margin error* sebesar 0.07%. Sehingga ukuran *mesh* yang digunakan sebesar 0.075.

Tabel 3. Tegangan Kritis Variasi Model.

Model	Beban Kritis (N)	Tegangan Kritis (MPa)
Existing	48974473.01	204.91
1A	17763620.08	103.70
1B	30665286.08	149.22
1C	48641635.92	202.84
1D	72519095.60	264.67
1E	103116499.10	334.47
2A	16660454.45	94.88
2B	28759663.85	136.50
2C	45616162.01	185.58
2D	68003667.48	242.09
2E	96687779.56	305.97
3A	15452144.16	85.32
3B	26673408.70	122.75
3C	42306052.95	166.89
3D	63066901.93	217.70
3E	89665130.36	275.13

B. Tegangan Kritis

Model *di-running* menggugurkan dua kasus pembebanan yaitu beban *ultimate* yang didapatkan dari *yield strength material* dibagi dengan luas penampang tiap variasi model. Kemudian beban yang lainnya adalah menggunakan nilai 1 karena perangkat lunak menentukan beban kritis dari tiap variasi model dengan nilai *eigen*. Proses simulasi variasi sekat bergelombang menghasilkan tegangan kritis dan *critical buckling load* pada tiap variasi model yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tegangan kritis terbesar pada tiap variasi model sekat bergelombang yang telah didapatkan dari perhitungan sebelumnya dibandingkan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh sudut lekukan dan tebal pelat. Perbandingan tegangan kritis dibuat dalam grafik pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa semakin besar sudut lekukan dan semakin kecil ketebalan pelat, maka tegangan kritis pada model akan menurun. Sehingga tegangan kritis sekat bergelombang terbesar adalah 334.47 MPa yang terdapat pada Model 1E yaitu variasi sekat bergelombang dengan sudut lekukan sebesar 65 derajat dan tebal pelat sekat sebesar 18 mm.

C. Berat Konstruksi

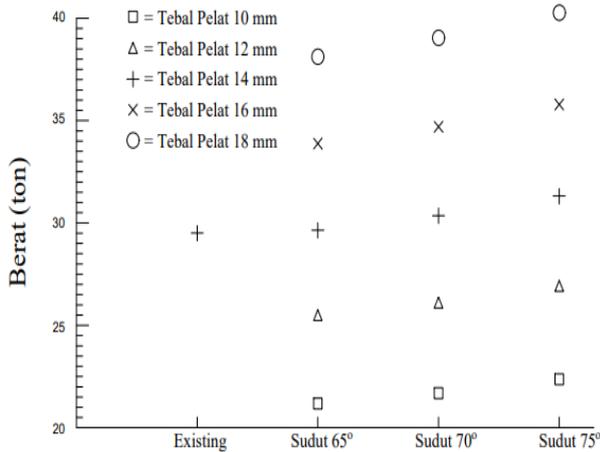
Berat konstruksi model sekat bergelombang didapatkan melalui modul *property* pada perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Berat konstruksi dihitung berdasarkan volume model dan massa jenis material yang digunakan. Dengan massa jenis baja class II grade A sebesar 7850 kg/m<sup>3</sup>. Berat konstruksi dari variasi model dapat dilihat pada Tabel 4.

Kemudian dibuat dalam bentuk grafik untuk melihat perubahan berat konstruksi dari variasi model. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6 berat konstruksi sekat bergelombang teringan adalah 21.18 ton yang terdapat pada Model 1A. Sedangkan berat konstruksi paling besar terdapat pada Model 3E dengan berat sebesar 40.26 ton.

D. Penentuan Model Yang Optimum

Penentuan model yang optimum dilakukan berdasarkan 2 aspek yang telah dijelaskan sebelumnya, yaitu tegangan kritis dan berat konstruksi model sekat bergelombang. Kedua aspek



Gambar 6. Perbandingan berat konstruksi variasi model sekat bergelombang.

tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Aspek tegangan kritis

Diketahui bahwa sudut lekukan dan tebal pelat sekat bergelombang mempengaruhi tegangan kritis dari variasi model. Dalam hal ini, dipilih variasi sekat dengan besar sudut lekukan 65 derajat atau Model 1 karena memiliki tegangan kritis paling besar.

2. Aspek berat konstruksi

Variasi model yang dipilih pada aspek ini adalah model dengan berat konstruksi paling minimal. Hal itu dilakukan untuk menjaga berat kapal secara keseluruhan agar tidak bertambah secara drastis. Pada variasi sudut lekukan, berat konstruksi model paling ringan terdapat pada sudut 65 derajat. Untuk variasi ketebalan pelat sekat, berat konstruksi model berbanding lurus dengan perubahan tebal pelat sekat. Berat konstruksi paling ringan terdapat pada ketebalan sekat 14 mm.

E. Variasi Sudut Lekukan Sekat Bergelombang

Dari aspek yang dijelaskan sebelumnya, variasi Model 1 dengan sudut lekukan sebesar 65 derajat dianggap optimum karena memiliki tegangan kritis dan *critical buckling load* paling besar. Pada aspek berat konstruksi, Model 1 juga memiliki berat paling ringan dibandingkan dengan Model 2 dan Model 3. Oleh karena itu, konstruksi sekat bergelombang dengan sudut 65 derajat merupakan ukuran yang optimum.

F. Variasi Tebal Pelat Sekat Bergelombang

Dari aspek tegangan kritis, model sekat bergelombang memiliki tegangan terbesar pada ketebalan 18 mm. Namun, apabila ditinjau dari aspek berat konstruksi, ketebalan 18 mm memiliki berat konstruksi yang cukup besar sehingga ukuran tersebut dianggap kurang optimal. Dengan demikian, dipilih ukuran ketebalan 16 mm karena selisih berat konstruksi dengan model existing tidak sebesar pada ukuran ketebalan 18 mm.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dengan judul “Studi Simulasi dan Eksperimental Pengaruh Variasi

Tabel 4. Berat Konstruksi Model Sekat Bergelombang.

Model	Sudut	Tebal Pelat (mm)	Berat Konstruksi (Ton)	Selisih Berat terhadap Model Existing
Existing	64.36	14	29.51	0.0%
1A		10	21.18	-28.2%
1B		12	25.41	-13.9%
1C	65	14	29.65	0.5%
1D		16	33.88	14.8%
1E		18	38.12	29.2%
2A		10	21.69	-26.5%
2B		12	26.02	-11.8%
2C	70	14	30.36	2.9%
2D		16	34.70	17.6%
2E		18	39.03	32.3%
3A		10	22.37	-24.2%
3B		12	26.84	-9.0%
3C	75	14	31.32	6.1%
3D		16	35.79	21.3%
3E		18	40.26	36.4%

*Equivalence Ratio* dan Temperatur Udara *Inlet* Pada Proses Gasifikasi Tongkol Jagung Terhadap Unjuk Kerja *Gasifier* Tipe *Downdraft* Berdasarkan Prinsip Energi dan Eksergi”, maka didapatkan disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut: (1) Peningkatan ER dan temperatur udara *inlet* akan menyebabkan penurunan LHV yang linier, akibat dari komposisi senyawa gas yang bersifat *flammable* semakin menurun. Nilai LHV terbesar untuk hasil simulasi terjadi pada ER 0,2 dan T *inlet* 30°C didapatkan 5052,65 kJ/kg; dan untuk hasil eksperimen didapatkan LHV *syngas* sebesar 3736,67 kJ/kg. (2) Peningkatan ER dan temperatur udara *inlet* akan menyebabkan adanya kenaikan  $\eta_{CG}$ , hal ini terjadi karena pengaruh dari nilai kalor (LHV) yang semakin menurun, karena semakin besar  $\dot{m}_{udara}$  pada proses gasifikasi, maka akan menaikkan  $\eta_{CG}$ . Saat mencapai efisiensi optimum, pembentukan CO<sub>2</sub> akan semakin banyak, sehingga gas semakin reaktif dan mempengaruhi LHV *syngas*, maka efisiensi akan menurun seiring bertambahnya ER dan T *inlet*. Didapatkan hasil  $\eta_{CG}$  tertinggi untuk hasil simulasi pada ER 0,35 dan T *inlet* 30°C sebesar 36,47%; dan untuk hasil dari eksperimen pada ER 0,35 dan T *inlet* 30°C sebesar 53,84%. (3) Peningkatan parameter operasi ER menyebabkan efisiensi *exergy* semakin kecil, maka komposisi *flammable gas* seperti H<sub>2</sub>, CO, dan CH<sub>4</sub> semakin menurun. Peningkatan parameter temperatur *inlet* dan semakin tinggi ER serta banyaknya *exergy* yang hilang di lingkungan, serta dari faktor lingkungan sekitar yang mempengaruhi proses kerja gasifikasi, akan membuat temperatur zona oksidasi semakin tinggi yang menyebabkan hasil temperatur *output* dari *exergy physical gas* semakin tinggi pada tiap perubahan variasinya, hal ini diakibatkan karena adanya perubahan LHV *syngas* dan media udara yang semakin banyak menjadikan irreversibilitas sistem yang terjadi semakin besar, sehingga menyebabkan penurunan efisiensi *exergy* pada proses gasifikasi. Analisa nilai efisiensi *exergy* tertinggi untuk hasil simulasi yaitu pada ER 0,2 dan T *inlet* 30°C didapatkan nilai sebesar 34,06%; dan untuk hasil eksperimen yaitu sebesar 25,45% pada ER 0,2 dengan T *inlet* 30°C.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Biro Klasifikasi Indonesia, *Rules For Classification And Construction*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia, 2021.

- [2] S. H. Shin and D. E. Ko, "A study on minimum weight design of vertical corrugated bulkheads for chemical tankers," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 180–187, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2017.06.005.
- [3] Y. Okumoto, Y. Takeda, M. Mano, and T. Okada, *Design of Ship Hull Structures: A Practical Guide for Engineers*, Illustrated. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [4] T. Konstantino, "Structural Design of Modern Chemical Tankers," National Technical University of Athens, Athens, 2015.
- [5] E. Ellobody, R. Feng, and B. Young, "Linear and Nonlinear Finite Element Analyses," *Finite Elem. Anal. Des. Met. Struct.*, pp. 56–71, 2014, doi: 10.1016/b978-0-12-416561-8.00004-4.
- [6] S. Moaveni, *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*, 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [7] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, 4th ed. United States: Chris Carson, 2007.
- [8] S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-04807-7>.