

## **KAJIAN MATERIAL ASME SA-533 DENGAN STANDAR ASME SECTION VIII DIVISI 2 PADA BEJANA TEKAN AMINE GAS TREATMENT**

**Jefri Imron<sup>1</sup>, Djoko Setyanto<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Indonesia

E-mail: jefri\_imron@yahoo.com

### **ABSTRAK**

Sektor migas menjadi salah satu sektor utama bagi perekonomian Indonesia. Untuk mendapatkan gas yang baik, terdapat proses pemisahan gas alam melalui *Amine Gas Treating/Acid Gas Treating* dengan menggunakan bejana tekan. Namun, kondisi FPSO yang berada di lepas pantai membuatnya menghadapi berbagai beban lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji substitusi desain material pressure vessel menggunakan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 (P-No. 3) untuk service gas yang bersifat asam (*sour gas*) dengan parameter desain yang sama. Desain material dilakukan dengan menggunakan *PV Elite*. Hasil menunjukkan terdapat perbedaan kimia maupun mekanik pada material ASME SA-516 Gr-70 dengan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2. Hal yang sama juga terlihat pada efisiensi elemen – elemen material, yang terdiri dari ketebalan shell, bottom head, upper head, dan berat bejana tekan menunjukkan bahwa material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 lebih efisien daripada material ASME SA-516 Gr-70. Material SA 533-Tipe E menunjukkan adanya hasil penghematan berat bejana tekan dengan estimasi sebesar 44,7 % dan penghematan total harga material sebesar 44,40%. Substitusi material tentu tidak hanya berdampak pada efisiensi berat bejana tekan, namun juga berpengaruh terhadap pengurangan biaya operasional yang digunakan untuk mendukung proses produksi dalam industry migas.

#### **Kata kunci :**

*amine gas treatment*; bejana tekan; material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2; substitusi material.

### **ABSTRACT**

*The oil and gas sector is one of the main sectors for the Indonesian economy. To get good gas, there is a natural gas separation process through Amine Gas Treating/Acid Gas Treating using a pressure vessel. However, the condition of FPSOs located offshore makes them face various environmental burdens. This research aims to examine the substitution of pressure vessel material design using ASME SA-533 Type E Class 2 (P-No. 3) material for sour gas service with the same design parameters. Material design was carried out using PV Elite. The results show that there are chemical and mechanical differences between the ASME SA-516 Gr-70 material and the ASME SA-533 Type E Class 2 material. The same thing can also be seen in the efficiency of the material elements, which consist of shell thickness, bottom head, upper head, and the weight of the pressure vessel shows that the ASME SA-533 Type E Class 2 material is more efficient than the ASME SA-516 Gr-70 material. SA 533-Type E material shows results in pressure vessel weight savings with an estimate of 44.7% and total material price savings of 44.40%. Material substitution certainly not only has an impact on the efficiency of pressure vessel weight, but also has an impact on reducing operational costs used to support production processes in the oil and gas industry.*

#### **Keywords :**

*amine gas treatment*; ASME SA-533 Type E Class 2 material; material substitution; pressure vessels.

### **1. PENDAHULUAN**

Gas alam dan minyak bumi merupakan bahan bakar serbaguna dan sumber energi penting bagi perekonomian dunia (Liang et al., 2012). Selain itu, gas dan minyak bumi dapat dihasilkan dari

penguraian bahan organik (tumbuhan dan hewan) oleh mikroba yang terkubur di dasar laut sejak jutaan tahun lalu sehingga membentuk batuan endapan (*sedimentary rock*) (Abrahams et al., 2015). Kondisi ini cukup banyak ditemukan di Indonesia karena

melimpahnya cadangan migas yang tersebar di seluruh wilayah di Indonesia, sehingga Indonesia menyumbang 0,8% dari seluruh produksi minyak dunia (Muarofah and Falianty, 2020).

Proses pengeboran minyak bumi dan gas alam dilakukan di perairan laut dalam dengan produk utamanya berupa *crude oil*, air, dan gas (Mir et al., 2022). Proses pemisahan gas, air, dan minyak mentah dilakukan melalui proses *topsides* yang dirancang untuk menerima aliran sumur penuh dari alur produksi (Mentes and Mollaahmetoğlu, 2018). Layanan pemisahan gas dikenal juga sebagai *sour service* (Prasiwi, et al., 2013).

Untuk mendapatkan karakter gas alam yang murni dan tidak beracun, maka kandungan gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S yang tinggi perlu dihilangkan melalui proses *amine gas treating / acid gas treating* (Speight, 2019). Pada prinsipnya, proses *amine gas treating* dilakukan di sebuah menara absorber (*contactor tower*) dimana gas asam akan direaksikan dengan larutan amine pada bejana tekan (*pressure vessel*) sehingga didapatkan gas alam yang telah bersih (*sweetening gas*) (Zahid et al., 2020).

Gas asam (*sour gas*) merupakan kandungan dari gas alam yang mengandung sejumlah sejumlah Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) serta Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S). gas tersebut bersifat beracun dan korosif (Ifezue & Nettikaden, 2013). Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada Lapangan Gas Natuna pada tahun 2021 menunjukkan bahwa dari hasil produksi sumur dengan kedalaman interval 7100-7700 kaki dilaporkan mengandung 32% CO<sub>2</sub> dan 7072 ppm H<sub>2</sub>S. Adanya kandungan gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S yang tinggi di dalam gas alam perlu dilakukan perlakuan khusus dalam menghilangkan kandungan gas asam (*sour gas*) dimana pada proses tersebut gas asam akan dihilangkan melalui proses *Amine Gas Treating/Acid Gas Treating* (Ifezue & Nettikaden, 2013).

Umumnya, bejana tekan yang digunakan pada area sour gas unit, amine unit, dan glycol unit masih banyak menggunakan material baja karbon sesuai dengan persyaratan ASME SA-516 Gr-70 (atau

ASTM A516-70) (Suardi and Fadli, 2021). Namun, kondisi FPSO yang berada di perairan lepas pantai banyak sekali menghadapi berbagai beban yang sifatnya acak dan berulang (siklik), seperti tekanan air dan gelombang air laut (Elhewy et al., 2016). Oleh sebab itu, penentuan dimensi dan rasio utama, serta pengurangan berat beban pada saat penentuan desain bejana tekan diperlukan agar kapal memenuhi kondisi yang telah ditentukan sehingga biaya produksi yang timbul akan lebih sedikit (Leira, 2010).

Penelitian - penelitian terdahulu yang berkaitan dengan substitusi material bejana tekan pada FPSO diantaranya Ngomo et al. (2019) yang mengkaji substitusi ASME SA-516 Gr-70 menjadi ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 pada bejana tekan *amine gas treating*. ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 memiliki komposisi kimia dan sifat mekanik dengan ketahanan yang lebih sesuai untuk *Sour Service*. Berdasarkan kajian - kajian di atas, belum banyak penelitian yang mengkaji substitusi material bejana tekan pada konstruksi FPSO. Oleh sebab itu, penelitian ini berusaha mengkaji substitusi material *pressure vessel* ASME SA-516 Gr-70 (P-No.1) dengan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 (P-No. 3).

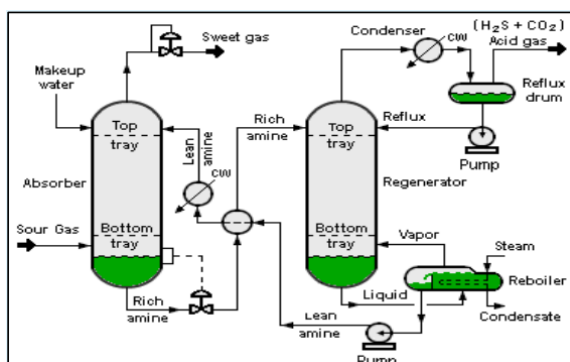
## Literature Review

### Amine Gas Treatment

Asmara (2018) menyatakan bahwa keberadaan gas asam sulfida (H<sub>2</sub>S) berperan penting dalam menyebabkan korosi pada saluran pipa gas. Minyak bumi dan gas alam yang terkontaminasi oleh gas asam sulfida (H<sub>2</sub>S) menyebabkan deterioration pada sistem perpipaan. Mekanisme korosi yang melibatkan gas CO<sub>2</sub> dan gas H<sub>2</sub>S sangat kompleks, bahkan pada beberapa kasus sangat sulit untuk mendeteksi keberadaan gas - gas asam pada korosi pipa migas (Bihua et al., 2018). Dalam diskusi lainnya yang dilakukan oleh Aslam et al. (2022) pada proses produksi migas, gas CO<sub>2</sub> juga tidak diinginkan karena menjadi racun pada katalis seperti pada sintesa amoniak dan metanol, serta dapat mengurangi nilai bakar dari gas alam. Dalam diskusi lainnya, Khan et al.

(2017) menyatakan bahwa keberadaan gas asam harus diturunkan atau dihilangkan pada proses sweetening gas untuk mengurangi kadar toksisitas pada saluran pipa. Biasanya, “kualitas pipa” atau gas penjualan harus diberi pemanis agar kandungan konsentrasi H<sub>2</sub>S tidak lebih dari 4 bagian per juta (ppm), dan nilai kalor tidak kurang dari 34,278 x 10<sup>6</sup> Joule/SCM hingga 42,84 x 10<sup>6</sup> Joule /SCM, tergantung pada kebutuhan konsumen akhir. Sedangkan kandungan CO<sub>2</sub> harus dibawah 3 mole% untuk memenuhi spesifikasi gas penjualan. Peraturan ini diterapkan untuk meminimalkan dampak lingkungan yang disebabkan oleh H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> pada gas alam.

Salim (2021) mengungkapkan bahwa amine gas treatment merupakan proses pemisahan gas - gas asam dalam gas alam, seperti hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), carbonyl sulfide (COS), carbon disulfide (CS<sub>2</sub>), dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Proses ini berusaha menyerap gas buang yang terkena larutan amina berair untuk menghilangkan CO<sub>2</sub> dan mendaur CO<sub>2</sub> dalam aliran gas buang. Hal yang sama diungkapkan oleh Leal-Navarro et al. (2019), ada beberapa alasan mengapa amina digunakan dalam operasi pengkondisian gas alam. Hal ini disebabkan karena amina cair memiliki kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> yang tinggi dalam reaksi kimia sehingga dapat memperoleh hasil CO<sub>2</sub> yang tinggi.



**Gambar 1.** Skema Alur Diagram pada Proses *Amine Gas Treatment*  
Source: Khan et al. (2017)

Karthigaiselvan & Panda (2021) menjelaskan alur reaksi kimia pada proses *amine gas treatment* didasarkan pada reaksi kimia basa lemah (Amina + air) dengan asam

lemah. Larutan amina bersifat basa dan H<sub>2</sub>S & CO<sub>2</sub> yang ada dalam gas alam bersifat asam. H<sub>2</sub>S dihilangkan melalui reaksi kimia yang bersifat reversibel dan bergantung pada perubahan suhu, sedangkan reaksi CO<sub>2</sub> dengan Amina berlangsung lambat. Oleh karena itu, semakin lama larutan amina berada dalam penyerap maka semakin banyak pula CO<sub>2</sub> yang diserap oleh larutan amina. Reaksi pada kolom absorpsi berada pada kisaran tekanan konstan antara 4826.33kPa hingga 6894.76kPa, tergantung ketersediaan tekanan gas dan kisaran suhu antara 299.817K hingga 322.039K. Baik reaksi H<sub>2</sub>S dengan amina maupun CO<sub>2</sub> dengan amina bersifat eksotermik yang berarti panas dihasilkan pada saat reaksi sehingga suhu di penyerap bervariasi dari atas ke bawah. Reaksi regenerasi dalam reboiler dan stripper berada pada tekanan rendah yang konstan dan kisaran suhu antara 240 °F & 300 °F.

### Baja Karbon

Nugroho et al. (2019) menyebut bahwa baja karbon adalah baja paduan yang mempunyai kadar karbon ditambah dengan sedikit unsur-unsur paduan. Dalam proses pembuatan baja akan ditemukan pula penambahan kandungan unsur kimia lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn) dan unsur kimia lainnya sesuai dengan sifat baja yang diinginkan. Baja karbon memiliki kandungan unsur karbon dalam besi sebesar 0,2 % hingga 2,14 %, dimana kandungan karbon tersebut berfungsi sebagai unsur penguat dalam struktur baja. Saefuloh et al. (2021) dalam pengaplikasiannya baja karbon sering digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan alat-alat perkakas, komponen mesin, struktur bangunan, dan lain sebagainya.

Ali et al. (2019) mengklasifikasikan baja karbon menjadi tiga jenis, yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi. Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan unsur karbon dalam struktur baja kurang dari 0,3% C. Baja karbon rendah ini memiliki ketangguhan dan keuletan tinggi akan tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah.

Pada umumnya baja jenis ini digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan komponen struktur bangunan, pipa gedung, jembatan, bodi mobil, dan lainnya. Sedangkan baja karbon sedang merupakan baja karbon dengan persentase kandungan karbon pada besi sebesar 0,3 % C – 0,59 % C. Baja karbon ini memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan baja karbon rendah, baja karbon sedang memiliki sifat mekanis yang lebih kuat dengan tingkat kekerasan yang lebih tinggi dari pada baja karbon rendah. Sementara itu, baja karbon tinggi adalah baja karbon yang memiliki kandungan karbon sebesar 0,6% C – 1,4% C. Baja karbon tinggi memiliki sifat tahan panas, kekerasan serta kekuatan tarik yang sangat tinggi akan tetapi memiliki keuletan yang lebih rendah sehingga baja karbon ini menjadi lebih getas. Baja karbon tinggi ini sulit diberi perlakuan panas untuk meningkatkan sifat kekerasannya, hal ini dikarenakan baja karbon tinggi memiliki jumlah martensit yang cukup tinggi sehingga tidak akan memberikan hasil yang optimal pada saat dilakukan proses pengerasan permukaan (Cao et al., 2021).

Pada saat ini umumnya bejana tekan (*pressure vessel*) pada area *sour gas unit*, *amine unit* dan *glycol unit* masih banyak menggunakan dengan material baja karbon (*carbon steel*) sesuai dengan persyaratan ASME SA-516 Gr-70 (atau ASTM A516-70), tipe material ini dalam ASME Section VIII Divisi 1 dikelompokkan kedalam P-No. 1 (Parent metal No. 1).

Pada penelitian ini material ASME SA-516 Gr-70 (P.No.1) akan disubstitusi dengan menggunakan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 (P-No. 3). Pengurangan berat dengan penggantian material dengan ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 telah dilakukan sekitar 30 tahun lalu dalam memproduksi *pressure vessel*. Pertama kali dilakukan pada *project* di Laut Utara untuk pengoptimalan berat dan dengan cara mengurangi ketebalan. Berdasarkan hasil penelitian, terdapat potensi yang signifikan untuk pengurangan ketebalan *pressure vessel* dengan beralih dari ASME SA-516 Gr-70 ke SA 533. Penggunaan ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 diperoleh hasil pengurangan berat

sebesar 35% lebih rendah (Ngomo, et al., 2019).

Maka pada penelitian ini peneliti akan mengkaji kemungkinan material pengganti ASME SA-516 Gr-70 dengan material yang memiliki kemampuan lebih tinggi sehingga didapatkan ketebalan yang lebih rendah dengan tidak mengurangi fungsi dari peralatan tersebut dengan menggunakan perhitungan ASME Section VIII Divisi 1 untuk material ASME SA-516 Gr-70 dengan ASME Section VIII Divisi 2 untuk material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2. Untuk memastikan ketahanan kosori terhadap *sour service* maka perlu dilakukan lining pada bagian dalam bejana tekan

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dan material ASME SA-516 Gr-70. Pinquart (2022) mendefinisikan studi eksperimen sebagai metodologi terkuat untuk menguji hubungan sebab akibat antara satu atau lebih variabel penjelas dan satu atau lebih variabel hasil. Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 merupakan baja berkekuatan tinggi dengan ketangguhan yang baik pada pengujian dengan suhu rendah, *good weldability*, dan memiliki sifat *impact* yang sangat baik (*impact properties*) pada suhu yang rendah (sampai -60 °C). Material ini didesain untuk dapat memenuhi persyaratan dari NACE MRO 175/ISO 15156. Selain itu, material ini juga menunjukkan ketahanan terhadap perengkahan yang disebabkan oleh hidrogen (HIC) sebaik yang dicapai oleh material baja karbon mangan (Ngomo et al., 2019). Sementara itu, material ASME SA-516 Grade 65 dan Grade 70 merupakan jenis baja karbon (*carbon steel*) material yang memiliki *weldability* yang baik untuk digunakan pada bejana tekan. Jenis grade 65 juga baik digunakan untuk *service* pada suhu yang rendah dan memiliki sifat *weldability* dan *notch toughness* yang sangat baik. Jenis material ini dapat digunakan untuk industri gas dan minyak termasuk untuk “*sour service*” dan “*wet H<sub>2</sub>S*” dimana materials

harus dilakukan pengujian *Hydrogen Induce Cracking (HIC)*.

Data dianalisis dengan menggunakan software *PV Elite* untuk mengkalkulasikan desain bejana tekan menggunakan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dan material ASME SA-516 Gr-70. Terdapat empat analisis dalam penelitian ini, yaitu 1) analisis perhitungan desain material bejana tekan dengan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dan material ASME SA-516 Gr-70, 2) analisis perbedaan ketebalan shell bejana tekan, 3) analisis perbedaan berat bejana

tekan, dan 4) analisis perbandingan estimasi biaya yang dikeluarkan untuk bejana tekan.

## 2.1 Spesifikasi Komposisi Bahan Kimia dan Mekanik Material

Komposisi bahan kimia dan mekanik dalam penggunaan material untuk amine unit sangat berpengaruh terhadap kerusakan yang ditimbulkan. Tabel 1 menunjukkan komposisi bahan kimia material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dengan material ASME SA-516 Gr-70.

**Tabel 1.** Komposisi Bahan Kimia Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dengan Material ASME SA-516 Gr-70

Komposisi Kimia		SA-533	SA-516
		Tipe E Kelas 2	Tipe Gr-70
Carbon, max <sup>A</sup>		0.25	0,28
	Heat analysis	1.15-1.70	0.85-1.20
	Product analysis	1.04-1.84	0.79-1.30
Phosporus, max <sup>A</sup>		0.020	0.035
Sulfur, max <sup>A</sup>		0.015	0.035
Silicon:	Heat analysis	0.15-0.40	0.15-0.40
	Product analysis	0.13-0.45	0.13-0.45
Molybdenum:	Heat analysis	0.55-0.60	
	Product analysis	0.21-0.64	
Nickel:	Heat analysis	0.60-1.00	
	Product analysis	0.57-1.03	
Chromium, Max:	Heat analysis	0.60	
	Product analysis	0.64	

Source: ASME (2019)

Dari tabel 1 diketahui bahwa material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 memiliki komponen kimia lebih banyak dibandingkan dengan material ASME SA-516 Gr-70. Komposisi kimia yang dimiliki oleh ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 terdiri dari Carbon max<sup>A</sup>, Manganese<sup>B</sup>, Phosporus max<sup>A</sup>, Sulfur

max<sup>A</sup>, Silicon, Molybdenum, Nickel, dan Chromium Max. Sementara itu, komposisi kimia yang dimiliki oleh material ASME SA-516 Gr-70 hanya terdiri dari Carbon max<sup>A</sup>, Manganese<sup>B</sup>, Phosporus max<sup>A</sup>, Sulfur max<sup>A</sup>, dan Silicon. Komposisi Carbon max<sup>A</sup>, Manganese<sup>B</sup>, Silicon, Molybdenum, Nickel,

dan Chromium Max, memiliki ukuran panas dan produk yang berbeda, sedangkan untuk Phosporus max<sup>A</sup> dan Sulfur, max<sup>A</sup> tidak memiliki analisis panas dan analisis produk. Berdasarkan komposisi kimia yang ada, maka material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 memiliki kadar karbon lebih rendah dibandingkan dengan material ASME SA-516 Gr-70. Dengan kadar karbon yang rendah, material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 memiliki sifat kuat, keuletan yang tinggi, mudah dibentuk, dan dapat dikerjakan dalam keadaan panas maupun dingin. Sesuai dengan karakteristiknya, material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 akan sangat baik jika digunakan sebagai bahan baku bejana tekan pada proses *amine gas treatment*. Yuguo et al. (2020) menjelaskan bahwa baja karbon rendah memiliki kadar karbon 0.04 - 0.3%C sehingga secara komersil banyak diproduksi dan digunakan untuk peralatan konstruksi. Meskipun begitu, material dengan baja karbon rendah tidak begitu resisten dengan korosi seperti material baja karbon tinggi.

**Tabel 2.** Perbandingan Sifat Mekanik Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dan Material ASME SA-516 Gr-70

Material	Tensile Strength, ksi (MPa)	Yield Strength, min ksi (MPa)
ASME SA-	90-115 (620-	70 (485)

**Tabel 3.** Perhitungan Desain Elemen Material ASME SA-516 Gr-70

From	To	Int. Press + Liq. Hd (psig)	Nominal Thickness (inch)	Total Corr Allowance (inch)	Element Diameter (inch)	Allowable Stress (psi)
Skirt		...	0,187	0,125	131,8	...
Bottom Head		508	1,828	0,125	131,8	2000
Shell		508	1,828	0,125	131,8	2000
Upper Head		508	1,828	0,125	131,8	2000

Source: Authors

Berdasarkan hasil perhitungan desain parameter menggunakan standar ASME Section VIII Divisi 1 Tipe Head Ellipsoidal untuk material ASME SA-516 Gr-70

533 Tipe E Kelas 2	795)	
ASME SA-516 Gr-70	70-90 (485-620)	38 (260)

Source: Upitis et al. (2020)

Dari perbandingan tabel 2 di atas maka dapat disimpulkan bahwa material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 memiliki nilai *tensile strength* dan *yield strength* yang lebih tinggi daripada material ASME SA-516 Gr-70. Dapat disimpulkan bahwa material ASME SA-533 Tipe Kelas 2 lebih kuat dan dapat digunakan untuk bejana tekan amine gas treatment.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Analisis Perhitungan Desain Material ASME SA-516 Gr-70 dan Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2

##### Perhitungan Desain Elemen Material ASME SA-516 Gr-70

Perhitungan desain material yang digunakan menunjukkan ketahanan dan kekuatan bejana tekan jika digunakan dalam waktu yang lama. Elemen – elemen material yang dihitung dalam pembuatan desain bejana tekan didasarkan pada ketebalan, tekanan, diameter, dan tegangan material. Perhitungan elemen material ASME SA-516 Gr-70 dapat dilihat pada tabel 3 di bawah ini.

diperoleh hasil nominal ketebalan *skirt* 0.187-inch, *bottom head* 1.828-inch, *shell* 1.828-inch, *upper head* 1.828 inch.

Sementara itu, mengacu pada elemen ketebalan yang disarankan dan nilai MAWP

pada desain bejana tekan, desain elemen *bottom head* pada bejana tekan material

ASME SA-516 Gr-70 dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} tr &= \frac{P * D * Kcor}{2 * S * E - 0.2 * P} \\ &= \frac{(508,0 * 132,05 * 0.997)}{2 * 2000,0 * 1,0 - 0.2 * 508,0} \\ &= 1,677 + 0,1250 = 1,8021 \text{ in.} \end{aligned}$$

Untuk penilaian desain elemen *shell* pada bejana tekan material ASME SA-516 Gr-70, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} tr &= \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} \\ &= \frac{508,0 * 66,25}{2000,0 * 1,0 - 0,6 * 508,0} \\ &= 1,7030 + 0,1250 = 1,8280 \end{aligned}$$

Untuk penilaian desain elemen *Upper Head* pada bejana tekan material ASME SA-516 Gr-70, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} tr &= \frac{P * D * Kcor}{2 * S * E - 0.2 * P} \\ &= \frac{508,0 * 132,05 * 0,997}{2 * 2000,0 * 1,0 - 0,2 * 508,0} \\ &= 1,6771 + 0,1250 \\ &= 1,8021 \text{ inch} \end{aligned}$$

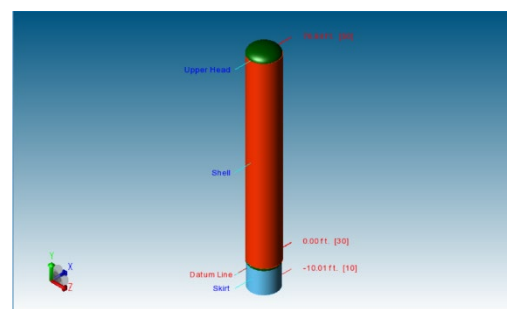
Setelah tebal minimum masing – masing elemen dikalkulasikan, maka tahapan selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk memperoleh desain skirt yang sesuai. Aspek – aspek yang dinilai dalam mendesain skirt di antaranya beban angin (*wind load*) dan ketahanan gempa (*earthquake load*). Hasil kalkulasi dari desain skirt bejana tekan dengan material ASME SA-516 Gr-70 dapat terlihat pada tabel 4 berikut.

**Tabel 4.** Kalkulasi *Wind/Earthquake Shear, Bending Material ASME SA-516 Gr-70*

From	To	Distance to Support (ft.)	Cumulative Wind Shear (lb.)	Earthquake Shear (lb.)	Wind Bending (ft. lb.)	Earthquake bending (ft. lb.)
10	20	4,92	32435,9	14492,8	1499182	784338
20	30	9,92333	29864,2	14476,9	1192665	641807
30	40	48,3917	29819,6	14334,1	1187691	639406
40	50	88,86	1085,02	2208,35	1418,21	4425,07

Source: Authors

Berdasarkan data pada tabel 4 diketahui bahwa semakin besar skirt bejana tekan yang menggunakan material ASME SA-516 Gr-70, maka nilai kumulatif angin, beban gempa, *wind bending*, dan *earthquake bending* semakin kecil. Sedangkan semakin rendah skirt, maka semakin tinggi hasil ketahanannya terhadap pengaruh angin dan gempa bumi.



**Gambar 2.** Hasil Desain Perancangan Bejana Tekan Material ASME SA-516 Gr 70

Source: Authors

Berdasarkan inputan desain parameter pada PV Elite menggunakan standar ASME Section VIII Divisi 1 Tipe Head Elipsoidal untuk material ASME SA-516 Gr-70

diperoleh hasil perhitungan berat bejana tekan sebesar 223250.6 lbm atau setara dengan 101-ton yang merupakan akumulasi berat dari skirt, *bottom head*, *shell*, *upper head* (lihat figure 3).

### Perhitungan Desain Elemen Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2

Sama seperti perhitungan desain bejana tekan yang menggunakan material ASME SA-516 Gr-70, perhitungan desain

material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 elemen material yang dihitung dalam pembuatan desain bejana tekan didasarkan pada ketebalan, tekanan, diameter, dan tegangan material. Perhitungan elemen material ASME SA-516 Gr-70 dapat dilihat pada tabel 5 di bawah ini.

**Tabel 5.** Perhitungan Desain Elemen Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2

From	To	Int. Press + Liq. Hd (psig)	Nominal Thickness (inch)	Total Corr Allowance (inch)	Element Diameter (inch)	Allowable Stress (psi)
Skirt		...	0,2	0,125	131,9	...
Bottom Head		508	0.6	0,125	131,9	37500
Shell		508	1,03	0,125	131,9	37500
Upper Head		508	0,6	0,125	131,9	37500

Source: Authors

Berdasarkan data pada tabel 5, hasil input desain parameter pada PV Elite menggunakan standar ASME Section VIII Divisi 2 Tipe Hemispherical untuk material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 diperoleh hasil nominal ketebalan pada *skirt* 0.2-inch, *bottom head* 0.6 inch, *shell* 1.03 inch, *upper head* 0.6 inch.

Sementara itu, mengacu pada elemen ketebalan yang disarankan dan nilai MAWP pada desain bejana tekan, desain elemen *bottom head* pada bejana tekan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{D}{2} \left( \exp \left[ \frac{0,5P}{S * E} \right] - 1 \right) + ci + co \\
 &= \frac{132,15}{2} \left( \exp \left[ \frac{0,5 * 508,0}{37500,0 * 1,0} \right] - 1 \right) \\
 &\quad + 0,125 + 0,0 \\
 &= 0,4491 + 0,125 + 0,0 \\
 &= 0,5741 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Untuk penilaian desain elemen *shell* pada bejana tekan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$t = 0,5 * D \left( \exp \left[ \frac{P}{S * E} \right] - 1 \right) + ci + co$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,5 * 132,15 \left( \exp \left[ \frac{508,0}{37500,0 * 1,0} \right] \right. \\
 &\quad \left. - 1 \right) + 0,125 + 0,0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,9012 + 0,125 + 0,0 \\
 &= 1,0262 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Untuk penilaian desain elemen *Upper Head* pada bejana tekan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{D}{2} \left( \exp \left[ \frac{0,5P}{S * E} \right] - 1 \right) + ci + co \\
 &= \frac{132,15}{2} \left( \exp \left[ \frac{0,5 * 508,0}{37500,0 * 1,0} \right] \right. \\
 &\quad \left. - 1 \right) + 0,125 + 0,0 \\
 &= 0,4491 + 0,125 + 0,0
 \end{aligned}$$



$$= 0,5741 \text{ in.}$$

Setelah tebal minimum masing – masing elemen dikalkulasikan, maka tahapan selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk memperoleh desain skirt yang sesuai. Aspek – aspek yang dinilai dalam mendesain

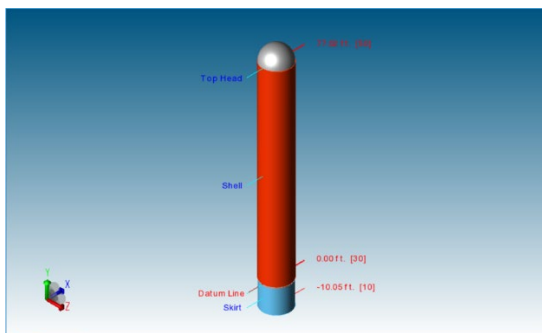
skirt di antaranya beban angin (*wind load*) dan ketahanan gempa (*earthquake load*). Hasil kalkulasi dari desain skirt bejana tekan dengan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dapat terlihat pada tabel 6 berikut.

**Tabel 6.** Kalkulasi *Wind/Earthquake Shear, Bending Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2*

From	To	Distance to Support (ft.)	Cumulative Wind Shear (lb.)	Earthquake Shear (lb.)	Wind Bending (ft. lb.)	Earthquake bending (ft. lb.)
10	20	4,9	21083,6	10083,1	992041	513801
20	30	9,925	19306,8	10060	794128	415100
30	40	48,435	19261,2	9977,3	789307	412595
40	50	88,945	1222,99	724,928	3019,79	1789,97

Source: Authors

Berdasarkan data pada tabel 6 diketahui bahwa semakin besar skirt bejana tekan yang menggunakan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2, maka nilai kumulatif angin, dan *wind* bending akan semakin kecil, sedangkan nilai *earthquake shear* dan *earthquake bending* semakin besar. Sedangkan semakin rendah skirt, maka semakin tinggi hasil *cumulative wind shear* dan *wind bending*.



**Gambar 3.** Hasil Desain Perancangan Bejana Tekan Material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2

Source: Authors

Berdasarkan inputan desain parameter pada PV Elite menggunakan standar ASME Section VIII Divisi 2 Tipe Hemispherical

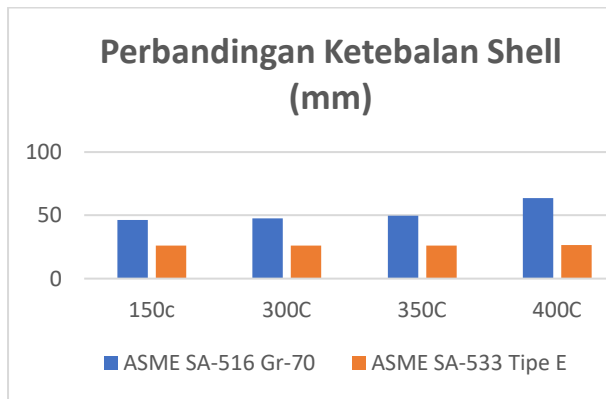
untuk material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 diperoleh hasil perhitungan berat bejana tekan sebesar 123372.3 lbm atau setara dengan 56 ton yang merupakan akumulasi berat dari skirt, *bottom head, shell, upper head*.

### 3.2 Analisis Perbandingan Shell Bejana Tekan Material ASME Section VIII Divisi 1 dan Divisi 2

Berdasarkan hasil perhitungan desain dengan menggunakan material ASME Section VIII pada Divisi 1 dan Divisi 2, diketahui terdapat perbedaan ketebalan antara dua material tersebut ketika diaplikasikan pada bejana tekan. Perbedaan ketebalan material pada bejana tekan tentu akan memengaruhi efisiensi ketebalan shell yang dihasilkan dari masing – masing material.

#### Perbedaan Ketebalan Shell Bejana Tekan Material ASME SA-516 Gr-70 dan ASME SA-533 Tipe E Kelas 2

Perbedaan ketebalan shell bejana tekan material ASME SA-516 Gr-70 dan ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



**Gambar 4.** Grafik Perbedaan Ketebalan Shell

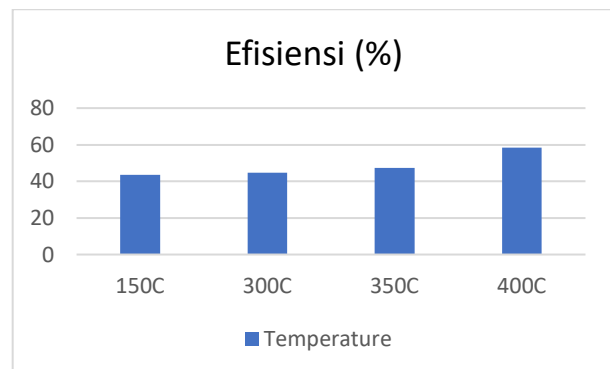
Source: Authors

Grafik pada gambar 4 menunjukkan perbedaan yang signifikan antara dua material berbeda yang digunakan pada bejana tekan. Pada material ASME SA-516 Gr-70, ketika dipanaskan pada suhu 150 °C, ketebalan shell meningkat sebesar 46.4 mm. Kemudian, ketika dipanaskan pada suhu 300 °C, shell menebal hingga 47.5 mm. Pada suhu 350 °C, ketebalan shell meningkat menjadi 49.8 mm. Ketebalan shell meningkat drastic ketika dipanaskan pada suhu 400 °C, dimana shell menebal hingga 63.5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada material ASME SA-516 Gr-70, besar temperature berbanding lurus dengan ketebalan shell, sehingga semakin tinggi suhu maka ketebalan shell juga akan semakin meningkat. Sedangkan pada material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2, besarnya suhu tidak terlalu memengaruhi ketebalan *shell*. Ketebalan shell cenderung konstan pada suhu 150 °C hingga 350 °C, dimana shell hanya menebal sebesar 26,2 mm. Shell baru menebal sebesar 26,4 mm pada suhu 400 °C. Namun, peningkatan ketebalan shell pada ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 juga tidak terlalu signifikan. Perbedaan ketebalan shell pada kedua material setelah diberi perlakuan panas disebabkan karena masing – masing material memiliki perilaku microstructural yang berbeda setelah dipanaskan sehingga ketebalan lapisan shell pada bejana tekan tidak hanya bergantung pada suhu tetapi juga waktu reaksi yang dibutuhkan. Selain itu, material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 merupakan jenis baja karbon rendah dengan

mikrostrukturnya yang terdiri dari fasa ferit dan pearlit menjadikan baja karbon rendah bersifat lunak. Seperti yang diungkapkan oleh Wei et al. (2015) bahwa baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur martensit maka dari itu untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses roll dingin maupun karburisasi.

### Efisiensi Shell Bejana Tekan Material ASME SA-516 Gr-70 dan ASME SA-533 Tipe E Kelas 2

Adanya perbedaan hasil ketebalan material ASME SA-516 Gr-70 dengan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 tentu memberikan efek tersendiri bagi efisiensi ketebalan shell ketika dilakukan substitusi material. Besarnya efisiensi yang dihasilkan dari material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 tersaji pada gambar 3 berikut.

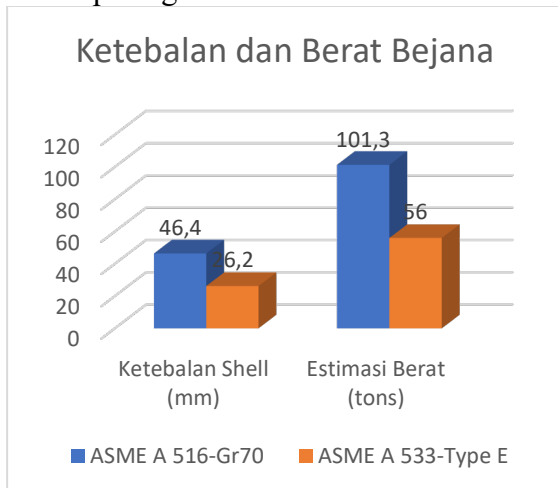


**Gambar 5.** Grafik Efisiensi Ketebalan Shell  
Source: Authors

Berdasarkan grafik pada gambar 5 diketahui bahwa besar efisiensi ketebalan shell untuk penggantian material dari ASME SA-516 Gr-70 ke ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 cenderung semakin meningkat. Efisiensi ketebalan shell berbanding lurus dengan peningkatan temperature yang diberikan, dimana semakin tinggi temperature nya maka akan semakin tinggi pula efisiensi yang dihasilkan. Efisiensi ketebalan shell dengan persentase terendah sebesar 43.5% pada temperature 150 °C dan efisiensi terbesar terjadi pada suhu 400 °C yaitu sebesar 58.4%.

### 3.3 Analisis Perbandingan Berat Bejana Tekan Material ASME Section VIII Divisi 1 dan Divisi 2

Berdasarkan hasil perhitungan desain dengan menggunakan material ASME Section VIII pada Divisi 1 dan Divisi 2, diketahui terdapat perbedaan berat antara dua material tersebut ketika diaplikasikan pada bejana tekan. Perbedaan berat material pada bejana tekan tentu akan memengaruhi biaya yang dikeluarkan untuk mendukung kegiatan produksi. Efisiensi ketebalan dan berat bejana terlihat pada grafik di bawah ini.

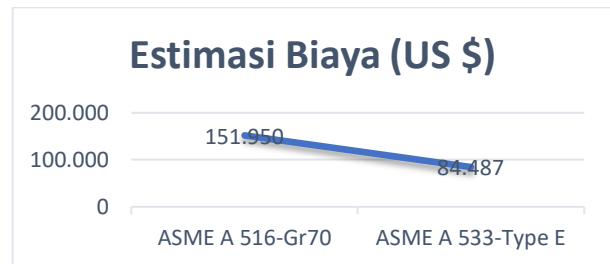


**Gambar 6.** Perbedaan Ketebalan dan Berat Bejana Tekan  
Source: Author

Berdasarkan grafik pada gambar 6 diketahui bahwa semakin besar ketebalan dari bejana tekan maka berat yang dihasilkan akan semakin besar. Peningkatan estimasi berat bejana tekan yang menggunakan material ASME SA-516 Gr-70 lebih signifikan daripada berat bejana tekan yang menggunakan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2. Pada gambar 5, diambil contoh ketebalan shell terkecil yaitu 46.4 mm untuk material ASME SA-516 Gr-70 dan 26.2 mm untuk material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2. Estimasi berat bejana tekan untuk material ASME SA-516 Gr-70 dengan ketebalan sebesar 46.4 mm memiliki berat 101.3 ton, sedangkan untuk material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dengan ketebalan 26.2 mm memiliki berat sebesar 56 ton. Hal ini jelas menunjukkan adanya perbedaan berat bejana

tekan dua kali lebih besar pada material ASME SA-516 Gr-70.

Perbedaan berat ini tentu memengaruhi biaya yang dikeluarkan untuk membuat bejana tekan. Semakin tebal dan berat bejana tekan, maka biaya yang dikeluarkan akan semakin besar. Estimasi biaya yang harus dikeluarkan untuk menciptakan satu bejana tekan dapat terlihat pada grafik di bawah ini.



**Gambar 7.** Perbandingan Estimasi Biaya yang Dikeluarkan untuk Kedua Material  
Source: Author

Berdasarkan gambar 7 di atas, diketahui bahwa material ASME SA-516 Gr-70 dengan ketebalan shell 46,4 mm dan berat beban bejana tekan sebesar 101,3 ton diestimasikan akan menghabiskan biaya material sebesar \$ 151.950. Sedangkan penggunaan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 dengan ketebalan shell 26,2 mm dan berat bejana tekan sebesar 56 ton diestimasikan menghabiskan biaya sebanyak \$ 84.487. Biaya yang dikeluarkan akan terus meningkat seiring bertambahnya ketebalan shell dan berat bejana tekan yang dihasilkan. Namun, dapat terlihat pada gambar 6 terjadi perbedaan estimasi biaya yang signifikan antara bejana tekan yang menggunakan material ASME SA-516 Gr-70 dengan material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2. Karena material ASME SA-516 Gr-70 memiliki ketebalan dan berat bejana tekan yang lebih besar daripada material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2, maka biaya yang dikeluarkan pun jauh lebih besar. Peningkatan biaya pada proses produksi migas tentu bukanlah sesuatu yang efisien, mengingat untuk menekan biaya produksi tentu harus menggunakan material yang lebih hemat namun tetap menerapkan aspek safety pada prosesnya. Penggantian material ASME SA-

516 Gr-70 ke material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 menunjukkan adanya hasil penghematan berat bejana tekan dengan estimasi sebesar 44,7 % dan penghematan total harga material sebesar 44,40%.

## SIMPULAN

Masalah berat bejana tekan pada fasilitas proses yang ada pada bagian atas FPSO maupun CPP akan berdampak pada struktur bangunan dari fasilitas tersebut yang pada akhirnya akan mempengaruhi besarnya biaya investasi fasilitas. Selain masalah dampak terhadap investasi, berat peralatan juga menjadi masalah karena adanya keterbatasan dan ketersediaan alat angkat (*lifting equipment*) pada aktivitas loading dari fabrikasi keatas fasilitas FPSO atau CPP.

Dari hasil pembahasan yang telah diuraikan pada bab-IV, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan menggunakan perhitungan ketebalan berdasarkan ASME Section VIII Divisi 2, maka terjadi pengurangan ketebalan material untuk *shell*, *head* dan *skirt* bejana tekan secara signifikan
2. Dengan adanya substitusi material dari ASME SA-516 Gr-70 ke material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2 terdapat efisiensi penggunaan material sebesar 44.7%. Hal ini disebabkan karena adanya pengurangan ketebalan material yang cukup signifikan yaitu sebesar 43.5%.
3. Substitusi material akan berdampak pada efisiensi biaya dari pembuatan bejana tekan 44.40%, dengan asumsi harga materials sebesar 1500\$ US per ton untuk material ASME SA-516 Gr-70 dan 1508 \$ US per ton untuk material ASME SA-533 Tipe E Kelas 2.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abotaleb, Ahmed, Ivan Gladich, Alaa Alkhateeb, Nour Mardini, Yusuf Bicer, and Alessandro Sinopoli. 2022. "Chemical and Physical Systems for Sour Gas Removal: An Overview from Reaction Mechanisms to Industrial Implications." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 106 (April): 104755. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104755>.
- [2] Abrahams, Leslie S., Constantine Samaras, W. Michael Griffin, and H. Scott Matthews. 2015. "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions From U.S. Liquefied Natural Gas Exports: Implications for End Uses." *Environment Science Technology* 49 (5): 3237–3245. <https://doi.org/10.1021/es505617p>.
- [3] Ali, N., T. E. Putra, Husaini, V. Z. Iskandar, and S. Thalib. 2019. "Corrosion Rate of Low Carbon Steel for Construction Materials in Various NaCl Concentrations." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 536 (1): 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012015>.
- [4] Aslam, Jeenat, Ruby Aslam, Saman Zehra, and Marziya Rizvi. 2022. "Corrosion Inhibitors for Sweet (CO2 Corrosion) and Sour (H2S Corrosion) Oilfield Environments." In *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors*, 165–81. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- [5] Asmara, Yuli Panca. 2018. "The Roles of H2S Gas in Behavior of Carbon Steel Corrosion in Oil and Gas Environment: A Review." *Jurnal Teknik Mesin* 07 (1): 37–43.
- [6] ASME. 2019. "Section II Materials" United States of America: ASME Press. [www.asme.org/cer](http://www.asme.org/cer)
- [7] Bihua, Xu, Yuan Bin, and Wang Yongqing. 2018. "Anti-Corrosion Cement for Sour Gas (H2S-CO2) Storage and Production of HTHP Deep Wells." *Applied Geochemistry* 96: 155–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.07.004>.
- [8] Cao, Lili, Ming Li, Jiazhi Zhang, Gang Lin, Baichuan Gong, Xianbiao Mao, Lianying Zhang, and Yan Li. 2021. "Study on Deterioration Characteristics of Low-Carbon Steel's Mechanical Properties and Fracture Mechanism under

- Marine Engineering Environment.” *Advances in Civil Engineering* 2021: 1–17.  
<https://doi.org/10.1155/2021/6122943>.
- [9] Elhewy, Ahmed M.H., Amany M.A. Hassan, and Moussa A. Ibrahim. 2016. “Weight Optimization of Offshore Supply Vessel Based on Structural Analysis Using Finite Element Meth Od.” *Alexandria Engineering Journal* 55 (2): 1005–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.02.032>.
- [10] Fatimura, Muhrinsyah, and Reno Fitriyanti. 2018. “Penanganan Gas Asam (Sour Gas) Yang Terkandung Dalam Gas Alam Menjadi Sweetening Gas.” *Jurnal Redoks* 3 (2): 55–67.  
<https://doi.org/10.31851/redoks.v3i2.2390>.
- [11] Gürsan, C., and V. de Gooyert. 2021. “The Systemic Impact of a Transition Fuel: Does Natural Gas Help or Hinder the Energy Transition?” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138 (110552): 1–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110552>.
- [12] Iliuta, Ion, and Faiçal Larachi. 2018. “CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Absorption by MEA Solution in Packed-Bed Columns under Inclined and Heaving Motion Conditions - Hydrodynamics and Reactions Performance for Marine Applications.” *International Journal of Greenhouse Gas Control* 79: 1–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.09.016>.
- [13] Karthigaiselvan, K., and Rames C. Panda. 2021. “Dynamic Modeling and Solubility Studies of Sour Gases during Sweetening Process of Natural Gas.” *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 95 (November): 104087.  
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104087>.
- [14] Khan, Saqib Yar, Mohd Yusuf, and Ateeque Malani. 2017. “Selection of Amine in Natural Gas Sweetening Process for Acid Gases Removal: A Review of Recent Studies.” *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal* 1 (3): 1–8.
- [15] Leal-Navarro, Jaime, Rayme Mestre-Escudero, Alejandro Puerta-Arana, Jeffrey León-Pulido, and Ángel D. González-Delgado. 2019. “Evaluating the Exergetic Performance of the Amine Treatment Unit in a Latin-American Refinery.” *ACS Omega* 4 (26): 21993–21997.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03051>.
- [16] Leira, Bernt J. 2010. “Recent Structural Design Considerations Related to Floating Production Systems.” *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering* 3 (1): 50–64.  
<https://doi.org/0.1080/19373260903208907>.
- [17] Liang, Fang-Yu, Marta Ryvak, Sara Sayeed, and Nick Zhao. 2012. “The Role of Natural Gas as a Primary Fuel in the near Future, Including Comparisons of Acquisition, Transmission and Waste Handling Costs of as with Competitive Alternatives.” *Chemistry Central Journal* 6 (Suppl 1): 1–24.  
<https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S1-S4>.
- [18] Mahmud, N., A. Benamor, A. Soliman, and M. S. Nasser. 2018. “Thermal Degradation of Aqueous Amine/Amino Acid Solutions in the Presence and Absence of CO<sub>2</sub>.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 423 (1): 012154.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/423/1/012154>.
- [19] Mentés, Ayhan, and Ertuğrul Mollaahmetoğlu. 2018. “Floating Production, Storage and Offloading Units.” *Offshore Electrical Engineering Manual* 1 (17): 15–32.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385499-5.00035-2>.
- [20] Mir, Sonia, Abbas Naderifar, Ali Morad Rahidi, and Mahshad Alaei. 2022. “Recent Advances in Oil/Water Separation Using Nanomaterial-Based Filtration Methods for Crude Oil Processing-a Review.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 215

- (Part B): 110617.  
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110617>.
- [21] Monfared, Ehsan, and Farshad Farahbod. 2023. "Empirical Investigation of Treatment of Sour Gas by Novel Technology: Energy Optimization." *American Journal of Analytical Chemistry* 14 (28): 175–83. <https://doi.org/10.4236/ajac.2023.144010>.
- [22] Muarofah, Siti, and Telisa Aulia Falianty. 2020. "The Investment of Upstream Oil and Gas in Indonesia." *Jejak: Journal Economics and Policy* 13 (1): 203–17. <https://doi.org/10.15294/jejak.v13i1.23248>.
- [23] Ngomo, Valery, Francois Grosjean, Olav Tangen, and Xavier Courtial. 2019. "Substitution of Carbon Steels for ASME SA-533 Type E for Lightweight Equipment." In *Corrosion 2019*, 02462549. Nashville, USA: NACE.
- [24] Nugroho, Eko, Sulis Dri Handono, Asroni, and Wahidin. 2019. "Pengaruh Temperatur Dan Media Pendingin Pada Proses Heat Treatment Baja AISI 1045 Terhadap Kekerasan Dan Laju Korosi." *TURBO* 8 (1): 99–110.
- [25] Pinquart, Martin. 2022. *Experimental Studies and Observational Studies*. New York: Springer.
- [26] Prasiwi, Rizki Amalia, Imam Rochani, and Joswan J. Soedjono. 2013. "Analisis Perilaku FPSO (Floating Production Storage and Offloading) Terhadap Internal Turret Mooring System Berbasis Simulasi Time Domain." *Jurnal Sains Dan Seni Pomits* 3 (2): 2337–3520.
- [27] Saefuloh, Iman, Ipick Setiawan, Sunardi, Miftahul Jannah, and Rina Lusiani. 2021. "Pengaruh Temperatur Pelapisan Dan Kekasaran Permukaan Terhadap Laju Korosi Lapisan Electroless Ni-P Baja Karbon Rendah Astm A36." *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin* 6 (2): 158–65.
- [28] Salim, S. R. S. 2021. "Treatment of Amine Wastes Generated in Industrial Processes." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1092 (1): 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1092/1/012051>.
- [29] Speight, James G. 2019. "Gas Cleaning Processes." In *Natural Gas*, 2nd Editio, 277–324. Amsterdam: Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809570-6.00008-4>.
- [30] Stowe, Haley M., Eunsu Paek, and Gyeong S. Hwang. 2016. "First-Principles Assessment of CO2 Capture Mechanisms in Aqueous Piperazine Solution." *Physical Chemistry Chemical Physics* 18 (36): 25296–307. <https://doi.org/10.1039/C6CP03584A>.
- [31] Suardi, Khairmen, and Faris Fadli. 2021. "Analisis Kegagalan Pembentukan Ellipsoidal Head Pressure Vessel Dari Dua Pelat Dilas ASME SA516 Grade 70N Dengan Menggunakan Metode Fabrikasi Cold Forming." *Metal Indonesia* 43 (1): 48–54. <https://doi.org/10.32423/jmi.2021.v43.48-54>.
- [32] Uptis, Elmar, Richard A. Moen, Marvin L. Carpenter, Jr. William Newell, John F. Grubb, Richard C. Sutherlin, Jeffrey Henry, and Anne Chaudouet. 2020. "Materials and Specifications." In *Online Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Codes*. New York: ASME Press. [https://doi.org/10.1115/1.861981\\_ch3](https://doi.org/10.1115/1.861981_ch3).
- [33] Wei, Yingying, Zbigniew Zurecki, and Richard D. Sisson Jr. 2015. "Optimization of Processing Conditions in Plasma Activated Nitrogen–Hydrocarbon Carburizing." *Surface and Coatings Technology* 272 (June): 190–97. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.006>.
- [34] Yuguo, Jiang, Dennis Asante, Chen Dan, and Zhang Jie. 2020. "Evaluation of Low-Carbon Competitiveness Based on a System Evaluation Method: A Case Study of Three Chinese Steel Companies." *Mathematical Problems in Engineering* 2021: 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/6664216>.

- [35] Zahid, Umer, Aban Sakheta, and Chul-Jin Lee. 2020. "Techno-Economic Analysis of Acid Gas Removal from Associated and Non-Associated Sour Gas Using Amine Blend." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 98 (July): 103078. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103078>.
- [36] Ifezue, D, and V C Nettikaden. 2013. "Managing Sour Service In Oil Export And Onshore Pipelines: A Case Study." *Journal Of Failure Analysis and Prevention* 13 (3): 264-273.
- [37] Ngomo, Valery, Grosjean, Francois, Tangen, Olav, and Xavier Courtial. 2019. "Substitution of Carbon Steels for ASME SA-533 Type E for Lightweight Equipment." *CORROSION (NACE)*.