

ISSN 2685-8029 (Online)

ISSN 2716-1293 (Print)

Journal of Mechanical Design and Testing

Jointly Published by:

Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Universitas Gadjah Mada

Centre for Innovation of Medical Equipment and Devices (CIMEDs), Faculty of
Engineering, Universitas Gadjah Mada

Volume 3, No. 2, December 2021

JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN AND TESTING

Volume 3, No. 2, December 2021

Daftar Isi

Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Diameter dan Jumlah Lubang Perforasi Terhadap Kekuatan <i>Tubing Liner</i> Pada Unit <i>Sand Control</i>.....	
A. Akhmadiansyah dan I. M. Miasa	68-82
Akurasi dan Produktivitas Mesin <i>Laser Cutting</i> untuk Memproduksi Alat Pelindung Diri (APD) Covid-19	
S. Slamet, S. Harmoko, Hariyanto dan Suyitno	83-92
Kajian Aspek Ergonomi <i>Face Shield</i> untuk Covid-19	
S. Slamet1, A. Sokhibi, S. Harmoko, Hariyanto, Suyitno	93-102
Analisa Perbandingan Kekuatan Profil Padeye Berdasarkan Desain Standara DNV dan BS-EN Studi Kasus: <i>Cargo Carrying Unit</i>.....	
F. Noviantoro dan I.Kusumaningtyas	103-117
Studi CFD mengenai Pengaruh Sifat Fisis Fluida terhadap Karakteristik <i>Counter-Current Flow Limitation</i> pada Pipa Horizontal.....	
A S. Pratama, Indarto dan Deendarlianto	118-132
<i>A Structural Design of COVID-19 Patient Lifting Device Using Crane and Hydraulic Mechanism</i>.....	
D.C. Hardiyasanti, S. Widianingrum, F. Bestiara, M. Syaroh and F. Triawan	133-147

EDITORIAL

Selamat datang di edisi Desember 2021 Journal Mechanical Design and Testing. Jurnal ini berusaha menjadi penghubung bagi para peneliti dan rekayasawan dengan masyarakat industri maupun academia. Jurnal ini menjadi media diseminasi bidang desain komponen dan sistem mekanikal dan termal, simulasi dengan computer bidang keteknikan, teknologi manufaktur, pengujian kinerja komponen dan sistem mekanikal dan termal, hasil-hasil riset terbaru bidang mekanikal dan termal, dan perkembangan metode pembelajaran bidang mekanikal dan termal.

Tulisan pada jurnal ini bisa menjadi solusi dalam berbagai permasalahan di industri dan academia. Selain itu bisa menjadi catatan perkembangan keilmuan bidang mekanikal dan termal. Dengan semakin maraknya program-program penelitian yang ada di dunia akademik, maka jurnal ini menjadi semakin dibutuhkan terutama dalam kaitanya sebagai dokumen ilmiah. Bagi dunia industri yang juga memerlukan dokumentasi terbuka ke publik, jurnal ini juga merupakan pilihan.

Edisi ini mencakup enam makalah. Mereka merupakan makalah yang sudah diseleksi oleh editor dan dibaca oleh mitra bertari dan disempurnakan oleh penulis. Isi makalah ini merupakan hasil kerja akademik yang layak untuk masuk dalam jurnal dan bisa menjadi referensi bidang mekanikal dan termal. Ruang-ruang penyempurnaan masih terbuka luas, terutama berkait dengan kualitas dan kedalaman kajian yang dituliskan dalam makalah. Dengan berjalanya waktu, penyempurnaan itu akan menjadikan jurnal dan penulisnya menjadi semakin matang.

Editor mengucapkan terima kasih kepada banyak pihak yang memungkinkan jurnal ini bisa terbit, terutama penulis, mitra bertari, dewan editor dan tim pelaksana penerbitan.

Dr. Suyitno
Editor-in-chief

Tim Editor dan Reviewer

Editor-in-chief:

Suyitno, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Section editor:

Budi Arifvianto, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Muhammad Akhsin Muflikhun, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Reviewer/Mitra bestari:

1. Ardi Wiranata, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.
2. Indraswari Kusumaningtyas, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.
3. I Gusti Dharma, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.
4. Titis Wijayanto, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.
5. Rini Dharmastiti, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.
6. Rachmadi Norcahyo, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.
7. Muslim Mahardika, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.

Tata letak dan sampul:

Fitri Untari

Dikelola dan Diterbitkan Oleh:

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada dan Centre for Innovation of Medical Equipment and Devices (CIMEDs), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Website: <https://jurnal.ugm.ac.id/jmdt>

email: jmdt@ugm.ac.id

Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Diameter dan Jumlah Lubang Perforasi Terhadap Kekuatan *Tubing Liner* Pada Unit *Sand Control*

A. Akhmadiansyah* dan I. M. Miasa

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No.2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia,
Telp. (0274) 521673
*E-mail: gus.tom56@gmail.com

Abstrak

Penambahan lubang perforasi pada *tubing liner* dengan variasi ukuran diameter dan jumlah lubang menjadikan rasio area perforasi meningkat. Dengan rasio area perforasi meningkat tentunya secara profit dapat menambah hasil produksi, namun juga berpotensi dapat menurunkan kekuatan material karena hilangnya sejumlah massa material. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai tegangan (σ) dan konsentrasi (Kt) serta variasi perforasi yang memiliki nilai kekuatan sesuai standar. Penelitian berupa studi eksperimental dan numerik untuk menghasilkan model *tubing liner* berbahan material dan komponen buatan dalam negeri dengan memanfaatkan *raw* material hasil sumber daya alam Indonesia. Pengujian eksperimental dengan menggunakan material pipa tahan karat *stainless steel* 304 melalui metode uji tarik (*tensile test*) dan uji tekan (*compressive test*). Pengujian ini untuk mendapatkan nilai tegangan (σ) dan regangan (ϵ) material uji. Secara paralel, simulasi analisis elemen hingga juga dilakukan guna memperoleh data *output* yang kemudian divalidasi dengan hasil pengujian. Hasil penelitian menunjukkan material pipa *tubing stainless steel* 304 pada pengujian memiliki nilai tegangan luluh sebesar 364,3 MPa, tegangan tarik maksimum sebesar 597,45 MPa, dan tegangan tekan maksimum sebesar 701,83 MPa, dengan demikian material tubing telah memenuhi standar AISI 304 ASTM A240. Nilai faktor konsentrasi tegangan (Kt) meningkat dari 1,12 hingga 2,39 dan menyebabkan nilai tegangan (σ) pada material semakin berkurang. Faktor konsentrasi tegangan (Kt) yang terjadi dapat menurunkan kekuatan struktur material. Penambahan lubang perforasi pada eksperimen uji tarik menurunkan nilai tegangan sebesar 4,15% dan pada uji tekan sebesar 30,6%. Kombinasi jumlah dan diameter perforasi yang terbaik pada penelitian adalah pada spesimen berdiameter lubang 10 mm karena memberikan nilai tegangan maksimum diatas nilai standar ASTM A240.

Kata kunci : *Tubing liner, Eksperimental, Numerik, Konsentrasi tegangan.*

Abstract

The addition of perforation holes in the tubing liner with variations in diameter and number of holes increases the perforation area ratio. By increasing the perforation area ratio, of course it can profitably increase the yield, but also has the potential to reduce the strength of the material due to the loss of a certain amount of material mass. This study aims to determine the effect on the value of stress (σ) and concentration (Kt) as well as the variation of perforations which still

have a standard strength value. The research is in the form of experimental and numerical studies to produce a tubing liner model made from domestically made materials and components by utilizing raw materials from Indonesia's natural resources. Experimental testing using stainless steel 304 pipe material through the tensile and compressive test methods. This test is to obtain the value of stress (σ) and strain (ϵ) of the test material. In parallel, finite element analysis simulations are also carried out in order to obtain output data which is then validated with test results. The results showed that the 304 stainless steel tubing pipe material on the test had a yield stress value of 364.3 MPa, a maximum tensile stress of 597.45 MPa, and a maximum compressive stress of 701.83 MPa, thus the tubing material had met the AISI 304 ASTM standard A240. The value of the stress concentration factor (K_t) increases from 1.12 to 2.39 and causes the stress value (σ) in the material to decrease. The stress concentration factor that occurs can reduce the strength of the material structure. The addition of perforation holes in the tensile test experiment decreased the stress value by 4.15% and in the compressive test by 30.6%. The best combination of number and diameter of perforations in the test is a specimen with a hole diameter of 10 mm because it provides a maximum stress value above the ASTM A240 standard value.

Keywords : Tubing liner, Experimental, Numerical, Stress concentration.

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan data pekerjaan ulang sumur (*workover*) tahun 2017 di salah satu wilayah eksplorasi minyak bumi di Provinsi Riau, ditemukan sekitar 21% dari semua jumlah *workover* berkaitan dengan macetnya pompa, abrasi pompa dan *plugging* perpipaan akibat *debris* dan pasir. Penyebab utama timbulnya permasalahan tersebut berhubungan dengan masalah produksi pasir atau kepasiran. Permasalahan ini terjadi akibat terbawanya pasir dari lapisan formasi reservoir minyak bumi ke dalam saluran masuk pompa *plunger* yang ada di dalam sistem pompa angguk. Seiring waktu pasir formasi tersebut sebagian terakumulasi dan menumpuk di dalam *barrel* pompa dan sebagian lainnya terbawa aliran menuju pipa saluran produksi. Tumpukan pasir di dalam *barrel plunger* pompa tersebut menyebabkan pompa mengalami keausan berlebih atau bahkan kemacetan.

Metode *sand control* pada sumur produksi migas di Indonesia merupakan upaya mitigasi permasalahan produksi pasir. Salah satu metode *sand control* yang diaplikasikan adalah dengan menggunakan *sand screen* yang ditempatkan di depan perforasi untuk mencegah dan menyaring pasir dari lubang perforasi. *Screen* tersebut dipasang pada struktur penopang yaitu *tubing liner* yang juga berfungsi sebagai media filtrasi aliran hidrokarbon. Saat ini ketersediaan perangkat *tubing liner*, *sand screen* dan *metal screen* masih mengandalkan perangkat impor, sehingga menyebabkan adanya waktu tunggu yang relatif lebih lama. Hal ini menjadi kendala dalam proses perawatan sumur, khususnya dalam kasus-kasus yang membutuhkan penanganan segera. Inilah yang menjadi dasar pertimbangan tema penelitian, mengingat Indonesia memiliki sumber daya penghasil *raw material* yang menjadi bahan baku unit *tubing liner*. Fokus penelitian pada pengujian beberapa sampel *tubing liner* yang menggunakan pipa *stainless steel* 304 yang telah diperforasi. Penelitian ini berupa studi numerik yang divalidasi secara eksperimental meliputi tahapan uji tarik dan tekan pada material dan analisis elemen hingga dengan simulasi perangkat lunak.

Produksi pasir formasi ini adalah masalah yang sangat menantang hingga berakhirnya masa produksi reservoir dan sumur. Produksi pasir juga dapat membatasi laju alir produksi, sehingga menyebabkan kerugian ekonomis. Setiap kali terdapat kekhawatiran tentang produksi

pasir di sumur yang sedang dikembangkan, manajemen dan *sand control* adalah tindakan utama yang harus diambil (Mahmud dkk., 2020). Perbandingan indeks kinerja secara individu dan komprehensif pada *mechanical screen* dengan tipe yang berbeda, menjadi sangat penting dalam evaluasi dan optimasi reservoir migas tertentu, serta akan menentukan efek akhir dari penanganan kepasiran dan umur pakai *mechanical screen* (Dong dkk., 2017). Teknik *sand control* yang paling umum untuk memaksimalkan produksi hidrokarbon adalah dengan memasang peralatan yang mencegah pasir formasi memasuki sumur. Sebagai *barrier* mekanis, *sand screen* menahan benda solid agar tidak mengalir bersama fluida reservoir. Bagaimanapun, partikel pasir bulat tidak akan mengalir terus menerus melalui lubang *tubing* dengan lebar diameter partikel yang sama, saat mengalir dalam konsentrasi yang sesuai (Penberthy dkk., 1992).

Pengembangan baru perangkat *sand control* canggih berbasis material keramik berhasil diperkenalkan dan difungsikan secara penuh di sumur GA-016 lapangan minyak Gaiselberg. *Screen* menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam hal stabilitas produksi pada tingkat yang diharapkan, dimana kondisi lubang perforasi di sekitar *screen* stabil meskipun reservoir *unconsolidated*. Tidak ditemukan adanya penyumbatan serta tidak ada erosi yang terjadi seperti yang diharapkan. Instalasi tersebut terbukti sederhana dan hemat biaya. Dengan pemasangan *sand screen* keramik di GA-016 terjadi peningkatan yang signifikan dalam kinerja produksi dan umur panjang peralatan produksi telah tercapai (Wildhack dkk., 2012).

Kerusakan pipa *casing* yang tidak normal, terutama pada pipa berlubang merupakan masalah serius dalam proses eksplorasi dan pengembangan ladang minyak (Wang dkk., 1994). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kekuatan pipa *casing* dapat berkurang karena disebabkan oleh adanya perforasi. Pipa *casing* berlubang dengan beberapa lubang bundar pada permukaan silinder memiliki retak mikro di tepi lubang. Eksperimen diperlukan untuk mengukur konsentrasi tegangan dari pipa *casing* tersebut (Dou dkk., 2019). *Axially Perforated Tube* (APT) berperforma lebih baik dari *Diagonal Perforated Tube* (DPT) pada kompresi aksial. Beberapa parameter yang mempengaruhi perilaku kompresi aksial dari GFRP diantaranya diameter lubang, diameter tabung/*tube*, pola perforasi dan jarak lubang melintang. Rasio deformasi pada GFRP tanpa lubang bernilai 1, sementara pada APT bernilai 0,78 dan pada DPT bernilai 0,66 (Wang dkk., 2014). Pada *screen/slotted liner* di sumur geotermal harus memiliki struktur yang stabil dengan kondisi pembebanan yang terinduksi secara termal. Tujuannya untuk menjaga lubang sumur tetap stabil dan mencegah masuknya serpihan. Desain *screen/slotted liner* dengan metode elemen hingga akan memastikan bahwa liner memberikan hasil dengan area aliran maksimal dan reduksi kekuatan yang minimum dibandingkan dengan liner utuh (Yang dkk., 2018). Lubang pada struktur menjadi permasalahan serius karena dapat memicu lonjakan konsentrasi tegangan yang mengakibatkan retak pada struktur. Untuk memprediksi faktor konsentrasi tegangan pada pelat isotropik berlubang dengan *pin-loaded* menggunakan metode numerik dan simulasi menggunakan *software Patran/Nastran* (Hartini, 2017).

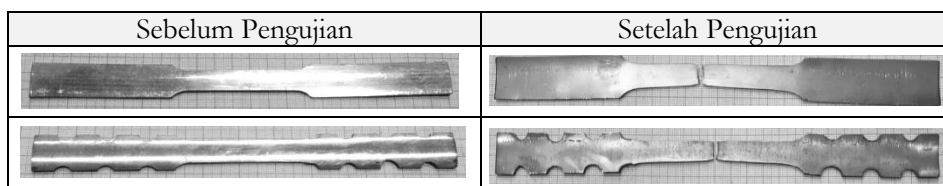
Penulis berharap penelitian ini dapat memberi solusi produk alternatif *tubing liner* yang terjangkau dan memiliki kekuatan yang baik sebagai struktur pada unit *sand control*. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh nilai tegangan maksimum dan luluh material, menganalisis pengaruh penambahan lubang perforasi terhadap kekuatan material dan nilai konsentrasi tegangan yang dihasilkan.

2. METODE PENELITIAN

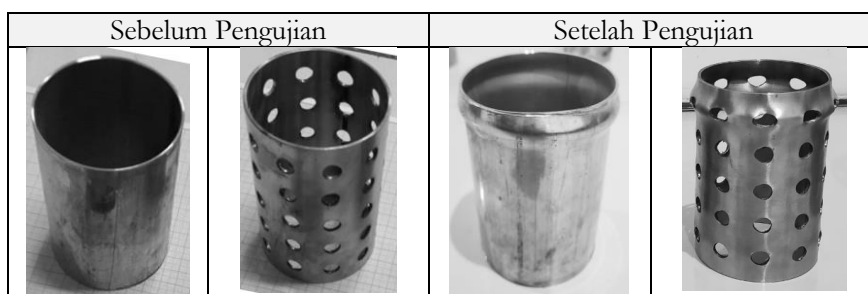
Penelitian ini diawali dengan pembuatan spesimen uji untuk pengujian tarik dan tekan. Pengujian tarik ini menggunakan spesimen uji dengan dimensi mengacu pada ASTM E8,

sementara pada pengujian tekan mengacu pada ASTM E9. Pemodelan *module part 3* dimensi dibuat menggunakan perangkat lunak *Autodesk Inventor 2019* dengan ukuran dan geometri yang sesuai dengan spesimen uji. Setelah *output file* dari hasil pemodelan *.ipt* diperoleh, selanjutnya dilakukan simulasi *finite element* menggunakan perangkat lunak *Abaqus 6.13*. Hasil simulasi lalu dianalisis dan divalidasi dengan hasil eksperimen pada Tabel 1 dan 2. Langkah pengujian berikutnya yaitu melakukan simulasi kembali dengan memvariasikan ukuran diameter dan jumlah lubang perforasi pada *tubing liner* untuk dianalisis kembali hasilnya.

Tabel 1 Spesimen Bahan Uji Tarik



Tabel 2 Spesimen Bahan Uji Tekan

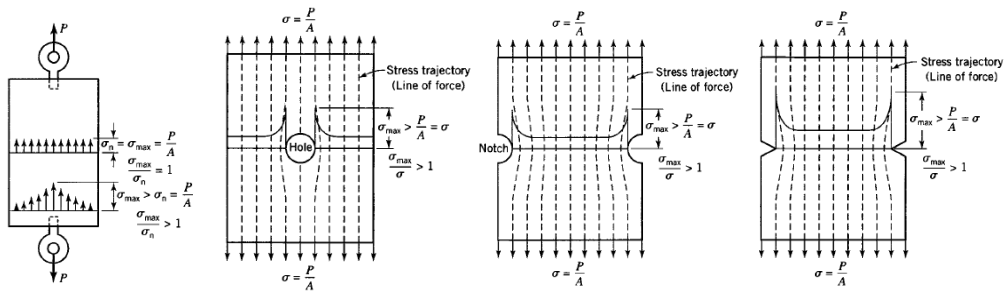


Bentuk lekukan-lekukan pada spesimen dikarenakan potongan melintang aksial pada spesimen dengan lubang perforasi. Semakin besar ukuran diameter lubang maka akan menambah luas area perforasi pada *tubing liner*. Pada Tabel 3 adalah detail variasi dan ukuran spesimen yang dibuat.

Tabel 3 Variasi dan Ukuran Spesimen

Label Spesimen	Keterangan	Diameter Lubang Perforasi (mm)	Diameter Luar Pipa (mm)	Jumlah Lubang	Luas Area Tube (mm ²)	Luas Area Perforasi (mm ²)	Persen Perforasi (%)
TL_1A	Spesimen tanpa lubang perforasi	0	76,56	0	28874,06	0	0
DL_1A	Spesimen dengan lubang 10 mm	10	75,82	50	28594,97	3928,57	13,74
DL_1B	Spesimen dengan lubang 15 mm	15	75,82	50	28594,97	8839,28	30,91
DL_1C	Spesimen dengan lubang 20 mm	20	75,82	40	28594,97	12571,43	43,96

Nilai konsentrasi tegangan K_t adalah perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan nominal pada penampang spesimen (Palmiyanto, 2011).



Gambar 1 Konsentrasi dan Arah Tegangan (Borensi, 2003)

Nilai konsentrasi ini tergantung pada orientasi retak dan geometri spesimen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 di atas.

2.1 Model Matematika

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai tegangan, regangan dan modulus elastisitas adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

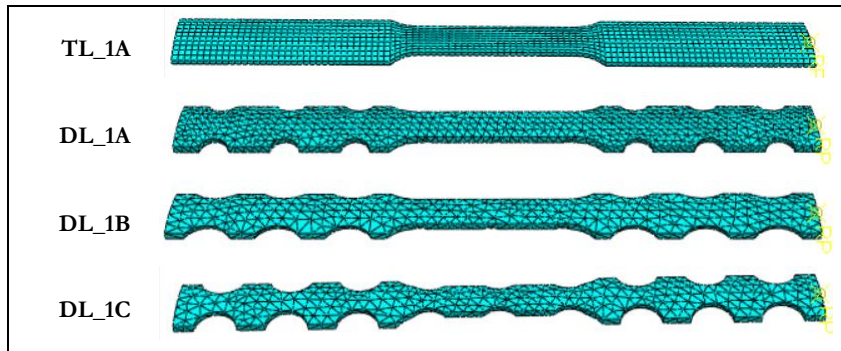
Dimana σ = tegangan, F = gaya tarik atau tekan, A_0 = luas penampang awal, ϵ = regangan, E = modulus elastisitas, L = panjang setelah ditarik, L_0 = panjang awal atau mula. Untuk nilai konsentrasi tegangan dapat dihitung dengan persamaan rumus berikut:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \quad (4)$$

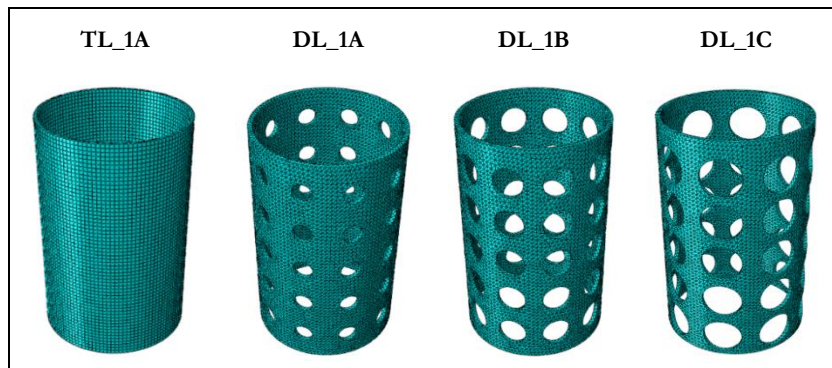
Dengan K_t = faktor konsentrasi tegangan, σ_m = tegangan maksimum dan σ_0 = Tegangan nominal.

2.2 Pembuatan Part dan Pemodelan

Proses *meshing* dilakukan menggunakan aplikasi *mesh* yang sudah termasuk dalam paket *software Abaqus 6.13*. Tipe mesh yang digunakan adalah *mesh hexahedral* dan *tetrahedral* seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah. Proses *meshing* sangat mempengaruhi hasil akhir dari suatu simulasi, sehingga *grid independence test* dilakukan untuk mendapatkan minimum jumlah *node* dan *element* agar dapat mengurangi beban komputasi dengan parameter *input* dan *output* secara berturut-turut adalah variasi ukuran *mesh*. Gambar 2 dan 3 menunjukkan hasil *part meshing* pada simulasi.



Gambar 2 Part Meshing Pada Spesimen Uji Tarik



Gambar 3 Part Meshing Pada Spesimen Uji Tekan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada dua variasi spesimen *tubing liner* yaitu spesimen tanpa lubang perforasi dan dengan lubang perforasi berukuran 10 mm. Data hasil pengujian di laboratorium, kemudian dihitung dengan persamaan di bawah. Pada uji tarik spesimen diberikan gaya tarik maksimum hingga putus atau *break*. Sementara untuk uji tekan diberikan gaya tekan maksimum hingga terjadi kondisi deformasi.

3.1. Perhitungan Pada Uji Tarik dan Uji Tekan

Dari data pengujian diperoleh nilai F maksimum dan nilai panjang akhir L pada spesimen setelah pengujian. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai besaran tegangan dan regangan, sebagaimana persamaan (1) dan (2) berikut ini:

$$\sigma_{TL_{1A}} = \frac{F}{A_o} = \frac{F}{W \times T}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{TL_{1A}} &= \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{17,5 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 0,350 = 35,0 \% \\ &= \frac{11,79 \text{ kN}}{12,65 \text{ mm} \times 1,56 \text{ mm}} = 597,45 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{DL_1A} = \frac{F}{A_o} = \frac{F}{W \times T}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{DL_1A} &= \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{21,3 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 0,426 = 42,6 \% \\ &= \frac{15,88 \text{ kN}}{12,72 \text{ mm} \times 2,18 \text{ mm}} = 572,67 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dari nilai F maksimum yang diperoleh, maka perhitungan nilai tegangan untuk hasil uji tekan adalah sebagai berikut:

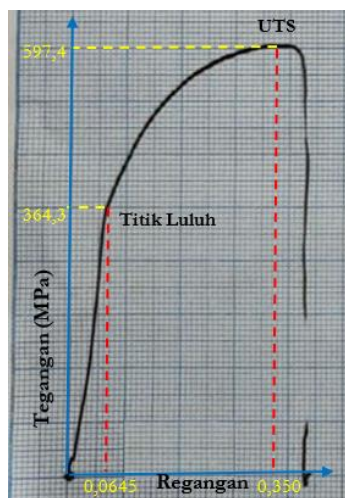
$$\begin{aligned} \sigma_{TL_1A} &= \frac{F}{A_o} = \frac{F}{\left(\frac{\pi}{4} d1^2\right) - \left(\frac{\pi}{4} d2^2\right)} \\ &= \frac{130,26 \text{ kN}}{185,6 \text{ mm}^2} = 701,83 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{DL_1A} &= \frac{F}{A_o} = \frac{F}{\left(\frac{\pi}{4} d1^2\right) - \left(\frac{\pi}{4} d2^2\right)} \\ &= \frac{124,62 \text{ kN}}{255,77 \text{ mm}^2} = 487,23 \text{ MPa} \end{aligned}$$

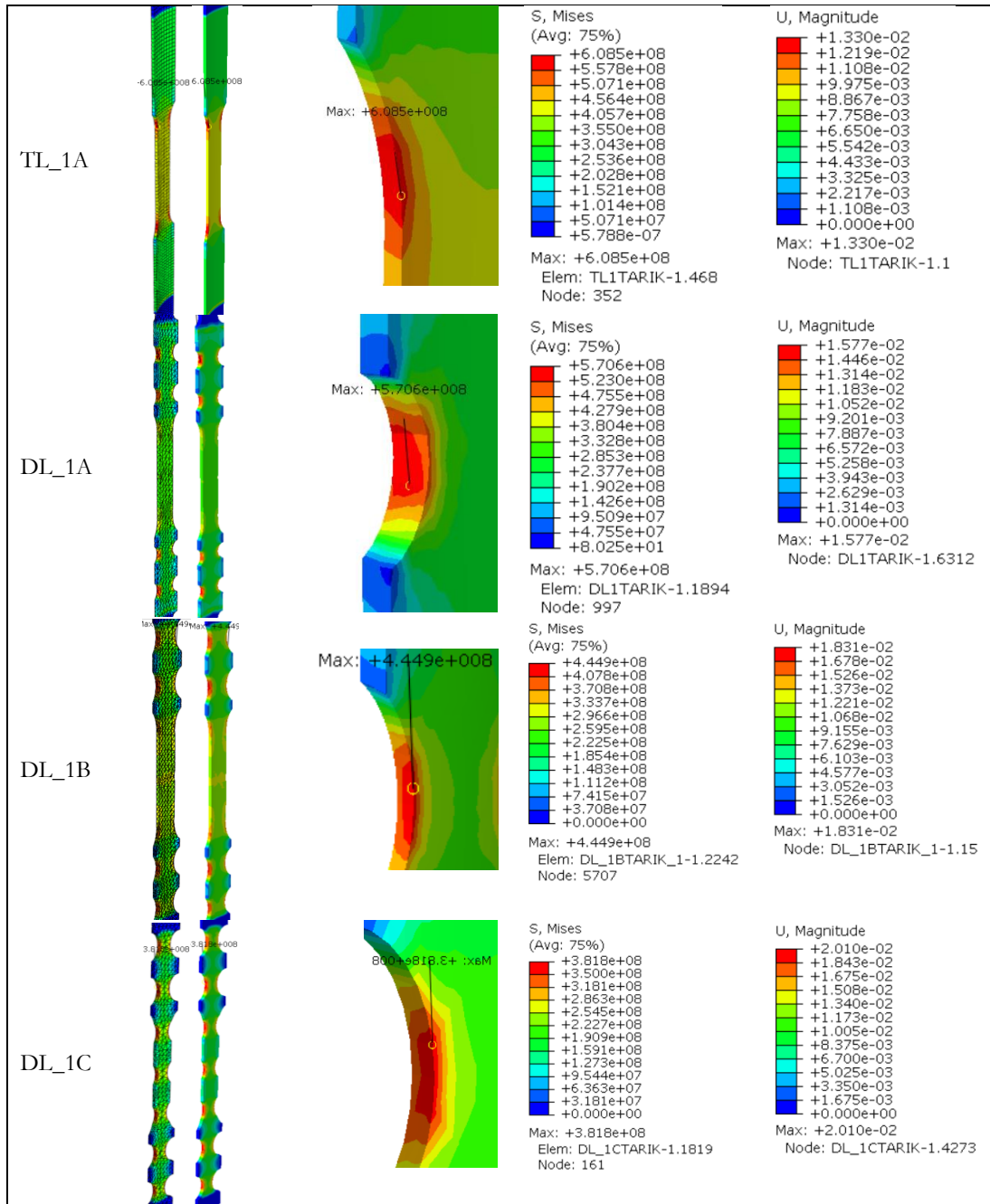
3.2. Simulasi Pada Pemodelan Variasi Uji Tarik

Pada proses simulasi nilai modulus elastisitas atau *young modulus* dari hasil plot grafik kurva tegangan regangan eksperimen pada Gambar 4 dimasukkan pada *sub* menu *module material*. Berikut ini adalah perhitungan sesuai persamaan (3) untuk nilai modulus elastisitas. Hasil simulasi pada Gambar 5.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{364,3 \text{ MPa}}{0,0645} = 5648 \text{ Mpa}$$



Gambar 4. Kurva Tegangan Regangan Uji Tarik

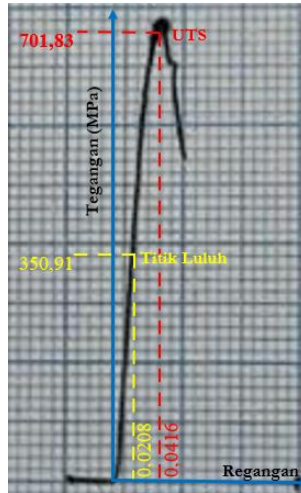


Gambar 5. Hasil Simulasi Variasi Uji Tarik

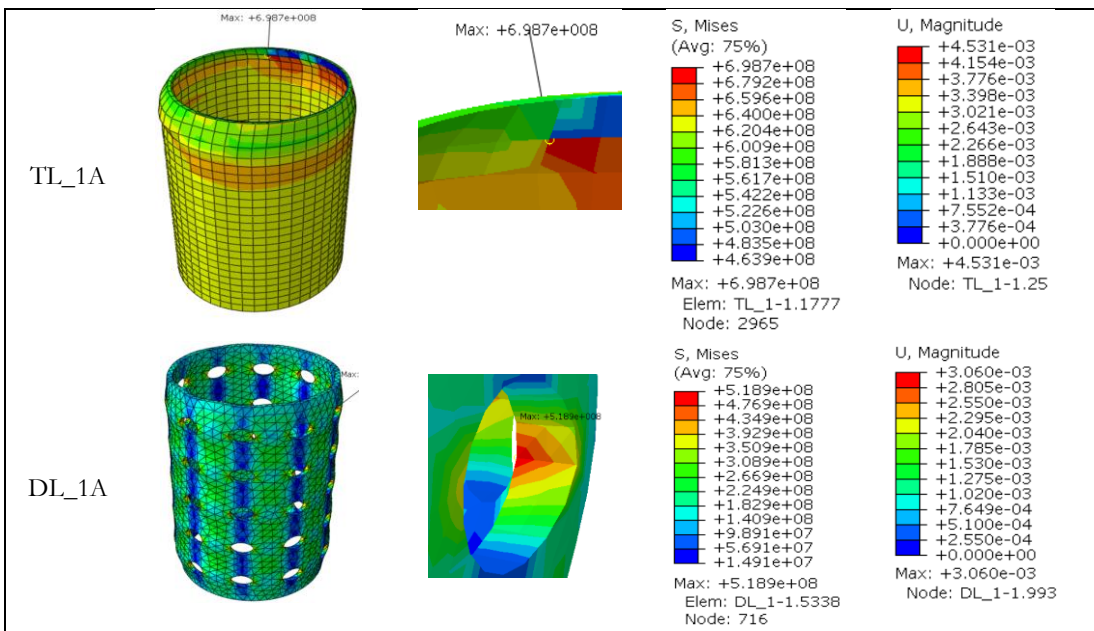
3.3. Simulasi Pada Pemodelan Variasi Uji Tekan

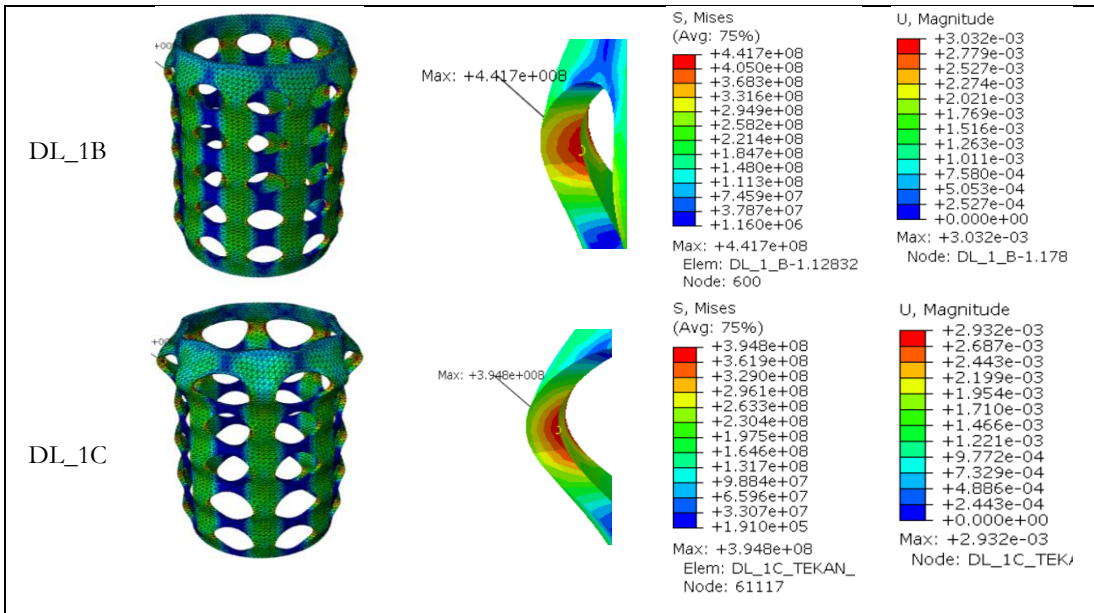
Perhitungan nilai modulus elastisitas, dari hasil plot grafik kurva tegangan regangan eksperimen pada Gambar 6 dimasukkan pada *sub* menu *module material*. Di bawah ini adalah perhitungan untuk nilai modulus elastisitas. Hasil simulasi pada Gambar 7.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{350,91 \text{ MPa}}{0,0208} = 16871 \text{ Mpa}$$



Gambar 6. Kurva Tegangan Regangan Uji Tekan

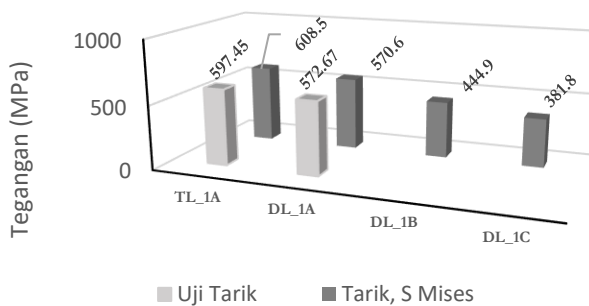




Gambar 7. Hasil Simulasi Variasi Uji Tekan

3.4. Analisis Hasil

Pada pengujian tarik, yang menjadi fokus perhatian adalah kemampuan maksimum spesimen dalam menahan beban atau gaya. Kemampuan ini umumnya disebut *Ultimate Tensile Strength* (UTS), atau tegangan tarik maksimum. Berdasarkan pengujian secara eksperimental maupun dengan pemodelan elemen hingga, diperoleh data-data sebagai berikut. Pada Tabel 4 dan Gambar 6, nilai tegangan mengalami penurunan seiring adanya penambahan lubang dan ukuran perforasi. Selisih atau *error* yang dihasilkan pada pengujian ini pada kisaran 0,36 – 1,85 persen. Dapat dikatakan antara pengujian eksperimental dan simulasi keduanya memiliki hasil yang cukup valid.



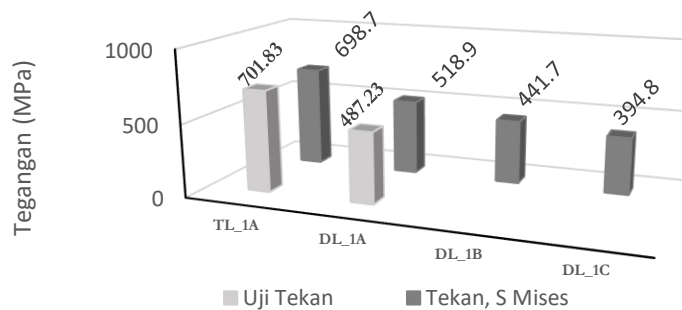
Gambar 6 Grafik Tegangan Hasil Eksperimen dan Simulasi Tarik

Tabel 4 Nilai Tegangan Hasil Pengujian dan Simulasi Tarik

No	Spesimen	Hasil Uji Tarik	Simulasi Tarik, S Mises
1	TL_1A	597.45	608.5
2	DL_1A	572.67	572.67
3	DL_1B	570.6	570.6
4	DL_1C	444.9	381.8

		Tegangan (MPa)	Tegangan (MPa)	Error (%)
1	TL_1A (d=0 mm)	597,45	608,5	1,85
2	DL_1A (d=10mm)	572,67	570,6	0,36
3	DL_1B (d=15mm)	-	444,9	-
4	DL_1C (d=20mm)	-	381,8	-

Pada eksperimen uji tekan maupun simulasi, spesimen diuji dalam bentuk geometri silinder utuh. Perbandingan hasil uji tekan dengan hasil simulasi memiliki nilai selisih yang kecil pada spesimen TL_1A sebesar 0,45 %. Sementara pada spesimen DL_1A terdapat selisih sebesar 6,5 % untuk nilai *Stress Von Mises*. Tabel 5 dan grafik untuk hasil uji tekan beserta simulasi seperti pada Gambar 7 berikut ini



Gambar 7 Grafik Tegangan Hasil Eksperimen dan Simulasi Tekan

Tabel 5 Nilai Tegangan Hasil Pengujian dan Simulasi Tekan

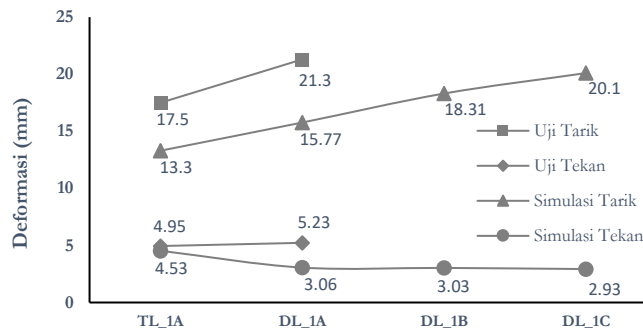
No	Spesimen	Hasil Uji Tekan	Simulasi Tekan, S Mises	
		Tegangan (MPa)	Tegangan (MPa)	Error (%)
1	TL_1A (d=0 mm)	701,83	698,7	0,45
2	DL_1A (d=10mm)	487,23	518,9	6,50
3	DL_1B (d=15mm)	-	441,7	-
4	DL_1C (d=20mm)	-	394,8	-

Pada pengujian eksperimental maupun pemodelan diperoleh nilai deformasi yang menunjukkan perubahan bentuk atau panjang dari suatu spesimen. Deformasi pada pengujian eksperimental dapat dideteksi lewat pengukur regangan (*strain gauge*), *grip length recorder* atau dapat diukur secara *manual marking*. Sedangkan pada pemodelan elemen hingga, maka nilai deformasi dihasilkan dari proses kalkulasi menggunakan algoritma dan iterasi dalam perangkat lunak tersebut. Pada Tabel 6 berisi data nilai deformasi pada setiap pengujian.

Tabel 6 Nilai Deformasi Hasil Eksperimen dan Simulasi

No	Spesimen	Hasil Uji Tarik	Simulasi Tarik, U		Hasil Uji Tekan	Simulasi Tekan, U	
		Nilai (mm)	Nilai (mm)	Deviasi	Nilai (mm)	Nilai (mm)	Deviasi
1	TL_1A (d= 0mm)	17,5	13,30	24 %	4,95	4,53	8,4 %
2	DL_1A (d=10mm)	21,3	15,77	26 %	5,23	3,06	41 %
3	DL_1B (d=15mm)	-	18,31	-	-	3,03	-
4	DL_1C (d=20mm)	-	20,10	-	-	2,93	-

Nilai deformasi pada hasil simulasi uji tarik bertambah seiring dengan penambahan ukuran diameter lubang perforasi dari 13,30 mm hingga 20,10 mm. Sedangkan pada hasil simulasi uji tekan perubahan nilai deformasi menurun pada kisaran 0,4-2 mm. Perbandingan nilai deformasi pada hasil pengujian dan simulasi dapat dilihat pada Gambar 8 di bawah ini.



Gambar 8 Grafik Deformasi Hasil Eksperimen dan Simulasi

Deviasi atau *error* yang dihasilkan antara pengujian dengan simulasi pada beberapa variasi pemodelan, memiliki beberapa penyebab diantaranya:

1. Pembuatan ukuran lubang yang tidak akurat atau inkonsisten pada proses *machining* ditemukan hingga kisaran 0,5-1,5 mm (*manual milling / drill*). Sementara untuk desain pemodelan dengan perangkat lunak memiliki ukuran lubang yang sama dan konsisten.
2. Jarak antar lubang pada spesimen uji memiliki deviasi hingga kisaran 0,5 – 3,0 mm. Sedangkan pada pemodelan dengan perangkat lunak memiliki jarak yang sama.
3. Pada alat uji di laboratorium tidak terdapat *mounting grip* atau *chuck* yang dapat memfasilitasi pengujian tarik secara utuh dalam bentuk silinder. Geometri pada spesimen memiliki pengaruh dan hasil yang berbeda antara spesimen sesuai standar ASTM E8 dengan spesimen bentuk silinder.

3.5. Analisis Faktor Konsentrasi Tegangan

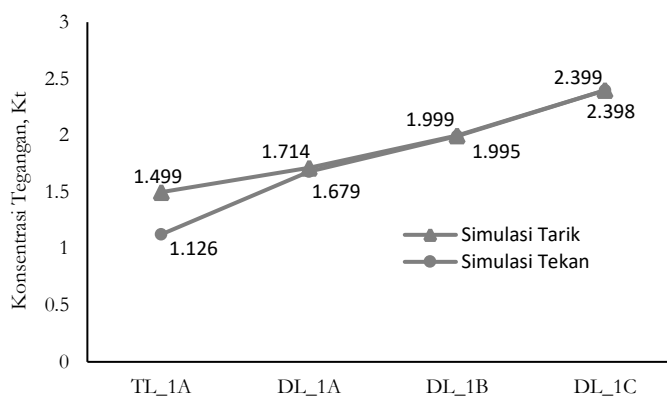
Faktor konsentrasi tegangan K_t sebagai akibat adanya penambahan lubang perforasi pada *surface tubing* atau pipa dapat dihitung dengan persamaan rumus (4). Nilai tegangan nominal atau tegangan rata-rata diperoleh dari distribusi tegangan yang ditunjukkan oleh warna dominan

pada *contour interval* spektrum warna *deformed shape*. Pada Tabel 7 berikut ini ditunjukkan nilai konsentrasi tegangan untuk setiap spesimen hasil simulasi.

Tabel 7 Nilai Konsentrasi Tegangan Hasil Simulasi

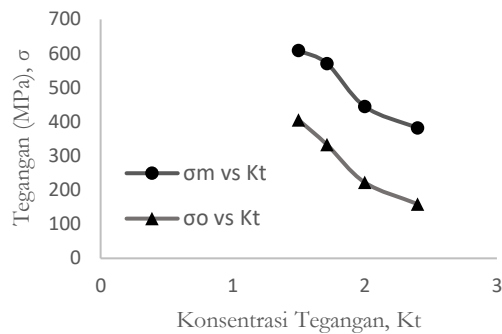
No	Spesimen	K_t , Simulasi Uji Tarik			K_t , Simulasi Uji Tekan		
		σ_m	σ_0	K_t	σ_m	σ_0	K_t
		(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	
1	TL_1A (d= 0 mm)	608,5	405,7	1,499	698,7	620,4	1,126
2	DL_1A (d=10mm)	570,6	332,8	1,714	518,9	308,9	1,679
3	DL_1B (d=15mm)	444,9	222,5	1,999	441,7	221,4	1,995
4	DL_1C (d=20mm)	381,8	159,1	2,399	394,8	164,6	2,398

Pada hasil simulasi dapat dianalisis bahwa penambahan lubang di area *surface* berpengaruh pada meningkatnya nilai konsentrasi tegangan, seiring bertambahnya ukuran diameter dan jumlah lubang maka nilainya bertambah pula. Nilai K_t pada spesimen TL tanpa lubang secara berurutan sebesar 1,499 dan 1,126 pada hasil simulasi tarik dan tekan. Nilai ini bertambah menjadi 2,399 dan 2,398 pada spesimen DL_1C dengan diameter lubang dan luas area perforasi paling besar. Grafik pada Gambar 9 menunjukkan perubahan nilai konsentrasi tegangan K_t terhadap jenis spesimen yang disimulasi.

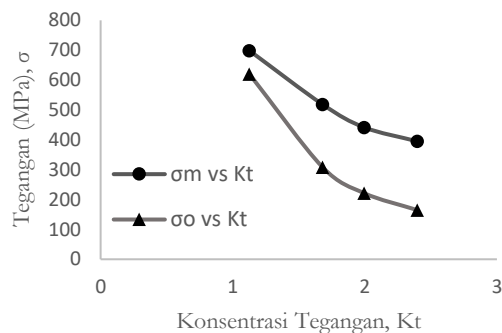


Gambar 9 Grafik Konsentrasi Tegangan Hasil Simulasi

Dengan meningkatnya nilai konsentrasi tegangan berdampak pada menurunnya nilai tegangan maksimum dan kekuatan material *tubing liner*, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11 berikut.



Gambar 10. Grafik Tegangan Terhadap Nilai Kt Pada Simulasi Uji Tarik



Gambar 11. Grafik Tegangan Terhadap Nilai Kt Pada Simulasi Uji Tekan

4. KESIMPULAN

Pengujian eksperimental pada material pipa *tubing liner* dengan penambahan lubang perforasi berdiameter 10 mm berpengaruh terhadap berkurangnya nilai σ_y sebesar 35 % dari 364,3 MPa menjadi 234,27 MPa, nilai σ_m uji tarik 4,15% dari 597,45 Mpa menjadi 572,67 MPa dan nilai σ_m uji tekan 30,6 % dari 701,83 Mpa menjadi 487,23 MPa.

Validasi basis hasil eksperimen terhadap hasil simulasi uji tarik memiliki selisih atau error sebesar 0,36 % untuk spesimen TL_1A dan 1,85 % untuk spesimen DL_1A, maka dapat disimpulkan hasil validasi adalah baik (<5%). Sementara validasi basis eksperimen terhadap hasil simulasi uji tekan memiliki nilai error yang kecil pada spesimen TL_1A sebesar 0,45 %, sementara pada spesimen DL_1A terdapat selisih sebesar 6,5 %, maka dari itu hasil validasi dapat diterima atau *accepted* (5%-10%).

Penambahan perforasi secara aksial dengan variasi lubang berdiameter 10 mm, 15 mm dan 20 mm menyebabkan naiknya persen area perforasi dan terjadinya konsentrasi tegangan pada area sekitar lubang. Hal tersebut dapat meningkatkan nilai faktor konsentrasi tegangan (Kt) dari 1,12 hingga 2,39 dan menyebabkan nilai tegangan *Von Mises* material semakin menurun. Pada simulasi uji tarik nilainya secara berurutan 608,5 MPa, 570,6 MPa, 444,9 MPa dan 381,8 MPa. Pada simulasi uji tekan nilainya adalah 698,7 MPa, 518,9 MPa, 441,7 MPa dan 398,4 MPa.

Penelitian ini masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk mendapatkan data-data yang lebih lengkap. Penulis merekomendasikan untuk melakukan penelitian lebih lanjut,

misalnya pengujian tarik dilakukan dalam bentuk geometri utuh dengan skala yang sesuai dengan kapasitas alat, proses pemesinan dalam pembuatan lubang dikerjakan menggunakan mesin milling otomatis atau semiotomatis dengan hasil yang lebih presisi dan pemodelan variasi bentuk serta susunan perforasi guna mendapatkan kemampuan filtrasi yang lebih efektif namun tetap memiliki kekuatan bahan sesuai standar.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Boresi, A. P., and Schmidt R. J., 2003, *Advanced Mechanics of Materials*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Dong, C., Gao, K., Dong, S., Shang, X., Wu, Y., Zhong, Y., 2017, A New Integrated Method for Comprehensive Performance of Mechanical Sand Control Screens Testing and Evaluation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 158, 775-783.
- Dou, Y., Cao, Y., Li, M., Zhen, Y., 2019, Experimental and Theoretical Study on the Mechanical Characteristics of Perforated Casings, *Procedia Structural Integrity*, Volume 22, 33-42.
- Hartini, D., 2017, Analisis Elemen Hingga untuk Faktor Konsentrasi Tegangan Pada Pelat Isotropik Berlubang dengan Pin-Loaded, *Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, Volume 8(1), 69-78.
- Mahmud, H.B., Leong, V.H., Lestario, Y., 2020, Sand Production: A Smart Control Framework for Risk Mitigation, *Journal of Petroleum*, Volume 6(1), 1-13.
- Palmiyanto, M. H., 2011, Perbandingan Hasil Analisa Konsentrasi Tegangan Pada Plat Berlubang Akibat Beban Tarik Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga dan Kajian Eksperimen, *Jurnal Teknik ATW*, Edisi 8, 26-33.
- Penberthy, W. L., Shaughnessy, C. M., 1992, *Sand Control SPE Series*, Vol 1, Richardson, Texas.
- Wang, W., Sheikh, Md., Hadi, M., 2014, Behaviour of perforated GFRP tubes under axial compression, *Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Vancouver, 20-22 August.
- Wang, Z., Lu, W., Hu J., 1994, *Mechanism and Prevention of Casing Damage of Oil and Water Well in Oil Field*, Petroleum Press, Beijing.
- Wildhack S., Müssig S., Strahammer F., Leitner M., 2012, Sand Control with Ceramic Screens in Unconsolidated Reservoirs Demonstrated in The Mature Gaiselberg Oilfield, *Oil Gas European Magazine*, Volume 38, 74-78, <http://www.oilgaspublisher.de/de/og.html>.
- Yang, R., Huang, Z., Li, G., Shi, H., Song, X., Shi, Y., 2018, An Integrated Workflow to Design Screen/ Slotted Liners in Geothermal Wells, *Journal Geothermics*, Volume 72, 277-287.

Akurasi dan Produktivitas Mesin *Laser Cutting* untuk Memproduksi Alat Pelindung Diri (APD) Covid-19

S. Slamet^{1,*}, S. Harmoko¹, Hariyanto¹ dan Suyitno²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus

Kampus Gondang manis PO. Box 53, Bae-Kudus Telp/Fax: (0291) 438229 / 437198

²Centre for Innovation of Medical Equipments and Devices (CIMEDs), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mads

*E-mail: sugeng.slamet@umk.ac.id

Abstrak

Kebutuhan alat pelindung diri (APD) di masa pandemi Covid-19 terus mengalami peningkatan seiring dengan banyaknya permintaan pasar. Sementara itu ketersediaan APD relatif kurang dengan harga yang terus meningkat. Berbagai inovasi dan kreatifitas untuk menghasilkan APD dilakukan oleh kelompok masyarakat, akademisi dan praktisi untuk memproduksi APD baik secara konvensional maupun non konvensional dengan menggunakan mesin-mesin produksi. Mesin laser cutting Zaiku LS 6040 digunakan untuk membuat komponen APD face shield dan masker. Desain produk digambar menggunakan software CorelDraw version X7. Material face shield menggunakan plastik jenis Polyethylene terephthalate (PET) sebagai komponen topeng muka, sedangkan APD masker menggunakan bahan kain poliester ukuran 280 gsm (*gram per square meter*). Keakurasian dianalisis dengan cara memvalidasi ukuran antara gambar desain dengan ukuran potong mesin laser cutting. Produktivitas energi diukur dari jumlah produk yang dihasilkan terhadap pemakaian energi listrik. Hasil penelitian menunjukkan selisih antara ukuran desain dengan ukuran hasil potong sebesar 0,52 mm dengan deviasi 0,05 untuk PET dan 1,50 mm dengan deviasi 0,47 untuk kain Poliester. Terjadi peningkatan produktivitas energi tertinggi sebesar 22,03% dengan kenaikan konsumsi energi listrik 16,7% pada perubahan kecepatan potong 30 ke 40 mm/detik untuk pemotongan PET. Sedangkan untuk pemotongan bahan kain poliester terjadi peningkatan produktivitas tertinggi sebesar 20,8% dengan kenaikan konsumsi energi listrik 12,5% pada perubahan kecepatan potong 30 ke 45 mm/detik.

Kata kunci : *laser cutting, alat pelindung diri, akurasi, produktivitas energi.*

Abstract

The need for *personal protective devices* (PPD) during the Covid-19 pandemic increases with the significant market demand. Meanwhile, the availability of PPD is relatively lacking, with prices continuing to increase. Therefore, various innovations and creativity to produce PPD is carried out by community groups, academics, and practitioners to produce PPD conventionally and non-conventionally using production machines. The Zaiku LS 6040 laser cutting machine is used to manufacture PPD components for face shields and masks. The product design is drawn using *CorelDraw software*. Face shield material uses polyethylene terephthalate (PET) plastic as a component of face shields, while masks use polyester fabric with a size of 280 gsm (*grams per square meter*). Accuracy is analyzed by validating the size between the design drawing and the cutting size on the laser cutting machine. Energy productivity is measured by the amount of product produced against the use of electrical energy. The results showed that the difference

between design size and cut size was 0.52 mm with a deviation of 0.05 for PET and 1.50 mm with a deviation of 0.47 for polyester. Furthermore, there was an increase in the highest energy productivity of 22.03%, with an increase in electrical energy consumption of 16.7% at a change in cutting speed of 30 to 40 mm/sec for PET. As for polyester cutting, the highest productivity increase is 20.8%, with an increase in electrical energy consumption of 12.5% at a change in cutting speed of 30 to 45 mm/sec.

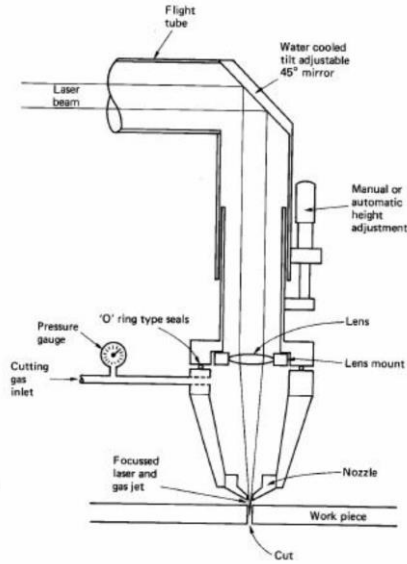
Keywords: laser cutting, personal protective device, accuracy, energy productivity.

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan Alat pelindung diri atau APD digunakan untuk melindungi diri dari berbagai ancaman kesehatan dan kecelakaan kerja. Berbagai alat pelindung diri dibuat dengan menyesuaikan lingkungan kerja. APD untuk pelindung saluran pernafasan merupakan seperangkat perlengkapan yang berfungsi untuk melindungi penggunanya dari bahaya atau gangguan kesehatan tertentu, misalnya infeksi virus atau bakteri. Bila digunakan dengan benar, APD akan mampu menghalangi masuknya virus atau bakteri ke dalam tubuh melalui mulut, hidung, mata, atau kulit (Hadimi, 2008).

Industri dalam negeri mempunyai kemampuan teknis dan permesinan yang handal dalam memproduksi alat pelindung diri. Indonesia mempunyai kemampuan dalam memproduksi APD jenis *gown* terusan dan *jumpsuit coverall* dengan kapasitas 20 juta, namun terkendala dengan bahan baku (Choirul Anwar, M., 2020). Pada kondisi normal dimana tidak ada pandemi Covid-19 produksi alat pelindung diri di Indonesia mengalami surplus untuk pasar domestik. Persaingan dagang juga terjadi dikala banyak APD impor masuk ke pasar domestik, sehingga APD produksi dalam negeri banyak mengalami tekanan harga. Standarisasi produk juga menjadi bagian penting dalam memproduksi alat pelindung diri. Produk APD dalam negeri sudah memenuhi standarisasi medis menurut *World Health Organization* (WHO) (Purnamasari dan Patnistik, 2020). Beberapa produk dalam negeri telah lulus uji ISO 16604 standart level tertinggi WHO (*premium grade*) yang dilakukan di lembaga uji di Amerika Serikat dan Taiwan, sehingga aman digunakan oleh tenaga medis di seluruh dunia (Septyaningsih dan Zuraya, 2020). Produk APD dalam negeri juga mengalami peningkatan signifikan pada produksi *coverall/protective suite, surgical gown* dan *surgical mask*. Berdasarkan data yang dihimpun Kemenperin dan Kementerian Kesehatan, terjadi surplus produksi APD sampai Desember 2020.

Teknologi permesinan selain digunakan untuk menjamin kualitas produk juga untuk meningkatkan produktivitas. Salah satu teknologi permesinan yang saat ini dikembangkan adalah *laser cutting*. Proses pemotongan bahan menggunakan *laser cutting* telah digunakan untuk memotong berbagai jenis material baik logam, kayu, plastik maupun kain. *Laser cutting* merupakan proses pemotongan menggunakan sinar laser. Sinar laser yang digunakan merupakan sinar laser yang sangat difokuskan sehingga mempunyai energi yang besar, benda yang dilewati oleh sinar laser tersebut akan meleleh, terbakar ataupun menguap tergantung dari jenis dan sifat bahan yang digunakan. Mekanisme kerja dari mesin *laser cutting* ditunjukkan pada Gambar 1.

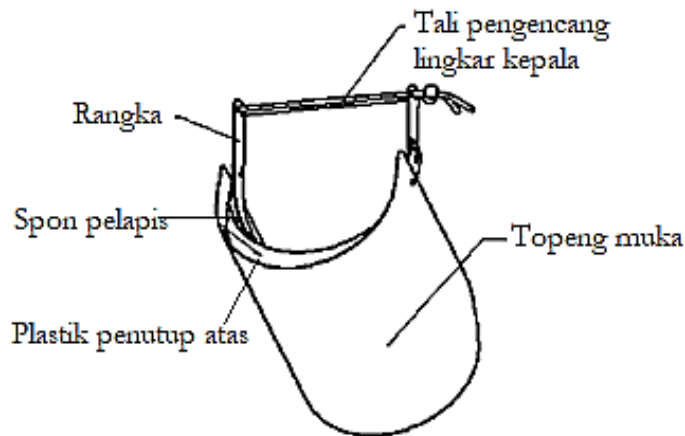


Gambar 1. Skema mesin *laser cutting* (Samarya dkk, 2020).

Gambar 1 menjelaskan proses kerja *laser cutting* yang menggunakan gas CO ataupun nitrogen pada beberapa jenis lainnya. Sinar laser memiliki diameter sekitar $\frac{3}{4}$ inci ketika dikeluarkan dari resonator laser. Laser yang keluar kemudian dibelokkan dengan dengan pembelok sinar laser yang terbuat dari cermin. Laser dibelokkan ke lensa fokus yang akan mengkonsentrasikan laser tersebut. Laser yang telah dikonsentrasikan kemudian melewati *nozzle* bersamaan dengan gas bertekanan akan memotong atau melubangi benda kerja.

Kualitas produk yang terjamin secara berkelanjutan serta meminimalisir produk rusak merupakan alasan utama diberlakukannya otomatisasi permesinan di industri. Beberapa mesin non konvensional membutuhkan proses setting yang cermat sebelum dioperasikan. Keakurasian ukuran produk terhadap ukuran desain dapat disebabkan ketidakteraturan permukaan potong akibat tingkat kekasaran yang tinggi. Peningkatan kecepatan potong dan kedalaman potong rendah akan menurunkan kekasaran permukaan benda potong (Ibrahim dkk, 2018). Terdapat pengaruh yang signifikan parameter kecepatan pemakanan, putaran spindel dan diameter benda potong terhadap kekasaran permukaan. Diameter benda yang relatif kecil tingkat kekasarannya menurun dengan kecepatan pemakanan dan putaran yang sama (Gambeh dkk, 2018). Berdasarkan hasil penelitian di atas, keakurasian ukuran menjadi hal yang penting untuk diteliti sekalipun pada mesin non konvensional.

Topeng muka merupakan bagian utama *face shield* yang diproduksi menggunakan bahan plastik jenis PET. Bahan plastik PET dalam berbagai jenis banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari sebagai bahan kemasan dikarenakan tahan panas, ulet dan transparan (Mujiarto, 2005). Bagian rangka menggunakan plastik PVC (*polivinil klorida*) yang memiliki sifat ringan, tahan api, tahan bahan kimia serta dapat dibentuk secara elastis dan fleksibel (Lissa, 2017). Bagian lain dari *face shield* adalah plastik penutup atas dari bahan PET yang berfungsi sebagai perapat dari semburan droplet virus Covid-19 serta tali pengencang lingkaran kepala. Pada bagian dahi dipasang spon pelapis yang lembut untuk menambah kenyamanan *face shield* saat dipakai dalam waktu lama dan tidak menyebabkan sakit pada dahi. Gambar 2 menunjukkan bagian-bagian utama dari APD *face shield*.



Gambar 2. Bagian-bagian utama dari APD *face shield*

Masker kain juga menjadi APD pilihan untuk mencegah penularan virus Covid-19 melalui hidung dan mulut. Berbagai jenis bahan dan model masker di produksi untuk memenuhi permintaan pasar. Salah satu jenis kain masker non medis yang populer di saat pandemi Covid-19 dan digunakan sebagai bahan masker adalah bahan kain poliester jenis scuba. Kain jenis scuba memiliki kualitas lebih baik dan tingkat elastisitasnya lebih terkontrol. Kain ini memiliki kemampuan melar secara vertikal maupun horizontal rata-rata 40% dan lebar mencapai 58 inches. Komposisi bahan terdiri bahan polyester 90% dan spandek 10% (Nugroho, 2018). Pemilihan jenis kain scuba atas pertimbangan strukturnya elastis, tebal, nyaman dipakai dan harga relatif murah. Di saat Covid-19 mewabah terjadi kelangkaan masker standart medis dan harga yang melambung tinggi. Penggunaan masker kain menjadi pilihan alternatif disaat itu, walaupun secara medis masih perlu dilakukan penelitian. Penggunaan masker kain akan memberikan rasa aman saat beraktivitas di luar rumah jika dikuti dengan *physical distancing* atau jaga jarak aman sekitar 1-2 meter dan cuci tangan pakai sabun atau *hand sanitizer* (Sarjono, 2001). Gambar 3 menunjukkan produk APD masker berbahan kain jenis scuba.



Gambar 3. APD masker kain (satuan : mm)

Proses pemotongan dengan menggunakan mesin laser terdapat permasalahan antara lain kerataan permukaan dan ketepatan ukuran produk termasuk konsumsi daya listrik yang

tinggi (Siswanto dan Sunyoto, 2018). Penelitian ini bertujuan mengetahui tingkat keakurasian hasil pemotongan, konsumsi energi listrik (kWh) dan produktivitas terhadap perubahan kecepatan potong pada mesin *laser cutting* ZAIKU LS 6040. Adapun bahan yang dipotong adalah plastik jenis PET untuk komponen APD *face shield* dan bahan kain poliester untuk APD masker kain.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan bahan plastik jenis *PET rigid sheet* dengan ketebalan 0,35 mm sebagai topeng muka pada APD *face shield* dan bahan kain poliester scuba 280 GSM sebagai bahan masker. Penelitian ini menggunakan mesin *laser cutting* tipe ZAIKU LS 6040.

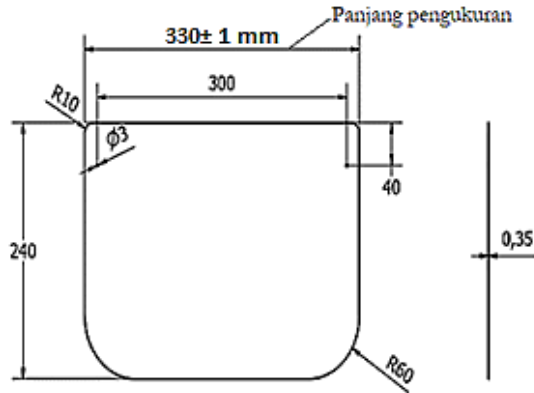
Pengaturan titik fokus sinar laser terhadap bahan berjarak 10 mm untuk bahan plastik PET dan 12 mm untuk bahan kain poliester. Diameter *nozzle* yang digunakan 1 mm dengan gas CO sebagai gas pembentuk sinar laser. Kecepatan potong divariasikan dengan menyesuaikan jenis bahan yang dipotong. Keakurasian yang dimaksud merupakan selisih antara ukuran gambar desain dengan ukuran hasil potong dalam satuan mm. Sampel panjang pengukuran hanya dilakukan pada salah satu bagian saja yaitu panjang 330 ± 1 mm untuk APD *face shield* dan panjang $165 \text{ mm} \pm 1$ mm untuk APD masker seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5. Konsumsi energi merupakan besarnya energi yang dipakai sebagai akibat dari perubahan kecepatan, sedangkan produktivitas energi merupakan jumlah produk *non rejected* yang dihasilkan berbanding besarnya energi yang dipakai. Perhitungan keakurasian ukuran sebagai akibat perubahan kecepatan potong ditunjukkan pada persamaan (1) :

$$x = (\Sigma N/n) - y \quad (1)$$

Dimana :

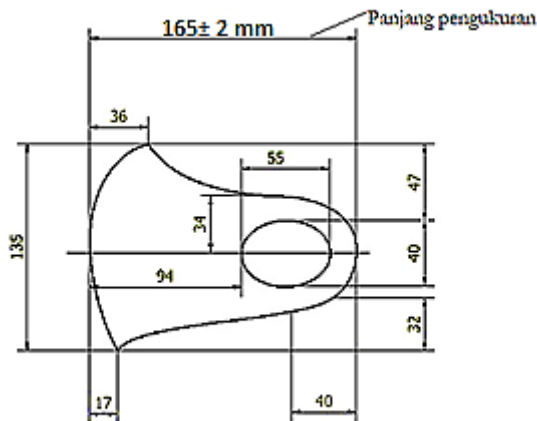
- x = selisih ukur (mm)
- ΣN = jumlah hasil pengukuran (mm)
- n = jumlah pengujian (kali)
- y = dimensi ukur desain (mm)

Produk APD *face shield* sebelum dilakukan proses pemotongan dilakukan dulu proses mendesain produk. Adapun desain produk untuk komponen topeng muka *face shield* berbahan plastik *PET rigid sheet* ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Desain topeng muka untuk APD *face shield* (satuan : mm)

Desain produk untuk APD masker bahan kain poliester ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain APD masker kain (satuan : mm)

Daya listrik terpakai diukur dari berapa arus listrik terpakai dikalikan dengan tegangan listrik terpasang. Besarnya arus listrik selama proses diukur menggunakan tang ampere. Energi listrik terpakai (kWh) merupakan perkalian antara daya listrik terpakai (kW) dikalikan dengan waktu pemakaian, sebagaimana persamaan (2). Sedangkan produktivitas energi yang digunakan mesin *laser cutting* ditentukan dengan menghitung jumlah produksi dibagi dengan jumlah energi listrik terpakai (Yuniari, 2014) ditunjukkan pada persamaan (3):

$$\text{Energi listrik terpakai (kWh)} = \text{daya alat listrik} \times \text{lama pemakaian (dalam jam)} \quad (2)$$

$$\text{Produktivitas energi} = \text{jumlah produksi (unit)} / \text{jumlah energi terpakai (kW)} \quad (3)$$

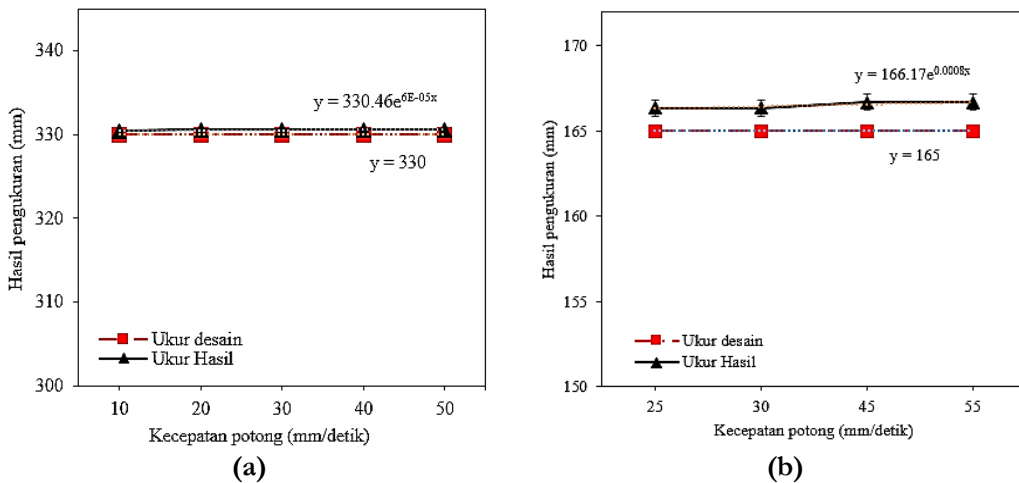
Gambar 6 menunjukkan peralatan yang digunakan pada mesin *laser cutting*. Proses produksi diawali dengan mendesain produk pada perangkat komputer. Desain yang sudah dinyatakan benar, selanjutnya dioperasikan dengan aplikasi *LaserDraw* dalam perangkat komputer yang sudah terhubung ke mesin *laser cutting*.



Gambar 6. Skema operasional mesin *laser cutting*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Akurasi hasil pengukuran pada pemotongan bahan plastik PET dari ukuran desain terhadap ukuran hasil pemotongan menunjukkan selisih. Peningkatan kecepatan potong tidak signifikan mempengaruhi ukuran hasil pemotongan. Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran terhadap ukuran desain produk terhadap ukuran hasil pemotongan.



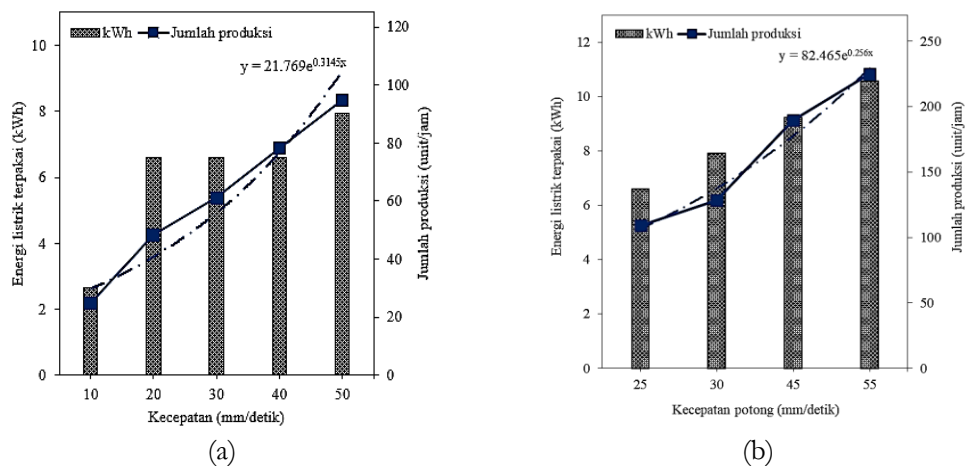
Gambar 7. Selisih ukuran desain dan ukuran hasil pemotongan (a) APD *face shield* (b) APD masker kain .

Selisih ukur antara desain dengan hasil pemotongan tidak melebihi ukuran dengan batas toleransi yang diijinkan yaitu ± 1 mm untuk plastik PET dan ± 2 mm untuk bahan kain. Hasil pengukuran menunjukkan selisih ukur antara ukuran desain dengan ukuran hasil yang relatif kecil yaitu kurang dari 1 mm untuk plastik PET dan kurang dari 2 mm untuk bahan kain. Selisih pengukuran tersebut menghasilkan persamaan $y = 330.46e^{6E-05x}$ dengan selisih rata-rata sebesar 0,52 mm dan deviasi 0,05 untuk bahan plastik PET. Hasil pemotongan bahan kain menunjukkan selisih pengukuran dengan persamaan $y = 167e^{0.0004x}$ dengan selisih rata-rata sebesar 1,50 mm

dan deviasi 0,47. Selisih ukur antara desain dan hasil potong tidak menimbulkan perubahan signifikan yang menyebabkan produk rusak atau *rejected*.

Peningkatan kecepatan potong pada mesin *laser cutting* tidak menyebabkan pergeseran titik fokus sinar laser terhadap bahan dan tidak mengganggu stabilitas *noise*. Selisih ukur antara ukuran desain dan ukuran hasil pemotongan menunjukkan selisih rata-rata 0,52 mm untuk bahan plastik PET dan 1,50 mm untuk bahan kain. Selisih pengukuran tersebut relatif kecil dan dapat diterima oleh produsen komponen APD berbahan plastik PET untuk *face shield* dan masker kain.

Pemakaian energi listrik (kWh) meningkat dengan penambahan kecepatan potong dari 10 sampai 20 mm/detik. Konsumsi energi listrik terlihat relatif stabil diikuti dengan meningkatnya jumlah produksi (unit/jam) pada kecepatan potong 20 sampai 40 mm/detik. Peningkatan kecepatan potong di atas 40 mm/detik menyebabkan meningkatnya konsumsi energi listrik, sebanding pula dengan meningkatnya jumlah produksi mengikuti persamaan $y = 21.769e^{0.3145x}$. Dimana y adalah energi listrik terpakai (kWh) dan x adalah kecepatan potong (mm/detik). Kenaikan jumlah produksi tertinggi terjadi pada kecepatan potong 10 mm/detik sampai 20 mm/detik yaitu sebesar 48,3%. Peningkatan jumlah produksi selanjutnya naik rata-rata 20% seiring dengan meningkatnya kecepatan potong dan pemakaian energi listrik. Gambar 8 (a) menunjukkan konsumsi energi listrik (kWh) dan jumlah produksi (unit/jam) pada bahan plastik PET. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kecepatan potong ideal ditandai dengan tidak adanya lonjakan konsumsi energi listrik yaitu pada kecepatan potong 20 – 40 mm/detik. Gambar 8 (b) menunjukkan konsumsi energi listrik (kWh) dan jumlah produksi (unit/jam) pada bahan kain poliester.



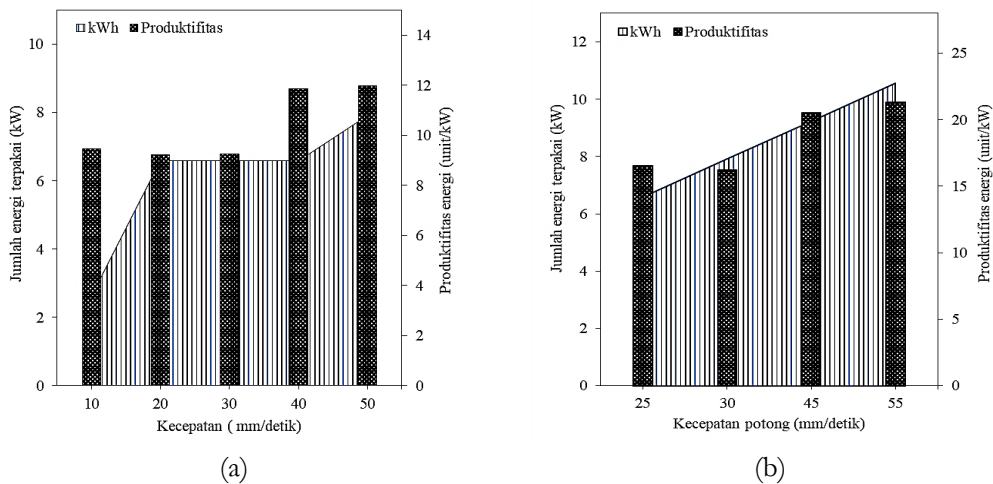
Gambar 8. Kecepatan potong terhadap konsumsi energi listrik (a) APD *face shield*

a. APD masker kain

Peningkatan jumlah produksi tertinggi sebesar 32,2% untuk kenaikan kecepatan potong dari 30 mm/detik menjadi 45 mm/detik, sedangkan selanjutnya naik rata-rata 15% mengikuti persamaan $y = 82.465e^{0.256x}$. Peningkatan kecepatan potong akan menyebabkan konsumsi energi listrik meningkat rata-rata 14,5%.

Peningkatan jumlah produksi yang dihasilkan terhadap konsumsi energi listrik (kW) merupakan produktivitas energi. Terjadi peningkatan produktivitas energi yang relatif tinggi

pada kecepatan 40 mm/detik. Dimana setiap kenaikan 1 kW akan meningkatkan jumlah produksi sebesar 11-12 unit pada pemotongan plastik PET untuk APD *face shield* dan 20-21 unit pada bahan kain untuk APD masker. Penggunaan konsumsi energi listrik terlihat mulai stabil pada kecepatan potong 40 mm/detik untuk pemotongan bahan plastik PET dan kecepatan potong 45 mm/detik untuk pemotongan bahan kain poliester. Peningkatan konsumsi energi listrik 16,7% sebanding dengan meningkatnya produktivitas sebesar 22,03% pada kecepatan potong 40 mm/detik pada bahan PET untuk *face shield*. Sementara itu konsumsi energi listrik meningkat 12,5% dengan peningkatan produktivitas sebesar 20,8% pada kecepatan potong 45 mm/detik pada bahan kain poliester untuk APD masker. Gambar 9(a) menunjukkan konsumsi energi listrik terhadap produktivitas energi untuk APD *face shield* dan Gambar 9(b) menunjukkan konsumsi energi listrik terhadap produktivitas energi bahan kain poliester untuk APD masker.



Gambar 9. Konsumsi energi listrik terhadap produktivitas energi (a) PET APD *face shield* (b) Kain poliester APD masker.

4. KESIMPULAN

Penelitian mengenai penggunaan mesin produksi *laser cutting* Zaiku LS 6040 untuk pemotongan plastik PET sebagai komponen APD *face shield* dan kain poliester sebagai komponen APD masker dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Keakurasian antara ukuran desain terhadap ukuran hasil pemotongan terdapat selisih 0,52 mm untuk bahan PET APD *face shield*, sedangkan pada bahan kain jenis scuba untuk APD masker terdapat selisih 0,5 mm.
2. Peningkatan kecepatan potong menyebabkan konsumsi energi listrik meningkat terutama diawal perubahan kecepatan. Konsumsi energi listrik akan stabil dengan kenaikan relatif kecil pada kecepatan potong di atas 40 mm/detik.
3. Produktivitas energi meningkat, dimana peningkatan konsumsi energi listrik 16,7% mampu meningkatkan produktivitas sebesar 22,03% untuk pemotongan bahan PET dan peningkatan konsumsi energi listrik 12,5% mampu meningkatkan 20,8% pada pemotongan bahan kain poliester.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Choirul Anwar, M., 2020, Tim Covid : 31 Pabrik Tekstil dan 2.900 Garmen Republik Indonesia bisa bikin APD, CNBC Indonesia, <https://www.cnbcindonesia.com>
- Gambeh, L, M, S, Poeng, R, Rondonuwu, I., 2018, Pengaruh kecepatan potong terhadap temperatur pemotongan pada proses pembubutan, *Jurnal Poros Teknik Mesin*, Volume 4, Nomor 2 ; 128- 137.
- Hadimi, 2008, Pengaruh perubahan kecepatan pemakanan terhadap kekasaran permukaan pada proses pembubutan, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, Volume 11, Nomor 1 ; 18 – 28
- Ibrahim, G.A., Hamni, A., Tarkono, Mutaqqin, M., Su’udi, A., 2018, Pengaruh gerak makan dan kedalaman potong terhadap kekasaran permukaan Magnesium pada permesinan Frais dengan teknik MQL, Undana – Kupang, 4-5 Oktober, *Prosiding SNTTM XVII*.
- Lissa Nuryadi, 2017, Pengolahan plastik mika sebagai aplikasi pada produk gaya hidup dengan tema biopop, *Skripsi*, Universitas Telkom, Bandung.
- Mujiarto, I., 2005, Sifat dan Karakteristik Material Plastik dan Bahan Aditif, *Jurnal Traksi*, Volume 3, Nomor 2 ; 56-65.
- Nugroho A, Utama A S, Budiyanoro C, 2018, Optimasi keakuratan dimensi dan kekasaran permukaan potong material akrilik dengan proses laser menggunakan metode Taguchi dan PCR-TOPSIS, *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, Volume 2, Nomor 2 ; 75-82.
- Purnamasari, D.M, Patnistik, E., 2020, Alat Pelindung Diri buatan Indonesia penuh standart WHO, Kompas.com, <https://t.me/kompascomupdate>
- Samarya, Y. T., Sulianti, M.M., Perangin-angin, B., Situmorang, M., 2020, Aplikasi laser CO₂ untuk pemotongan (Cutting) material menggunakan mesin CNC (Control Numeric Computer), F-MIPA Universitas Sumatera Utara, <https://media.neliti.com>
- Sarjono H, 2001, Model pengukuran produktivitas berdasarkan pendekatan rasio output per input, *Journal The WINNERS*, Volume 2, Nomor 2 ; 130-136.
- Septyaningsih, I., Zuraya, N., 2020, Produksi melimpah, Menperin doron ekspor masker dan APD, Republika, <https://www.republika.co.id>
- Siswanto B, Sunyoto, 2018, Pengaruh kecepatan dan kedalaman potong pada proses pembubutan konvensional terhadap kekasaran permukaan lubang, *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin* Volume 3, Nomor 2 ; 82-86
- Yuniari. A, 2014, Karakteristik sifat mekanik, ketahanan api dan pembakaran, dan morfologi nanokomposit campuran PVC dan LDPE, *Majalah kulit, karet, dan plastik* Volume 30, Nomor 1; 7-14.

Kajian Aspek Ergonomi *Face Shield* untuk Covid-19

S. Slamet^{1*}, A. Sokhibi², S. Harmoko³, Hariyanto⁴, Suyitno⁵

^{1,3,4}Program studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus

²Program studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus

⁵Program studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Kampus Gondang manis PO. Box 53, Bae-Kudus Telp/Fax: (0291) 438229 / 437198

³Centre for Innovation of Medical Equipments and Devices (CIMEDs), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*E-mail: sugeng.slamet@umk.ac.id

Abstrak

Face shield sebagai alat pelindung diri harus mampu memberikan rasa aman dan nyaman bagi si pemakai. *Face shield* mampu memblokir partikel *droplet* yang mengandung kuman termasuk virus Covid-19. Di masa pandemi Covid-19 permintaan alat pelindung diri khususnya *face shield* mengalami peningkatan signifikan. Produk *face shield* yang kurang memperhatikan aspek ergonomi dapat menyebabkan keluhan dari pemakai. Riset ini menguji aspek ergonomi pada *face shield* produksi Universitas Muria Kudus. Pengujian ergonomi dilakukan dengan metode evaluatif dengan menggunakan data variabel antropometri kepala orang Indonesia. Data antropometri tersebut digunakan sebagai bahan evaluasi terhadap kenyamanan produk *face shield* Universitas Muria Kudus. Sedangkan data keluhan pengguna *face shield* yang diproduksi Universitas Muria Kudus tersebut diperoleh dari responden berjumlah 41 orang, berumur antara 20-25 tahun, berjenis kelamin laki-laki dengan prosentase 85% dan perempuan dengan prosentase 15% serta dari suku Jawa. Responden diberikan sejumlah pertanyaan terkait keluhan yang dirasakan saat menggunakan *face shield* Universitas Muria Kudus. Adapun variabel aspek perancangan produk yang diukur meliputi panjang *face shield*, lebar *face shield*, lingkaran kepala *face shield*, tinggi kaca dan jarak mata ke kaca *face shield*. Variabel tersebut akan memberikan masukan ke produk akan kenyamanan dan keluhan yang dialami pengguna. Hasilnya menunjukkan bahwa *face shield* produksi Universitas Muria Kudus memenuhi aspek ergonomi, yaitu 4 (empat) ukuran bagian *face shield* tidak melebihi pada ukuran data antropometri kepala (persentile 95th) yaitu pada bagian panjang *face shield*, lebar *face shield*, lingkaran kepala *face shield* dan jarak mata ke kaca. Dan terdapat 1 (satu) ukuran bagian *face shield* yang dapat dievaluasi aspek ergonominya, yaitu pada bagian lingkaran kepala *face shield* dengan rentang (persentile 5th -persentile 95th). Dikarenakan pada bagian tersebut dipasang tali yang dapat diatur (*adjustable*).

Kata kunci : ergonomi, *face shield*, antropometri, responden.

ABSTRACT

Face shields as a personal protective device must provide a sense of security and comfort for the wearer. In addition, face shields can block droplet particles that contain germs, including the Covid-19 virus. During the Covid-19 pandemic, the demand for personal protective equipment, especially face shields, has increased significantly. However, face shield products that do not pay attention to ergonomic aspects can cause complaints from users. Therefore, this research examines the ergonomic aspects of the face shield produced by the Universitas Muria

Kudus. Ergonomic testing is carried out using an evaluative method using anthropometric data on the heads of Indonesian people. Anthropometric data is used as material for evaluating the comfort of the Universitas Muria Kudus face shield product. Meanwhile, data on complaints from face shield users produced by Muria Kudus University were obtained from 41 respondents, aged between 20-25 years, males with a percentage of 85%, women with a percentage of 15%, and Javanese ethnicity. Respondents were given some questions about the complaints they felt when using the Universitas Muria Kudus face shield. The product design aspects measured include the face shield's length, the face shield's width, the circumference of the head of the face shield, the height of the glass, and the distance between the eyes and the face shield. These variables will provide input to the product about the comfort and complaints experienced by users. The results showed that the face shield produced by the Universitas Muria Kudus met the ergonomics aspect, namely four sizes of the face shield did not exceed the anthropometric data size of the head (95th percentile), namely the length of the face shield, the width of the face shield, head circumference, and eye distance to the glass. There is one side of the face shield that can be evaluated for ergonomic aspects, namely the head circumference of the face shield with a range (5th percentile - 95th percentile) because the attached rope can be adjusted.

Keywords: ergonomic, face shield, anthropometry, respondents.

1. PENDAHULUAN

Pandemi Covid-19 merupakan suatu wabah penyakit baru yang ditemukan pertama kali di Wuhan (China) dan sudah menginfeksi 90.308 orang per tanggal 2 maret 2020. Gejala umum yang ditimbulkan berupa demam, batuk dan sulit bernapas. Penularan Covid-19 yang begitu cepat dan mematikan ini terjadi umumnya melalui droplet dan kontak dengan virus dan kemungkinan penularan di masa inkubasi menyebabkan masa kontak pasien ke orang sekitar lebih lama sehingga risiko jumlah kontak tertular dari 1 pasien mungkin dapat lebih besar (Zhu *et al.*, 2020).

Salah satu cara melindungi diri dari penularan COVID-19 adalah dengan menggunakan Alat Pelindung Diri (APD). Pemakaian APD harus dianggap sebagai garis pertahanan terakhir dan hanya digunakan ketika pengendalian sebaran infeksi menjadi sulit dan tidak efektif. Namun APD dapat digunakan sesuai dengan potensi bahaya yang ada baik di tempat kerja ataupun ruang-ruang publik (B. Arifin dan A. Susanto, 2012). Beberapa jenis APD yang diwajibkan atau disarankan untuk mencegah penularan COVID-19 adalah masker (*mask*), pelindung wajah (*face shield*), dan sarung tangan. APD tersebut bertujuan untuk mencegah paparan virus ke dalam tubuh ataupun menularkan virus ke orang lain. Meskipun seluruh APD tersebut bermanfaat dalam mencegah penularan, APD dapat memiliki risiko yang mengancam keselamatan selama penggunaan (Y. Theopilus, 2020). Faktor kenyamanan dalam pemakaian APD merupakan faktor penting yang harus diperhatikan.

Face shield adalah tameng muka transparan yang dapat menutupi wajah untuk mencegah droplet mengandung virus memasuki mata, hidung, dan mulut (T. Ravenscroft, 2020). *Face shield* merupakan APD yang banyak digunakan oleh pekerja medis maupun pekerja non medis. Namun dengan merebaknya wabah COVID-19, saat ini *face shield* banyak pula digunakan oleh masyarakat umum. Hal ini disebabkan fungsinya yang cukup efektif melindungi dari risiko terinfeksi COVID-19. APD ini juga banyak tersedia di pasaran dan harganya terjangkau, bahkan dapat dibuat sendiri dengan peralatan sederhana. Sebuah studi menggunakan simulator batuk

yang menyemburkan aerosol yang mengandung virus influenza (W. G. Lindsleyv dkk, 2014) dengan jelas menunjukkan bahwa *penggunaan face shield* dapat menahan paparan virus sebesar 68%-96% pada jarak 46 cm dari sumber batuk dan sesaat setelah batuk, bergantung pada diameter droplet (3,4 – 8,5 μm). Gambar 1 menunjukkan alat pelindung diri (APD) *face shield*.



Gambar 1. Alat pelindung diri *face shield*

Penggunaan *face shield* sebelum era pandemi Covid-19 bukanlah produk yang umum untuk digunakan oleh pekerja maupun masyarakat umum. Sehingga produksi *face shield* skala besar maupun skala kecil sangat banyak di pasaran. Hal ini sangat bermanfaat bagi masyarakat, tetapi disisi lain ada faktor yang perlu diperhatikan dalam pembuatan atau perancangan *face shield* tersebut, yaitu faktor ergonomi. Ergonomi merupakan ilmu yang sistematis untuk memanfaatkan informasi mengenai kemampuan dan keterbatasan manusia dalam merancang suatu sistem kerja. Dengan demikian orang dapat hidup dan bekerja pada sistem dengan lebih baik untuk mencapai tujuan yang diinginkan melalui suatu pekerjaan yang efektif, efisien, aman dan nyaman (S. Wignjosoebroto, 2003).

Perancangan yang baik dapat dihasilkan dengan mengenal sifat-sifat keterbatasan, serta kemampuan yang dimiliki manusia. Manusia berperan sentral dalam aktifitasnya yaitu sebagai perencana, perancang, pelaksana dan pengevaluasi dalam setiap aktifitas kerja. Perancangan peralatan secara ergonomi perlu dilakukan dengan berpedoman pada prinsip-prinsip ergonomi (M. Andriani and Subhan, 2016). Setiap aktivitas atau pekerjaan yang dilakukan, apabila tidak dilakukan secara ergonomi akan mengakibatkan ketidaknyamanan, biaya tinggi, kecelakaan dan penyakit akibat beban kerja meningkat, performansi menurun yang berakibat kepada penurunan efisiensi dan produktifitas. Dengan demikian penerapan ergonomi pada suatu produk APD adalah suatu keharusan. Implementasi ergonomi di bidang manufaktur mampu meningkatkan produktifitas hingga 46% dengan adanya pengurangan beban kerja yang tidak perlu. Penerapan ergonomi memberikan dampak positif pada keluhan muskuloskeletal, pengurangan kecelakaan kerja, klaim kompensasi terhadap kecelakaan kerja serta mengurangi ketidakhadiran pekerja karena sakit (D. Yunus, 2018).

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi *face shield* produksi Universitas Muria Kudus dari aspek ergonomi. Hal ini penting dilakukan, dikarenakan salah satu tahapan dalam merancang sebuah produk yang baik adalah memasukkan aspek ergonomi. *Face shield* yang dibuat tanpa memperhatikan aspek ergonomi berpotensi menimbulkan ketidaknyamanan dan keluhan bagi pemakai.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode evaluatif, dimana proses produksi yang akan dijalankan terlebih dahulu mempertimbangkan nilai-nilai positif dan keuntungan suatu program serta teknik yang akan digunakan (S. Arikunto, 2007). Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan pengambilan data sekunder antropometri kepala orang suku Jawa, berumur 20-25 tahun dan pengambilan data primer berupa data ukuran *face shield* yang diproduksi Universitas Muria Kudus. Objek penelitian ini adalah evaluasi ergonomi pada *face shield* produksi Universitas Muria Kudus. Oleh karena itu, kuesioner dibagikan kepada pengguna *face shield* yang diproduksi Universitas Muria Kudus untuk mengetahui kenyamanan dan evaluasi perbaikan dari *face shield* tersebut. Kuesioner dibagikan kepada responden berjenis kelamin laki-laki dan perempuan secara acak dengan jumlah responden diambil mengikuti persamaan Slovin:

$$\begin{aligned} n &= \frac{N}{1+Ne^2} \\ &= 500 (1 + 500 \times 0,15^2) \\ &= 40,82 \approx 41 \text{ orang} \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana :

- n = jumlah sampel (orang)
- N = jumlah populasi pemakai *face shield* uji (orang)
- e = Batas toleransi kesalahan (*error tolerance*)

Jawaban kuesioner dari responden selanjutnya dilakukan uji validasi dan uji reabilitas. Uji validasi digunakan untuk mengukur apakah kuesioner yang telah diberikan kepada responden itu stabil, akurat dan unsur-unsurnya homogen. Sedangkan uji reabilitas digunakan untuk mengetahui tingkat konsistensi dari responden terhadap variabel yang ada sehingga data yang diperoleh cenderung memberikan hasil yang sama (konsisten).

Adapun data primer yang berupa data ukuran *face shield* yang diproduksi Universitas Muria Kudus digunakan untuk menentukan ukuran *face shield* terhadap kepala manusia sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, meliputi bagi-bagian berikut:

a. Panjang *face shield*

Untuk panjang *face shield*, data antropometri yang digunakan adalah panjang kepala.

b. Lebar *face shield*

Untuk lebar *face shield*, data antropometri yang digunakan adalah lebar kepala.

c. Lingkar kepala *face shield*

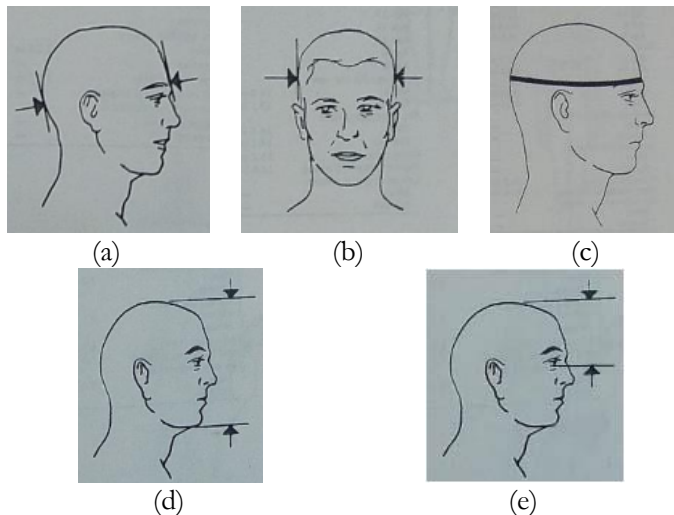
Untuk lingkar *face shield*, data antropometri yang digunakan adalah lingkar kepala.

d. Tinggi kaca *face shield*

Untuk tinggi kaca *face shield*, data antropometri yang digunakan adalah tinggi kepala.

e. Jarak mata ke kaca *face shield*

Untuk jarak mata ke kaca *face shield*, data antropometri yang digunakan adalah tinggi mata ke kepala.



Gambar2. Antropometri kepala manusia (Sumber : Human Factors Design Handbook)(W. E. Woodson, 1981)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data hasil kuesioner pengguna *face shield* produksi Universitas Muria Kudus

a. Uji validitas

Uji validitas dilakukan untuk mengukur apakah kuesioner yang telah diberikan kepada responden itu stabil, akurat dan unsur-unsurnya homogen. Pengujian validitasi ini dilakukan dengan *internal validity*. Kriteria yang dipakai berasal dari dalam alat tes itu sendiri dan masing-masing item pada setiap variable dikorelasikan dengan nilai total yang diperoleh dari koefisien korelasi rendah dan tingkat signifikan, maka item yang bersangkutan gugur, taraf signifikan yang digunakan adalah 5%. Data responden dikatakan valid, apabila nilai r hitung $>$ r tabel. Hasil uji validitas dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil Uji Validitas

No	Variabel	r hitung	r tabel	Ket
1	Frekuensi pemakaian <i>face shield</i> UMK	0,801	0,308	Valid
2	Keluhan yang dialami pada saat pemakaian <i>face shield</i> UMK Sakit pada dahi	0,885	0,308	Valid
3	Keluhan yang dialami pada saat pemakaian <i>face shield</i> UMK Sakit pada lingkaran kepala	0,917	0,308	Valid
4	Keluhan yang dialami pada saat pemakaian <i>face shield</i> UMK Sakit pada kepala bagian belakang	0,584	0,308	Valid
5	Keluhan yang dialami pada saat pemakaian <i>face shield</i> UMK Sakit pada leher bagian belakang	0,439	0,308	Valid
6	Sakit Keluhan yang dialami pada saat pemakaian <i>face shield</i> UMK Sakit pada mata	0,925	0,308	Valid
7	Perlu nya perbaikan desain <i>face shield</i> UMK	0,911	0,308	Valid

8	Perlu nya perbaikan kenyamanan <i>face shield</i> UMK	0,875	0,308	Valid
9	Perlu nya perbaikan keamanan <i>face shield</i> UMK	0,718	0,308	Valid

Karena nilai r hitung $>$ r table, maka data responden dapat dikatakan valid atau akurat

b. Uji reabilitas

Uji reliabilitas digunakan untuk melihat tingkat konsistensi dari responden terhadap variabel yang ada sehingga data yang diperoleh akan cenderung memberikan hasil yang sama (konsisten). Data bisa dikatakan *reliable* jika nilai Alpha $>$ nilai *standardized item alpha*. Tabel uji reabilitas dapat ditunjukkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hasil Uji Reabilitas

No	Alpha	Standardized Item Alpha
1	0,9285	0,9239

Karena nilai Alpha $>$ nilai *standardized item*, maka data responden dapat dikatakan konsisten

3.2. Data Hasil Kuesioner Pengguna *Face shield* Produksi Universitas Muria Kudus

Hasil kuesioner yang dibagikan kepada 41 responden pemakai *face shield* produksi Universitas Muria Kudus dapat dilihat pada Tabel 3:

Tabel 3. Hasil kuseoner

No	Variabel	Hasil Kesioner (%)	
		Ya	Tidak
1	Frekuensi pemakaian <i>face shield</i> umk dengan durasi kurang dari 4 jam	20%	80%
2	Keluhan sakit pada dahi pada saat pemakaian <i>face shield</i> umk	30%	70%
3	Keluhan sakit pada lingkarpada saat pemakaian <i>face shield</i> umk	35%	65%
4	Keluhan sakit pada bagian belakang kepala pada saat pemakaian <i>face shield</i> umk	10%	90%
5	Keluhan sakit pada leher pada saat pemakaian <i>face shield</i> umk	1%	99%
6	Keluhan sakit pada matapada saat pemakaian <i>face shield</i> umk	40%	60%
7	Perlu nya perbaikan desain <i>face shield</i> umk	50%	50%
8	Perlu nya perbaikan kenyamanan <i>face shield</i> umk	5%	45%
9	Perlu nya perbaikan keamanan <i>face shield</i> umk	40%	60%

Tabel 3 diatas menunjukkan bahwa pertanyaan kuesioner nomor 1 sampai 6 adalah untuk mengetahui prosentase tingkat kenyamanan *face shield* produksi Universitas Muria Kudus. Sedangkan pertanyaan nomor 7 sampai 9 adalah pertanyaan untuk mengavaluasi perancangan *face shield* produksi UniversitasMuria Kudus. Kuesioner yang dibagikan kepada responden tersebut merupakan sempalan beberapa pertanyaan mengenai keluhan yang dirasakan pengguna produk yang terdapat pada kuesiooner *Nordic Body Map*.

3.3. Data antropometri

Data antropometri selalu berhubungan dengan pengukuran dimensi pada tubuh manusia (S. Wignjosoebroto, 2000). Tabel 4 menunjukkan data *persentile* antropometri kepala orang suku Jawa.

Tabel 4. Data *persentile* antropometri kepala orang suku Jawa (Sumber: Ismianti dkk, 2019)

No	Dimensi	<i>Persentile</i> 5 th	<i>Persentile</i> 50 th	<i>Persentile</i> 95 th
1	Panjang kepala	17	19,20	21,50
2	Lebar kepala	14	16,50	19,84
3	Lingkar kepala	34,37	41	47,56
4	Tinggi kepala	20,45	23	25,53
5	Tinggi Mata ke kepala	9,5	12	14,84

Persentile^{95th} digunakan untuk ukuran *face shield* ergonomi, kecuali pada ukuran lingkar kepala *face shield*. *Persentile*^{95th} digunakan karena dapat mewakili populasi orang suku Jawa dengan ukuran kepala yang besar. Sehingga populasi orang suku Jawa yang mempunyai ukuran kepala kecil pun dapat menggunakan *face shield* tersebut. Tabel 5 menunjukkan data ukuran *face shield* ergonomi.

Tabel 5. Data ukuran *face shield* ergonomi

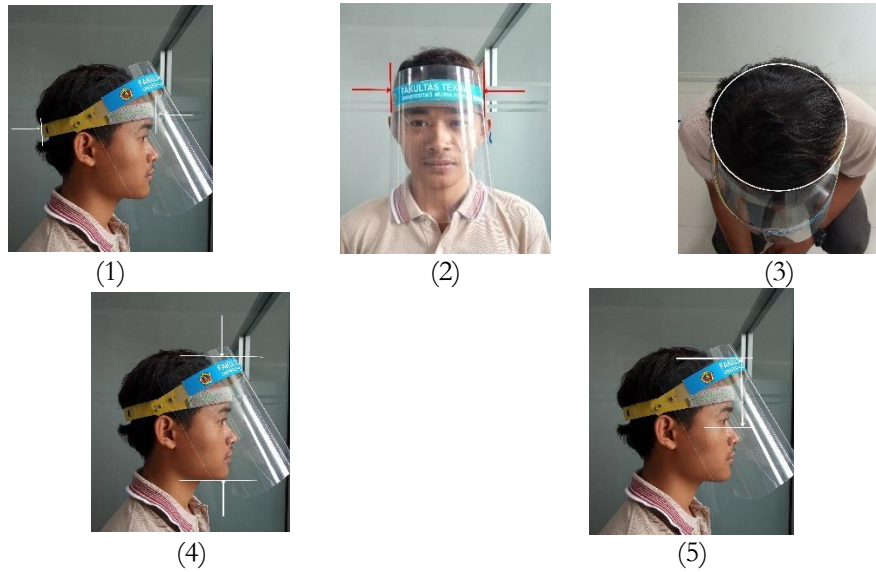
No	Bagian <i>face shield</i>	Ukuran (cm)	Ket
1	Panjang <i>face shield</i>	21,50	<i>Persentile</i> 95th
2	Lebar <i>face shield</i>	19,84	<i>Persentile</i> 95th
3	Lingkar kepala <i>face shield</i>	34,37 – 47,56	<i>Persentile</i> 5th - <i>Persentile</i> 95th
4	Tinggi kaca <i>face shield</i>	25,53	<i>Persentile</i> 95th
5	Jarak mata ke kaca <i>face shield</i>	14,84	<i>Persentile</i> 5th

3.4. Data *face shield* produksi Universitas Muria Kudus

Adapun data ukuran *face shield* produksi Universitas Muria Kudus dapat dilihat pada Tabel 6, sedangkan Gambar 3 menunjukkan teknik pengukuran untuk mendapatkan data antropometri kepala dengan *face shield* produksi Universitas Muria Kudus.

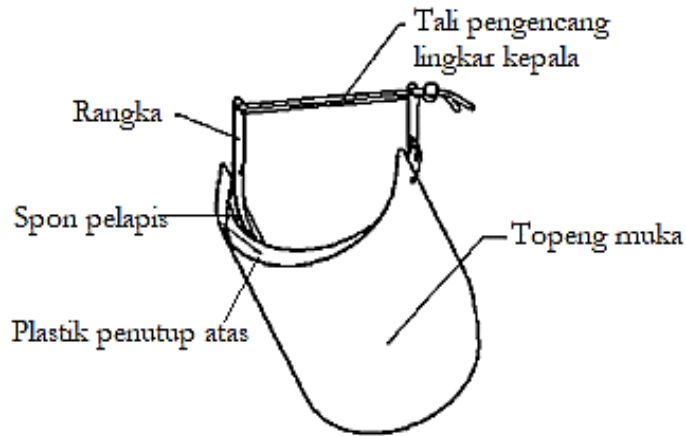
Tabel 6. Data ukuran *face shield* produksi Universitas Muria Kudus

No	Bagian <i>face shield</i>	Ukuran (cm)	Keterangan
1	Panjang <i>face shield</i>	16,50	Permanen
2	Lebar <i>face shield</i>	12,00	Permanen
3	Lingkar kepala <i>face shield</i>	43,10 - 65,10	<i>Adjustable</i>
4	Tinggi kaca <i>face shield</i>	24,50	Permanen
5	Jarak mata ke kaca <i>face shield</i>	12,45	Permanen



Gambar 3. Teknik pengukuran data antropometri

Bagian-bagian utama dari *face shield* produksi Universitas Muria Kudus sebagaimana ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Bagian-bagian utama *face shield* produksi Universitas Muria Kudus

3.5. Pengujian aspek ergonomi *face shield*

Pengujian dilakukan dengan mengevaluasi dan membandingkan data *percentile*^{95th} antropometri kepala orang suku Jawa dengan data dimensi *face shield* yang diproduksi oleh Universitas Muria Kudus (UMK). Tabel 7 menunjukkan perbandingan data *percentile*^{95th} antropometri dimensi *face shield* produksi UMK.

Tabel 7. Perbandingan data ukuran *face shield* ergonomi suku Jawa dengan ukuran *face shield* produksi UMK

No	Antropometri	Data ukuran <i>face shield</i> ergonomi suku Jawa (cm)	Data ukuran <i>face shield</i> UMK (Cm)
1	Panjang <i>face shield</i>	21,510	16,50
2	Lebar <i>face shield</i>	19,84	12,00
3	Lingkar kepala <i>face shield</i>	34,37 – 47,56	43,10 - 65,10
4	Tinggi kaca <i>face shield</i>	25,53	24,50
5	Jarak mata ke kaca <i>face shield</i>	14,84	12,45

Tabel 7 diatas menunjukkan terdapat 4 (empat) ukuran bagian *face shield* produksi Universitas Muria Kudus tidak melebihi pada ukuran data antropometri kepala orang suku Jawa (*persentile 95th*) yaitu pada bagian panjang *face shield*, lebar *face shield*, lingkar kepala *face shield* dan jarak mata ke kaca. Sehingga *face shield* produksi Universitas Muria Kudus dari aspek ukuran memenuhi aspek ergonomi. Terdapat 1 (satu) ukuran bagian *face shield* produksi Universitas Muria Kudus yang *adjustable* atau dapat diatur sesuai ukuran lingkar kepala pemakai yaitu pada bagian lingkar kepala *face shield* menggunakan tali pengencang. Sehingga menggunakan rentang *persentile^{5th}* Sampai *persentile^{95th}*. Untuk mengetahui adanya hubungan kesesuaian antara data ukuran *face shield* Universitas Muria Kudus dengan data ukuran *face shield* ergonomi suku Jawa, maka dilakukan uji statistik dengan Uji Chi-Square dengan menggunakan tingkat kepercayaan 5%. Adapun hasil Uji tersebut dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Uji kesesuaian

Chi-Square Tests

	Value	df	Asymptotic Significance (2-sided)
Pearson Chi-Square	32.000 ^a	16	.010
Likelihood Ratio	23.907	16	.092
Linear-by-Linear Association	6.889	1	.009
N of Valid Cases	8		

Berdasarkan Hasil uji chie-square diatas, diketahuia nilai Asymp.sig sebesar 0,010. Karena nilai Asymp.sig $0,010 < 0,05$, maka dapat disimpulkan bahwa H_0 ditolak dan H_a diterima. Dengan demikian dapat diartikan bahwa terdapat hubungan yang signifikansi atau sesuai antara data ukuran *face shield* Universitas Muria Kudus dengan data ukuran *face shield* ergonomi suku Jawa.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Dimensi atau ukuran *face shield* produksi Universitas Muria Kudus memenuhi aspek ergonomi. Dikarenakan ukuran pada bagian-bagian *face shield* produksi Universitas Muria Kudus tidak melebihi ukuran *persentile*^{95th} dari data antropometri kepala orang suku Jawa.
- 2) Pengembangan produk *face shield* produksi Universitas Muria Kudus ini perlu ditingkatkan dari aspek kenyamanan. Hasil kuesioner kepada responden menunjukkan tingkat kenyamanan pada *face shield* Universitas Muria Kudus sebesar 45%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Bustanul Arifin dan A. Susanto, 2012, "Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Kepatuhan Pekerja Dalam Pemakaian Alat Pelindung Diri (Apd) Di Bagian Coal Yard Pt X Unit 3 & 4 Kabupaten Jepara Tahun 2012," *J. Kesehat. Masy. Univ. Diponegoro*, vol. 2, no. 1, p. 1-6, <http://ejournals1.undip.ac.id/index.php/jkm>.
- D. Yunus, 2018, "Peran Ergonomi Partisipatif dalam Mencegah Keluhan Muskuloskeletal," *Ber. Kedokt. Masy.*, vol. 34, no. 5, pp. 3-6, <https://jurnal.ugm.ac.id/bkm/article/view/37692>.
- Ismianti, Herianto, Ardiyanto, 2019, "Studi Antropometri Mahasiswa Indonesia Bersuku Batak Dan Jawa", *Jurnal Ergonomi Indonesia*, vol. 05, no. 02, pp. 47-56, <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jei/article/view/55062>.
- M. Andriani and Subhan, 2016, "Perancangan peralatan secara ergonomi untuk meminimalkan kelelahan di pabrik kerupuk," *Semin. Nas. sains dan Teknol. Fak. Tek. UMJ, Jakarta*, 8 November, pp. 1-10, jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek%0Aap-ISSN.
- N. Zhu *et al.*, 2020, "A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China " *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, no. 8, pp. 727-733, doi: 10.1056/nejmoa2001017.
- S. Arikunto, 2007, *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktek*, Rineka Cipta, Jakarta.
- S. Wignjosoebroto, 2000, *Evaluasi Ergonomi dalam Perancangan Produk*. ITS, Surabaya.
- S. Wignjosoebroto, 2003, *Ergonomi, studi gerak dan waktu*, Guna Widya, Jakarta.
- T. Ravenscroft, 2020, "Eight Face Shields Designed to Protect Corona Virus Healthcare Workers", <https://www.dezeen.com/2020/04/13/face-shields-coronavirus-apple-foster/> (accessed Jun. 09, 2020).
- W. E. Woodson, 1981, *Human Factors Design Handbook, Information & Guidelines for the Design of Systems, Facilities, Equipment, and Products for Human Use*, Mc. Graw-Hill Book Co, New York.
- W. G. Lindsley, J. D. Noti, F. M. Blachere, J. V. Szalajda, and D. H. Beezhold, 2014, "Efficacy of face shields against cough aerosol droplets from a cough simulator," *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 11, no. 8, pp. 509-518, doi: 10.1080/15459624.2013.877591.
- Y. Theopilus, T. Yogasara, C. Theresia, and J. R. Octavia, 2020, "Analisis Risiko Produk Alat Pelindung Diri (APD) Pencegah Penularan COVID-19 untuk Pekerja Informal di Indonesia," *J. Rekayasa Sist. Ind.*, vol. 9, no. 2, pp. 115-134, doi: 10.26593/jrsi.v9i2.4002.115-134.

Analisa Perbandingan Kekuatan Profil Padeye Berdasarkan Desain Standara DNV dan BS-EN Studi Kasus: *Cargo Carrying Unit*

F. Noviantoro* dan I.Kusumaningtyas

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No.2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia,
Telp. (0274) 521673
*E-mail: feri.noviantoro@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Pada industri minyak, gas bumi, fabrikasi, manufaktur dan konstruksi, *lifting* merupakan salah satu aktivitas penting yang sering dilakukan. Konfigurasi *lifting* memerlukan analisis komprehensif untuk memastikan struktur *lifting* tersebut aman untuk dipergunakan. Alat *lifting* yang paling sering digunakan adalah *Cargo Carrying Unit* (CCU), sebuah struktur yang di desain dan digunakan berulang kali dalam kegiatan pengangkutan barang. Faktor terpenting dari keamanan desain CCU adalah desain *lifting point*-nya, atau biasa disebut *padeye*. Dalam penentuan desain *padeye*, rujukan standar desain yang paling umum digunakan adalah DNV dan BS-EN. Analisis ini diharapkan dapat menghasilkan perbandingan regangan dan *displacement* yang terjadi untuk pemodelan desain *padeye* yang merujuk pada DNV dan BS-EN. Dan juga, untuk membandingkan nilai tegangan pada masing – masing desain terhadap batasan tegangan *yield* material yang digunakan. Selain itu, nilai persentase tegangan dan momen puntir maksimum pada saat mencapai 100% dari batasan SMYS-nya juga akan dilakukan tinjauan. Untuk menunjang keakuratan hasil analisis, tinjauan struktur *padeye* menggunakan analisis FEM (*finite element method*) pada segmen *padeye*-nya. Penelitian ini diharapkan bisa menjadi referensi pertimbangan bagi perusahaan untuk mengantisipasi perilaku *padeye* terhadap beban tarik dan puntir.

Kata kunci : *lifting, rigging, padeye, structure, Cargo Carrying Unit, FEM.*

Abstract

In In the oil, natural gas, fabrication, manufacturing and construction industries, lifting is one of the most important activities that often carried out. A comprehensive lifting configuration is to ensure the lifting structure is safe to be used. The most model for lifting tool is the Cargo Carrying Unit (CCU), a structure that is used repeatedly in goods transportation activities. The most important factor of the safety of the CCU design is the lifting point design, or so-called padeye. In determining the padeye design, the most commonly used reference design standards are DNV and BS-EN. This analysis is expected to produce a comparison of strain and displacement that occurs for padeye design modeling that refers to DNV and BS-EN. Also, to compare the stress value in each design against the yield stress limit of the material used. In addition, the percentage value of the maximum stress and torque when it reaches 100% of the SMYS limit will also be reviewed. To support the accuracy of the analysis results, the padeye

structure review uses the FEM (finite element method) analysis on its padeye segment. This research is expected to be a reference consideration for companies to anticipate padeye behavior towards tensile and torsional loads.

Keywords : lifting, rigging, padeye, structure, Cargo Carrying Unit, FEM.

1. PENDAHULUAN

Industri di bidang minyak dan gas bumi, fabrikasi, manufaktur dan konstruksi, *lifting* merupakan salah satu tahapan terpenting, sehingga diperlukan perhitungan dan analisis yang memadai untuk memperhatikan apakah struktur *lifting* tersebut aman atau tidak. Skenario dalam proses *lifting* berdasarkan konfigurasi perencanaan *rigging* dibuat untuk menentukan peralatan *rigging* yang tepat (Gayuh, 2016). Dalam perencanaan *lifting* dan *rigging* tersebut, dipertimbangkan beberapa faktor antara lain analisa statis dan dinamis (Gusti, 2013).

Banyak hal perlu diantisipasi yang dapat menyebabkan kegagalan struktur dan peralatan *rigging* saat kegiatan *lifting* dilakukan. Beban struktur yang diperhitungkan mempertimbangkan beberapa faktor yang akan terdistribusi melalui titik angkat dan menjadi beban langsung pada *padeye*-nya.

Cargo Carrying Unit (CCU) adalah sebuah unit struktur yang didesain untuk digunakan secara berulang kali di dalam kegiatan pengangkutan barang dan peralatan dari dan ke anjungan lepas pantai, fasilitas darat ataupun kapal. Terdapat beberapa jenis CCU yang biasa digunakan dalam industri migas, yaitu jenis kontainer, kontainer tangki, *skid* dan keranjang (basket).

Metode *lifting* harus memperhatikan banyak faktor seperti kapasitas *crane*, *lifting point*, *hook point*, *shackle*, *padeye* dan *sling*. Berdasarkan informasi yang didapat, analisis dinamis pada proses *lifting* mencakup dari beban yang terjadi dan dasar penentuan beban dari kegiatan *lifting* adalah berat struktur itu sendiri, *center of gravity*, berat *rigging*, dan beban yang akan diangkut (Pramita, 2013).

Batas kekuatan desain tersebut diatur dalam kode dan standar yang berlaku. Dalam kode dan standar ditetapkan persyaratan-persyaratan yang dianggap perlu agar desain *padeye* ini tidak akan mengalami berbagai modus kegagalan. Dengan demikian, setiap tahap *lifting*, misalnya pemilihan metode *lifting*, penentuan dimensi dan material, perhitungan beban dan tegangan yang diizinkan, dan lain-lain harus selalu mengacu pada aturan-aturan yang ditetapkan oleh kode dan standar tersebut. Standar yang digunakan dalam analisis *lifting* ini adalah DNV 2.7-1 *Offshore Containers* 2013 dan BS EN 12079-1:2006 - *Offshore containers and associated lifting sets*.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat lebih detail analisa perhitungan dimensi optimal *padeye* dengan merujuk kepada standar DNV dan BS-EN yang ditinjau menggunakan FEM pada segmen *padeye*-nya.

Analisa ini menggunakan program *Abaqus* untuk mendapatkan solusi yang efisien tentang perilaku *padeye* jika mengalami beban tarik dan puntir yang melebihi kapasitas desain. Penelitian ini juga diharapkan menjadi referensi bagi perusahaan untuk mengantisipasi perilaku *padeye* jika terjadi kesalahan pengoperasian di lapangan. Selain itu, diharapkan analisis ini bisa menjadi sumber literatur rujukan para peneliti selanjutnya untuk dikembangkan lagi desain yang dapat memperbesar persentase ketahanan struktur *padeye* terhadap beban tarik dan beban puntir.

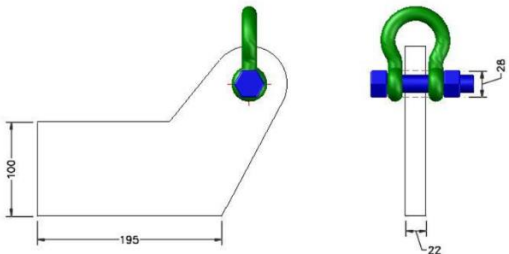
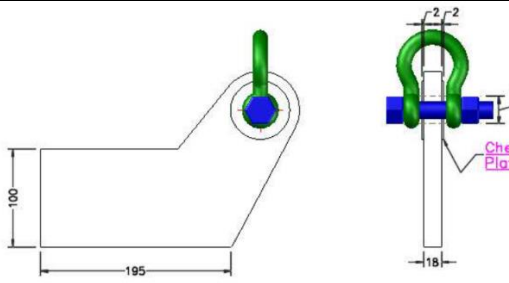
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk konsep desain awal CCU. Pertama dengan memodelkan struktur CCU, pemilihan material, penentuan jenis dan besar beban yang terjadi. Ketiga data *input* tersebut diolah terlebih dahulu menggunakan program analisis struktur. *Output* yang didapatkan adalah nilai WLL_{min}, tegangan tarik dan tegangan puntir yang akan digunakan untuk menentukan kapasitas *shackle*-nya dan selanjutnya untuk menentukan dimensi *padeye*-nya. Dimensi *padeye* yang sudah didapat dari tabel *shackle* (Crosby, 2003) akan dimodelkan berdasarkan standar DNV 2.7-1 dan BS-EN 12079-1:2006.

2.1. Desain *Padeye*

Berdasarkan rujukan standar (BS-EN 12079-1, 2006) dan (DNV 2.7-1, 2013) berikut adalah tabel komparasi pemodelan *padeye*-nya.

Tabel 1. Perbandingan Standar BS-EN dan DNV dalam penentuan *padeye*

BS EN 12079 (2006)	
Cheek Plate: Not Required	
	
DNV 2.7-1 (2013)	
Cheek Plate: When the pad eye thickness is below the 75% limit, it can be increased by welding on cheek plates.	
	

Kedua *padeye* diatas, ditempatkan kedalam *slot* dari CCU. Dengan ilustrasi di bawah ini:



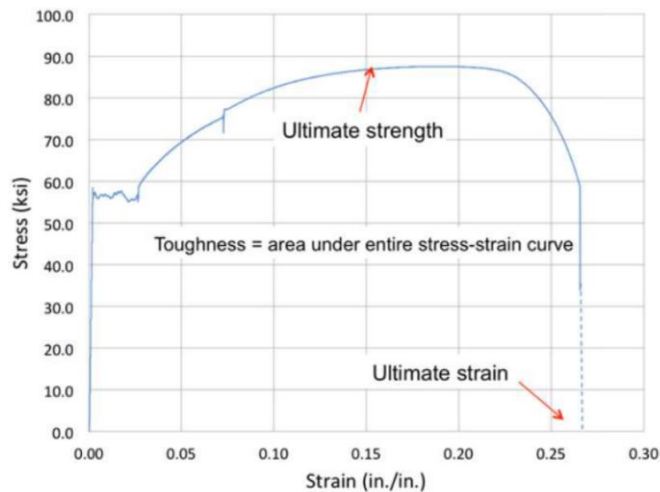
Gambar 1. CCU dengan *lifting* dan *padeye* (Ferguson, 2019)

Material *padeye* yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Material Baja ASTM A-36. Material ini selain mudah didapat juga memiliki tingkat kekuatan dan keuletan yang baik.

Tabel 2. Komposisi kimia dan sifat mekanis material ASTM A-36

Komposisi Kimia		Sifat Mekanis	
Karbon, C	0,25 – 0,29 %	Masa jenis	7.800 kg/m ³
Tembaga, Cu	0,20 %	Modulus tarik	200 GPa
Besi, Fe	98 %	Modulus elastisitas	140 GPa
Mangan, Mn	1,03 %	Rasio Poisson	0,26
Fosfor, P	0,04 %	Regangan tarik	75 GPa
Silikon, Si	0,28 %	Tegangan tarik	250 MPa
Sulfur, S	0,05 %	Tegangan tarik maksimum	400 MPa

Sebagai ilustrasi, *padeye* yang diletakan pada mesin tes dengan beban *tension-compression* sampai terjadi perubahan bentuk geometri *padeye*. Maka, regangan maksimum yang terjadi pada *padeye* tersebut telah mencapai regangan tertinggi (*ultimate strain*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Kurva Tegangan – Regangan

Dalam penentuan tegangan dan regangan yang terjadi, digunakan 2 metode yaitu dengan pendekatan *engineering stress* dan *true stress*. Pendekatan ini dapat digunakan untuk menjelaskan perilaku *physical systems* pada persamaan diferensial parsial, yang merupakan persamaan non-linear rumit yang menggambarkan sifat sistem tersebut. Salah satu alat yang paling umum digunakan untuk mencari solusi persamaan tersebut adalah *Finite Element Method* (FEM)

2.2. Metode-metode pembebanan pada CCU

Beban yang terjadi dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu beban pengangkatan (*lifting loads*) dan beban bentur (*impacts loads*).

1. Beban pengangkatan (*Lifting Loads*) berdasarkan DNV 2.7-1 & BS EN 12079-1

Beban rencana pada struktur utama CCU dirumuskan:

$$F_L = 2,5 \times R \times g \quad (1)$$

Nilai beban rencana ini dipengaruhi oleh beban *gross* (R) yang dipengaruhi juga beban gravitasi (g). Nilai g yang dipakai adalah $\sim 9,81 \text{ m/s}^2$

2. Gaya Resultan pada sling dapat dirumuskan:

$$F = \frac{3.Rg}{(n-1).\cos v} \quad (2)$$

Gaya resultan pada *padeye* beban *gross* (Kg) yang diangkat dan dipertimbangkan juga dengan jumlah *padeye* (n) pada CCU tersebut. Faktor lain yang sangat mempengaruhi dari gaya resultan ini adalah sudut vertikal sling (v).

3. Beban Benturan (*Impact Loads*)

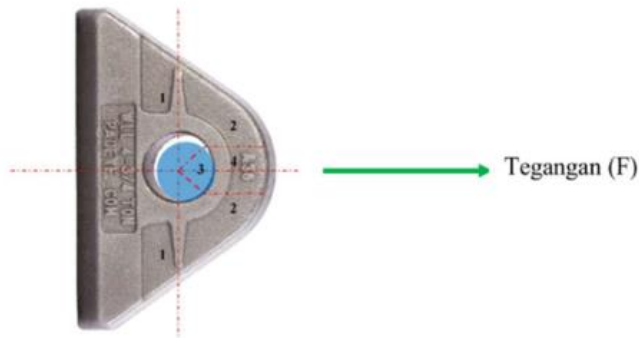
Beban benturan diasumsikan sebagai beban dinamik yang berdurasi singkat, dibagi menjadi dua yaitu benturan horizontal dan vertikal. Pada penelitian ini hanya dipertimbangkan benturan horizontal yang kemudian diasumsikan sebagai beban puntir. Nilai beban benturan didapatkan dari persamaan:

$$F_{HI} = 0,25 \times R \times g \quad (3)$$

2.3. Desain beban kapasitas pada *padeye*

1. Pendekatan Teori

Mode kegagalan pada *padeye* yang menerima beban tarik ataupun puntir dapat terjadi secara terus menerus. Kegagalan itu terjadi di area yang berbeda pada struktur *padeye* yang digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Mode kegagalan pada *padeye* (Har-Bach, 2018)

Sebagaimana digambarkan pada skema di atas, mode kegagalan pada *padeye* terbagi menjadi empat (4) tipe kegagalan, (1) Kegagalan Tegangan/*Tension Failure* (2) Kegagalan Robek/*Tear-Out Failure* (3) Kegagalan Poros/*Bearing Failure* (4) Kegagalan Tegangan Melingkar/*Hoop Tension Failure*.

Pada penelitian ini, hanya akan diteliti kegagalan untuk kegagalan Robek (*Tear-Out Failure*) dan kegagalan poros (*Bearing Failure*). Dikarenakan kedua kegagalan tersebut sangat dasar dan umum digunakan sebagai desain kriteria untuk memperkirakan kapasitas beban pada *padeye* dan *shackle*.

2. Kegagalan Robek (*Tear-out failure*)

Desain kapasitas pada *padeye* untuk kegagalan robek dapat dirumuskan:

$$P_t = 2 \cdot \tau_{Rd} \cdot A_{sh} \quad (4)$$

Dimana, tegangan geser didapatkan dari persamaan:

$$\tau_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{m,1}} \sqrt{3} \quad (5)$$

Tegangan geser ini dipengaruhi oleh *tensile yield strength* (F_y) dan *safety factor* yang didapatkan dari tabel dibawah ini.

Tabel 3. *Partial Safety Factor*

Type of Calculation	Material factor 1)	Value
Resistance of Class 1,2 or 3 cross-sections	γ_{M0}	1,15
Resistance of Class 4 cross-sections	γ_{M1}	1,15
Resistance of member to buckling	γ_{M1}	1,15
Resistance of net section at bolt holes	γ_{M2}	1,3
Resistance of fillet and partial penetration welds	γ_{MW}	1,3
Resistance of bolted connections	γ_{Mb}	1,3

$$A_{sh} = \left(R - \frac{d_h}{2} \right) t_p \quad (6)$$

Area *tearing-out* (Ash) ini ditentukan oleh Radius terluar (R), diameter lubang dari *padeye* (dh) dan ketebalan *plate padeye* (tp).

3. Kegagalan Poros (*Bearing failure*)

$$P_b = f_{b,Rd} \cdot t_{eff} \cdot d \quad (7)$$

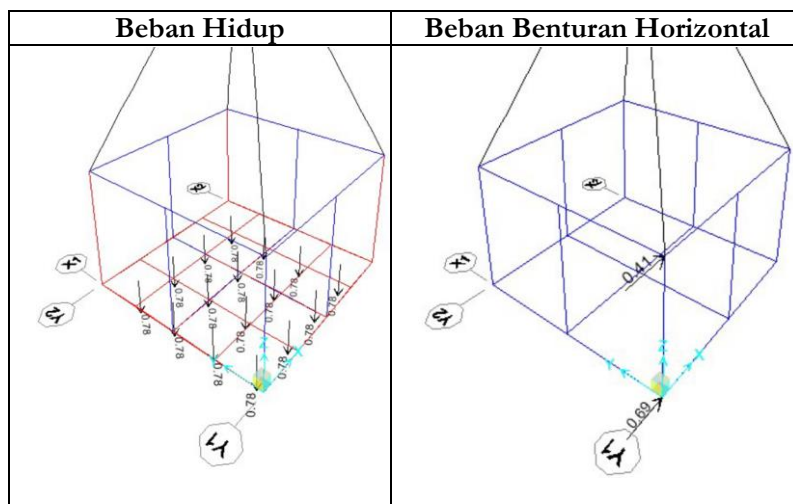
Dimana,

$$f_{b,Rd} = 1,5 \frac{f_y}{\gamma_{m,1}} \quad (8)$$

Koefisien *design shear strength* ditentukan oleh parsial *safety factor* ($\gamma_{m,1}$), ketebalan efektif dari *padeye* (t_{eff}) dan diameter *pin shackle* (d)

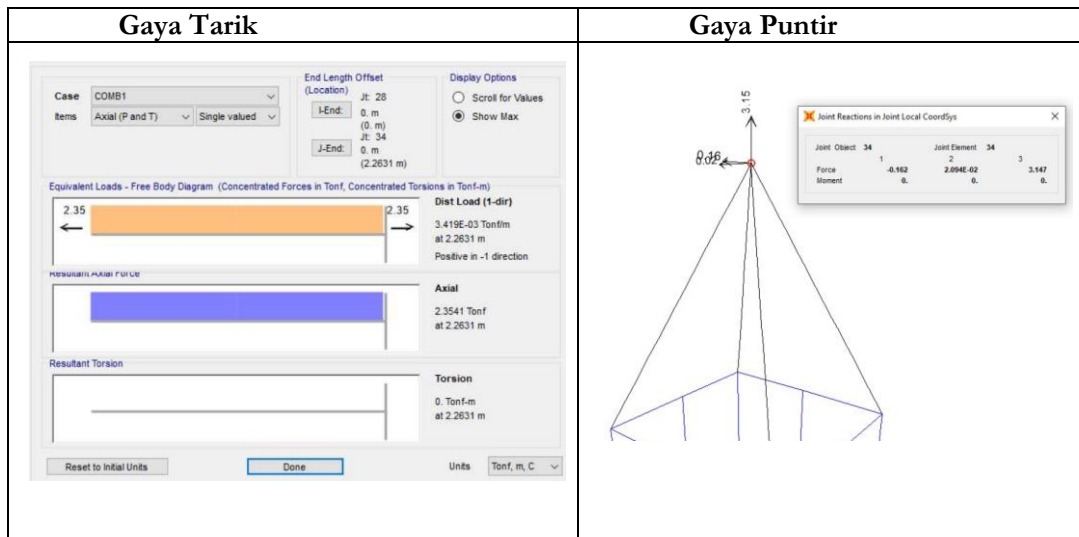
2.4. Penentuan beban *padeye*.

Dengan asumsi beban hidup yang bekerja pada CCU sebesar 2 Ton, kemudian dilakukan kalkulasi menggunakan program struktur untuk mendapatkan gaya yang terjadi pada *lifting point*-nya. Selain beban hidup, juga diaplikasikan beban benturan horizontal untuk tinjauan beban puntir pada *padeye*.

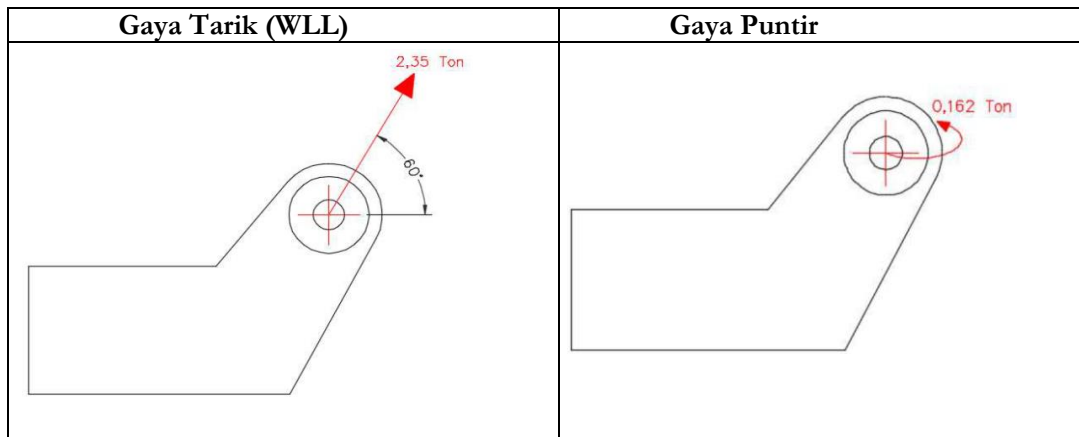


Gambar 4. Simulasi pembebanan pada CCU

Data *output* dari program kalkulasi tersebut dapat dilihat pada reaksi yang terjadi pada masing-masing *lifting point*-nya.



Gambar 5. Gaya yang terjadi pada CCU



Gambar 6. Gaya yang terjadi pada padeye

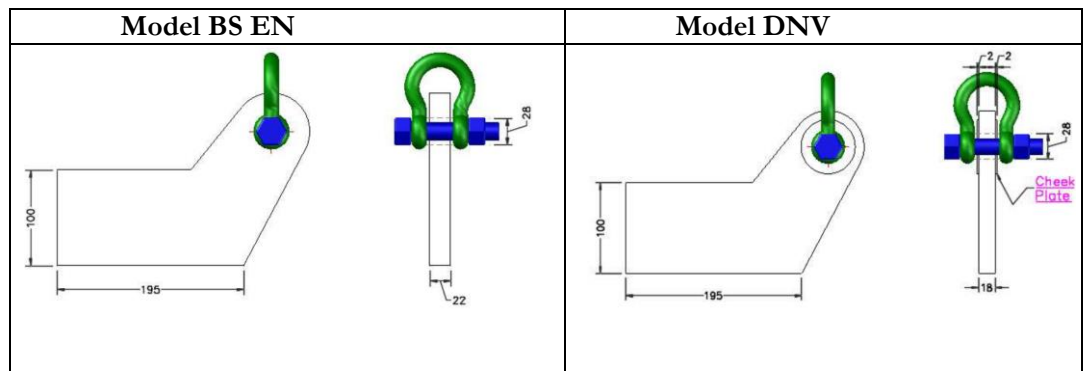
2.5. Penentuan Dimensi

Sebelum menentukan dimensi *padeye*, terlebih dahulu ditentukan kapasitas *shackle*-nya yang merujuk pada tabel berikut.

Tabel 4. Penentuan kapasitas *shackle* berdasarkan Kapasitas Angkat Aman (WLL)

Nominal Size (in.)	Working Load Limit (t)*	Stock No.		Weight Each (lbs.)	Dimensions (in.)										Tolerance +/-	
		G-2130	S-2130		A	B	C	D	E	F	H	L	N	C	A	
3/16	1/3‡	1019464	-	.06	.38	.25	.88	.19	.60	.56	1.47	.98	.19	.06	.06	
1/4	1/2	1019466	-	.11	.47	.31	1.13	.25	.78	.61	1.84	1.28	.25	.06	.06	
5/16	3/4	1019468	-	.22	.53	.38	1.22	.31	.84	.75	2.09	1.47	.31	.06	.06	
3/8	1	1019470	-	.33	.66	.44	1.44	.38	1.03	.91	2.49	1.78	.38	.13	.06	
7/16	1-1/2	1019471	-	.49	.75	.50	1.69	.44	1.16	1.06	2.91	2.03	.44	.13	.06	
1/2	2	1019472	1019481	.79	.81	.64	1.88	.50	1.31	1.19	3.28	2.31	.50	.13	.06	
5/8	3-1/4	1019490	1019506	1.68	1.06	.77	2.38	.63	1.69	1.50	4.19	2.94	.69	.13	.06	
3/4	4-3/4	1019515	1019524	2.72	1.25	.89	2.81	.75	2.00	1.81	4.97	3.50	.81	.25	.06	
7/8	6-1/2	1019533	1019542	3.95	1.44	1.02	3.31	.88	2.28	2.09	5.83	4.03	.97	.25	.06	
1	8-1/2	1019551	1019560	5.66	1.69	1.15	3.75	1.00	2.69	2.38	6.56	4.69	1.06	.25	.06	
1-1/8	9-1/2	1019579	1019588	8.27	1.81	1.25	4.25	1.13	2.91	2.69	7.47	5.16	1.25	.25	.06	
1-1/4	12	1019597	1019604	11.71	2.03	1.40	4.69	1.29	3.25	3.00	8.25	5.75	1.38	.25	.06	
1-3/8	13-1/2	1019613	1019622	15.83	2.25	1.53	5.25	1.42	3.63	3.31	9.16	6.38	1.50	.25	.13	
1-1/2	17	1019631	1019640	20.80	2.38	1.66	5.75	1.53	3.88	3.63	10.00	6.88	1.62	.25	.13	
1-3/4	25	1019659	1019668	33.91	2.88	2.04	7.00	1.84	5.00	4.19	12.34	8.80	2.25	.25	.13	
2	35	1019677	1019686	52.25	3.25	2.30	7.75	2.08	5.75	4.81	13.68	10.15	2.40	.25	.13	
2-1/2	55	1019695	1019702	98.25	4.13	2.80	10.50	2.71	7.25	5.69	17.90	12.75	3.13	.25	.25	
3	† 85	1019711	-	154.00	5.00	3.30	13.00	3.12	7.88	6.50	21.50	14.62	3.62	.25	.25	
3-1/2	† 120 ‡	1019739	-	265.00	5.25	3.76	14.63	3.62	9.00	8.00	24.88	17.02	4.38	.25	.25	
4	† 150 ‡	1019757	-	338.00	5.50	4.26	14.50	4.00	10.00	9.00	25.68	18.00	4.56	.25	.25	

Merujuk pada nilai WLL pada Gambar 6, maka nilai WLL yang digunakan untuk menentukan dimensi *padeye* adalah 3,25 Ton dan dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 7. Pemodelan dimensi *padeye*

2.6. Analisa Tegangan dengan *Finite Element*

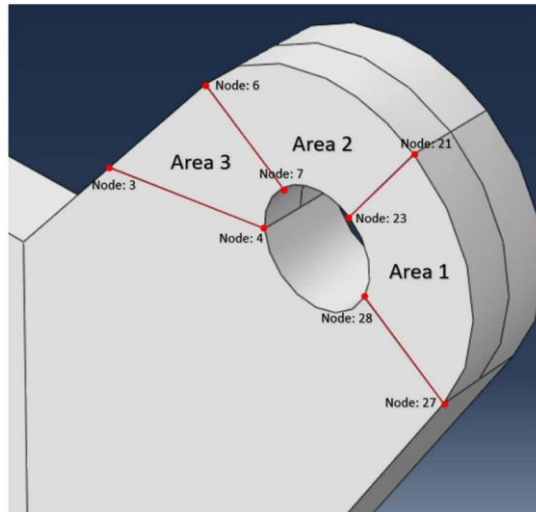
Program yang digunakan untuk analisis tegangan adalah *abaqus*, berikut adalah langkah – langkah analisisnya:

1. Penentuan Satuan
2. Konfigurasi pemodelan
3. Pemilihan material (*Material properties*)

4. Simulasi pembebanan (*Load combination*)
5. Penentuan titik tumpuan (*Boundary Condition*)
6. Penentuan *Mesh* pada model
7. Analisis hasil simulasi (*Post processing for stress analysis*)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendapatkan hasil analisis perbandingan yang detail dan akurat, *padeye* dianalisis kedalam beberapa area dan pola pembebanan diterapkan secara *incremental*.



Gambar 8. Pembagian area untuk analisis

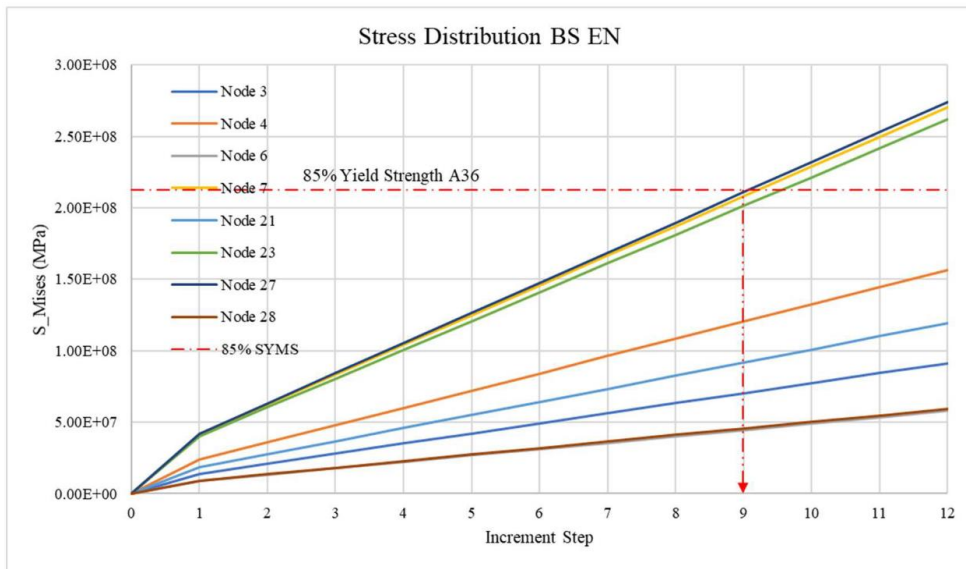
Tabel 5. Beban *incremental* tarik dan puntir

<i>Increment Step</i>	Tegangan Tarik (<i>Pressure</i>)		Tegangan Puntir (<i>Moment</i>)	
	Ton (T)	Pascal (Pa)	Ton (T)	Pascal (Pa)
1	2.350	3.74E+07	0.162	2.58E+06
2	3.525	5.61E+07	0.243	3.87E+06
3	4.700	7.48E+07	0.324	5.16E+06
4	5.875	9.35E+07	0.405	6.45E+06
5	7.050	1.12E+08	0.486	7.74E+06
6	8.225	1.31E+08	0.567	9.03E+06
7	9.400	1.50E+08	0.648	1.03E+07
8	10.575	1.68E+08	0.729	1.16E+07
9	11.750	1.87E+08	0.810	1.29E+07
10	12.925	2.06E+08	0.891	1.42E+07
11	14.100	2.24E+08	0.972	1.55E+07
12	15.275	2.43E+08	1.053	1.68E+07

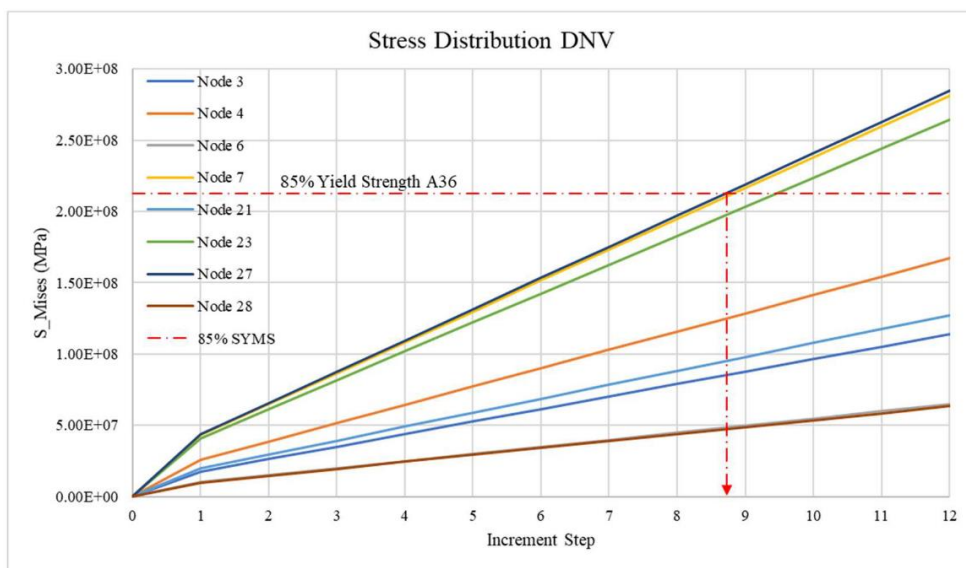
3.1. Hasil Analisis dan Pembahasan

Setelah dilakukan simulasi di *Abaqus*, diperoleh hasil perbedaan di antara masing-masing *node* yang ditinjau, yang menunjukkan beberapa karakteristik perbedaan penggunaan standar BS EN dan DNV. Tegangan yang dialami oleh *padeye* akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan tekanan dan momen yang terjadi. Dalam penelitian ini, batasan tegangan *padeye* yang diizinkan adalah kurang dari 85% dari SMYS (212,5 MPa).

Rangkuman diagram S_Mises vs Pressure + Moment yang terjadi pada *padeye* BS EN dan DNV.



Gambar 9. Tegangan Von_Mises BS EN

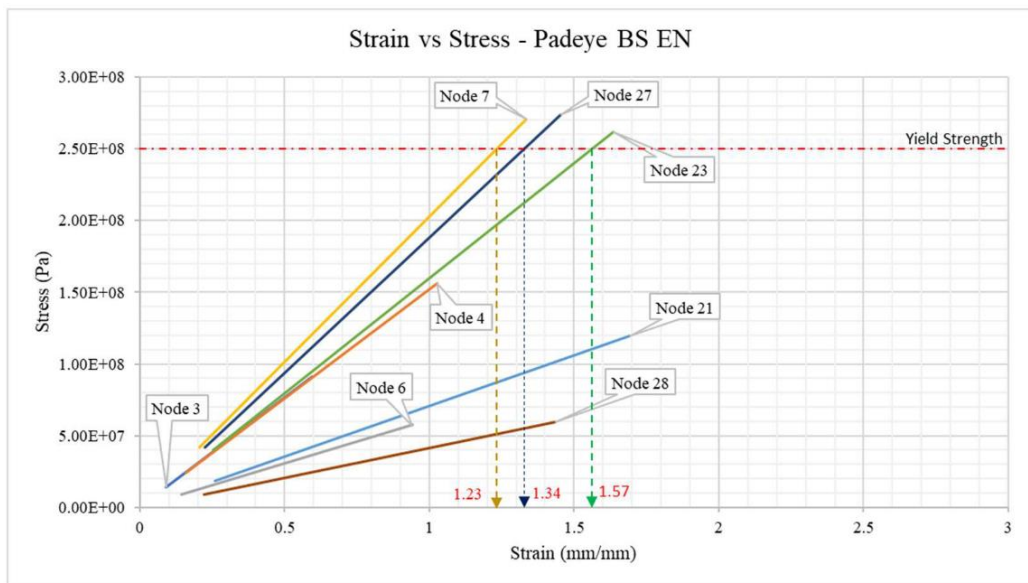


Gambar 10. Tegangan Von_Mises DNV

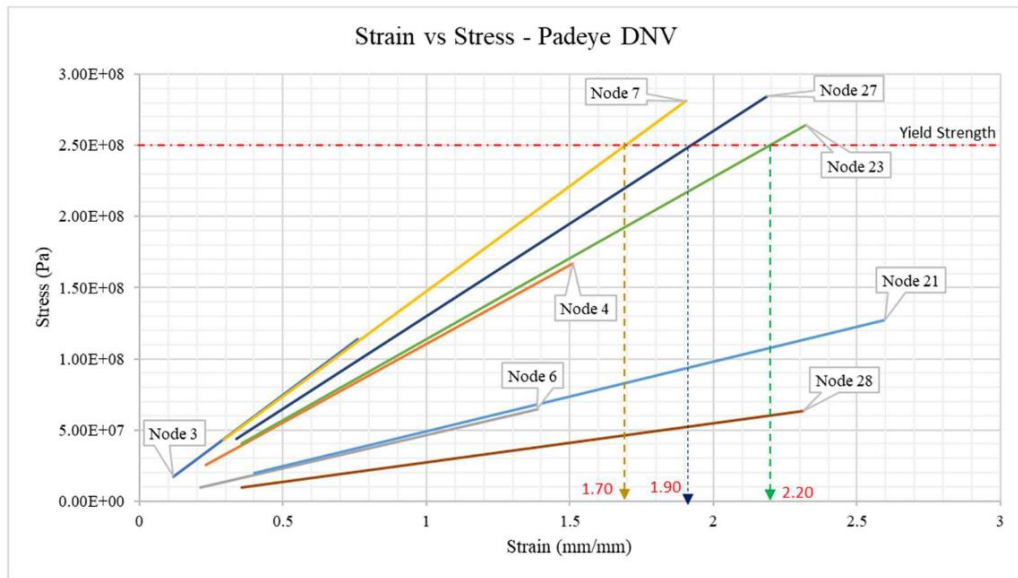
Jika ditinjau dari batasan 85% dari nilai *yield strength* material A36, dimensi *padeye* BS EN memiliki ketahanan lebih besar dari dimensi *padeye* DNV. Pada *increment* step ke-9 pemodelan *padeye* BS EN sudah menghasilkan tegangan maksimum yang berada pada nilai SMYS-nya, sedangkan pada pemodelan *padeye* DNV pada *increment* step yang kurang dari 9 sudah menyentuh tegangan maksimum SMYS-nya. Dalam bahasan selanjutnya, akan dijelaskan faktor dimensi dan pemodelan yang berperan pada besar kecilnya tegangan yang terjadi pada masing-masing *Node* baik untuk pemodelan secara BS EN dan pemodelan secara DNV.

3.2. Control Tegangan dan Regangan Material *Padeye*

Untuk mengetahui kapasitas *padeye* sampai pada kondisi patah dengan program *Finite Element Analysis* (FEA) dilakukan dengan metode *nonlinear*. Untuk itu diperlukan hubungan antara tegangan dan regangan dari material *padeye* mulai dari daerah elastis hingga daerah plastis. Karena kurva tegangan-regangan aktual dari tiap *Node* tidak diberikan pada literatur, maka digunakan pendekatan untuk menentukan regangan yang terjadi pada saat tegangan *Von Mises* menyentuh tegangan *yield* (*yield strength*).



Gambar 11. Kurva tegangan – regangan *padeye* BS EN



Gambar 12. Kurva tegangan – regangan *padeye* DNV

Nilai perbandingan regangan yang terjadi pada kurva Tegangan – Regangannya melebihi nilai tegangan ijin (250 MPa).

Tabel 6. Hasil Regangan dari Tegangan *Yield*

Node	Strain (mm/mm)		Persentase perbandingan nilai Regangan antara BS EN dan DNV
	BS EN	DNV	
7	1,23	1,70	$\frac{(1,70-1,23)}{1,23} \times 100\% = 38,21 \%$
23	1,57	2,20	$\frac{(2,20-1,57)}{1,57} \times 100\% = 40,13 \%$
27	1,34	1,90	$\frac{(1,90-1,34)}{1,34} \times 100\% = 41,79 \%$

Jika diambil dari ketiga *node* di atas, selisih regangan yang terjadi pada *padeye* DNV mempunyai nilai regangan rata-rata 40% lebih besar dibandingkan dengan nilai regangan yang terjadi pada *padeye* BS EN.

3.3. Pembahasan

Pemodelan yang telah dilakukan di *Abaqus* akan dibandingkan dengan hasil *teoretical* untuk ditinjau dari segi tegangan dan regangannya. Untuk mengidentifikasi kegagalan struktur dari *padeye* ini, nilai tegangan *Von Mises* yang terjadi akan dibandingkan dengan nilai tegangan maksimum luluh (*ultimate yield strength*) dari material A36. Kriteria dari kegagalan tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma_{von} \leq \sigma_{ult} = 58 \text{ ksi} = 400 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_p \leq \epsilon_{ult} = 0,25 \text{ in/in} = 6,6 \text{ mm/mm}$$

Ditinjau dari nilai regangan yang terjadi dengan tinjauan beban normal, maka nominal regangan pada masing – masing *node*.

Tabel 7. Regangan pada *increment* 1 (Beban Normal)

<i>Node</i>	Regangan (mm/mm)	
	BS EN	DNV
<i>Node</i> 3	0,091	0,117
<i>Node</i> 4	0,158	0,232
<i>Node</i> 6	0,145	0,213
<i>Node</i> 7	0,205	0,293
<i>Node</i> 21	0,260	0,399
<i>Node</i> 23	0,252	0,357
<i>Node</i> 27	0,224	0,336
<i>Node</i> 28	0,221	0,356

Regangan terbesar terjadi pada *node* 21 sebesar $0,399 \text{ mm}/\text{mm}$. Jika dibandingkan dengan nilai regangan maksimum (*ultimate strain*) untuk material A36 yaitu sebesar $6,6 \text{ mm}/\text{mm}$. Maka nilai regangan pada *node* 21 tersebut masih jauh dibawah nilai yang di izinkan untuk material A36.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis *padeye* pada struktur CCU dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Ditinjau dari tiga *Node* yang menyentuh tegangan *yield* 250 MPa, Nilai regangan yang terjadi pada *padeye* BS EN rata-rata 40% lebih kecil daripada regangan yang terjadi pada *padeye* DNV.
2. Dari tinjauan 8 *Node* yang ditentukan, pemodelan *padeye* BS EN mendapatkan nilai *displacement* yang terjadi dengan rata-rata 46 % lebih kecil daripada pemodelan *padeye* DNV. Didapatkan juga perbedaan signifikan *displacement* terjadi pada *Node* 28, dimana *displacement* yang terjadi pada *padeye* DNV 61% lebih besar dari nilai *displacement padeye* BS EN. Hal ini dikarenakan struktur utama *padeye* memiliki selisih ketebalan yang signifikan antara *padeye* BS EN dan DNV. Dan *Cheek Plate* yang diaplikasikan pada pemodelan *padeye* DNV tidak berpengaruh signifikan pada perkuatan struktur utamanya.
3. Tegangan *Von Mises* yang terjadi pada *Padeye* DNV telah mencapai nilai batasan tegangan *yield* material A36 (212,5 MPa) pada *increment* ke-9 pada tinjauan *Node* 27. Sedangkan untuk pemodelan *padeye* BS EN pada *increment* ke-9 tersebut belum mencapai nilai batasan *yield strength* material A36 (212,5 MPa).
4. Ditinjau dari nilai batasan tegangan *yield* dari material A36 (212,5 MPa), Untuk pemodelan *padeye* BS EN pada *increment* ke 11 telah melebihi batas tegangan *yield* tersebut dengan persentase 104,22% pada *node* 23.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS, 2008, Manual Book Version 6.8: Getting started with Abaqus, *Tutorial Edition*, Abaqus, Inc.
- ASTM, 2015, ASTM A36/A36M14: Standard Specification for Carbon Structural Steel, *Material properties*, American Society for Testing and Materials
- BS EN, 2006, BS EN 12079-1: Offshore containers and associated lifting sets — Part 1: Offshore containers, *Recommended Practice*, British Standard European Norm
- BS EN, 2006, BS EN 12079-2: Offshore containers and associated lifting sets — Part 2: Lifting sets, *Recommended Practice*, British Standard European Norm
- BY Y. Higashida, J. D. Burk, AND F. V. Lawrence, JR., 1978, Strain Controlled Fatigue Behavior of ASTM A36 and A514 Grade F Steels and 5083-0 Aluminum Weld Materials, *Welding research supplement*, pp 334-344
- Chevron, 2009, MCA, Lifting and Rigging Standard. Houston: Chevron Corporation.
- Crosby Catalogue, 2003, Crosby Bolt-Type Shackles
- Daniela Scorza, Andrea Carpinteri, Sabrina Vantadori, 2018, Tension failure assessment at lug hole edges, *International Journal of Fatigue*, Department of Engineering & Architecture, University of Parma.
- DNV, 2013, DNV Recommended Practice 2.7-1: Standard for Certification of Offshore Containers, *Recommended Practice*, Det Norske Veritas
- Gérald Portemont, Julien Berthe, Alain Deudon, François-Xavier Irisarri, 2018, Static and dynamic bearing failure of carbon/epoxy composite joints. DMAS, ONERA, University Paris Saclay. *Composite Structures*, Université Paris Saclay, France
- Hikmat Saa'id Saleh, 2016, Ultimate capacity of pad eyes in lifting operations, *A thesis submitted to the Faculty of Science and Technology*, University of Stavanger, Norway
- Iqbal Gayuh R.M.S, Yeyes M, dan Yoyok S.M., 2016, Analisis Keandalan Struktur Padeye Berdasarkan Konfigurasi Rigging pada Lifting Upper Deck Modul MODEC dengan Pendekatan Dinamik. Jurusan Teknik Kelautan, *Technical Journal*, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Indonesia.
- Roberto Leon, 2018, Journal of Visualized Experiments, Stress-Strain Characteristics of Steels. Department of Civil and Environmental Engineering, *Technical Journal*, Virginia Tech, Blacksburg, VA
- T.W. Ling, X.L. Zhao, R. Al-Mahaidi, J.A. Packer, 2006, Investigation of block shear tear-out failure in gusset-plate welded connections in structural steel hollow sections and very high strength tubes. *Technical Journal*, Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Monash University.

Studi CFD mengenai Pengaruh Sifat Fisis Fluida terhadap Karakteristik *Counter-Current Flow Limitation* pada Pipa Horizontal

A S. Pratama*, Indarto dan Deendarlianto

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
*E-mail: andhika.s.p@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Tujuan penelitian ini ialah untuk mempelajari pengaruh densitas cairan, viskositas cairan, dan densitas gas terhadap karakteristik *counter current flow limitation* atau *flooding* pada pipa horizontal. Analisis numerik dilakukan menggunakan *software* CFD Ansys Fluent 2020 R2 *student version* dengan menerapkan model *volume of fluid* (VOF). Aparatus penelitian yang digunakan ialah geometri pipa *hot leg* reaktor PWR tipe German Konvoi skala 1/30 yang terdiri dari *reactor pressure vessel*, *pipa hot leg*, dan *steam generator*. Pipa *hot leg* yang digunakan memiliki diameter dalam $D = 25,4$ mm dan panjang pipa horizontal $L = 635$ mm ($L/D = 25$). Cairan yang digunakan ialah air, kloroform, larutan gliserin 10%, dan propil asetat, sedangkan gas yang digunakan ialah udara dan uap air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan densitas cairan menyebabkan peningkatan kecepatan *superficial flooding* gas, serta menyebabkan pergeseran *hydraulic jump* dan *locus of slugging* menjauhi belokan. Hasil dari peningkatan viskositas cairan menunjukkan pola yang berkebalikan dibandingkan hasil dari peningkatan densitas cairan. Penurunan densitas gas menyebabkan *flooding* terjadi pada kecepatan *superficial gas* yang lebih tinggi, serta menyebabkan pergeseran *hydraulic jump* dan *locus of slugging* menjauhi belokan.

Kata kunci : *Counter-current flow limitation, Sifat fisis fluida, Computational fluid dynamics.*

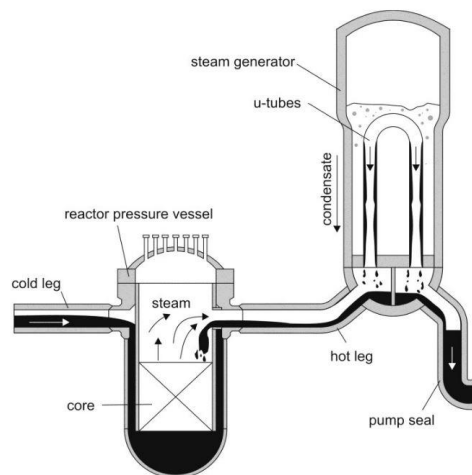
Abstract

The purpose of this research was to study the effect of liquid density, liquid viscosity, and gas density on the characteristics of counter-current flow limitation or flooding in horizontal pipes. Numerical analysis was carried out using CFD software Ansys Fluent 2020 R2 student version by applying the volume of fluid (VOF) model. The research apparatus used was the geometry of 1/30 downscale of PWR hot leg pipe of the German Convoy type reactor which consisted of a reactor pressure vessel, hot leg pipe, and a steam generator. The inner diameter of the hot leg pipe was $D = 25,4$ mm and the length of the horizontal pipe was $L = 635$ mm ($L/D = 25$). The liquids used were water, chloroform, 10% glycerin solution, and propyl acetate, while the gases used were air and water vapor. The results showed that an increase in liquid density caused an increase in the gas superficial flooding velocities, as well as a shift in the hydraulic jump and locus of slugging away from the bend. The result of increasing the viscosity of the liquid showed the opposite pattern compared to the result of increasing the density of the liquid. The decrease in gas density caused flooding to occur at higher superficial gas velocities and caused a shift in the hydraulic jump and locus of slugging away from the bend.

Keywords : Counter-current flow limitation, Fluid properties, Computational fluid dynamics.

1. PENDAHULUAN

Pada *pressurized water reactor* (PWR), *coolant* pada siklus primer berfungsi sebagai media pemindah kalor dari bahan bakar nuklir di *reactor pressure vessel* (RPV) menuju *feedwater* pada sistem sekunder. Perpindahan kalor ini terjadi di steam generator (SG). Kalor yang diterima oleh *feedwater* akan menyebabkan *feedwater* berubah fase menjadi uap. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin dan generator listrik. Pada kondisi operasi normal, *coolant* dijaga pada fase cair pada tekanan sekitar 15 MPa (Deendarlianto et al., 2012). Ketika terjadi kebocoran pada sistem primer, tekanan pada sistem primer akan mengalami penurunan. Ketika tekanan sistem primer lebih rendah dibandingkan tekanan saturasi *coolant*, *coolant* akan mengalami perubahan fase menjadi uap. Kondisi ini disebut sebagai *loss-of-coolant accident* (LOCA). Uap akan mengalir menuju *steam* generator ketika *level coolant* di *reactor pressure vessel* lebih rendah dibandingkan *hot leg*. Uap akan mengembun di *steam* generator dan sebagian kondensat akan mengalir menuju *reactor pressure vessel*. Aliran uap dan kondensat yang bersifat berlawanan arah ini membentuk konfigurasi aliran dua fase cair-gas berlawanan arah (*counter-current liquid-gas two phase flow*). Keberadaan konfigurasi aliran ini membentuk proses pendinginan *reflux condensation* yang hanya dapat stabil pada kecepatan cairan dan gas tertentu. Ketika kecepatan aliran uap meningkat, aliran kondensat menuju RPV akan berkurang dan sebagian kondensat akan mengalir kembali menuju SG. Fenomena ini disebut sebagai *counter-current flow limitation* (CCFL) atau *flooding* (Deendarlianto et al., 2011). Konfigurasi aliran dua fase berlawanan arah pada siklus primer PWR ditampilkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Fenomena aliran dua fase cair-gas berlawanan arah ketika terjadi LOCA pada PWR (Seidel et al., 2011)

Salah satu parameter yang mempengaruhi karakteristik *flooding* ialah sifat fisis fluida (*fluid properties*). Terkait dengan *surface tension*, Suzuki dan Ueda (1977) menemukan bahwa kecepatan *flooding* gas mencapai nilai maksimum ketika nilai *surface tension* mendekati 0,05 N/m. Ousaka et al. (2006) dan Deendarlianto et al. (2010) melakukan penelitian dengan cara memvariasikan *surface tension* sembari menjaga densitas dan viskositas cairan pada nilai yang konstan dan menemukan bahwa peningkatan *surface tension* menyebabkan peningkatan kecepatan *flooding* gas. Hasil yang serupa juga ditemui oleh Pantzali et al. (2007) walaupun pengaruh *surface tension* yang ditemukan lebih kecil dibandingkan viskositas cairan. Mouza et al. (2005) menemukan bahwa *surface tension* memiliki *stabilizing effect* pada permukaan cairan. Terkait dengan viskositas cairan, Kinoshita et al. (2011) menemukan bahwa peningkatan viskositas cairan menyebabkan

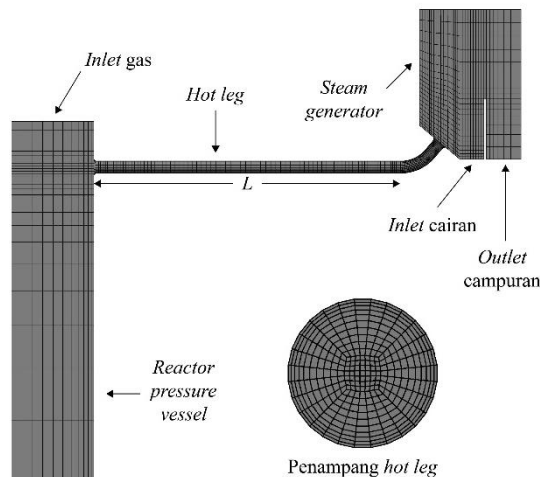
penurunan kecepatan *superficial flooding gas* dan pengaruh viskositas tidak ditemukan pada kecepatan *superficial* cairan yang rendah. Penurunan kecepatan *superficial flooding gas* akibat peningkatan viskositas cairan juga ditemukan oleh Pantzali et al. (2007) dan Prayitno et al. (2012), tetapi hasil yang berkebalikan ditemukan oleh Suzuki dan Ueda (1977).

Ohnuki (1986) melakukan penelitian dengan menggunakan kombinasi fluida air-udara dan air-uap air dan memperoleh hasil yang mana tidak ditemukannya perbedaan grafik *flooding* antara kombinasi fluida air-udara dan air-uap air. Berdasarkan hal tersebut, disimpulkan bahwa kombinasi fluida tidak mempengaruhi grafik *flooding*. Zapke dan Kroeger (1996) memperoleh hasil yang berbeda yang mana densitas fluida memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan *surface tension* dan viskositas cairan untuk pipa vertikal.

Hasil *literature review* menunjukkan bahwa terdapat beberapa hasil penelitian yang saling berkebalikan. Hal ini dapat disebabkan oleh penelitian mengenai sifat fisis fluida belum dilaksanakan secara sistematis, yaitu dengan menjaga sifat fisis fluida yang lain konstan ketika salah satu sifat fisis fluida diteliti. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh densitas cairan, viskositas cairan, dan densitas gas terhadap karakteristik CCFL pada pipa horizontal. Penelitian mengenai *surface tension* yang telah dilakukan oleh Ousaka et al. (2006) dan Deendarlianto et al. (2010) bersifat sistematis sehingga *surface tension* tidak dibahas dalam penelitian ini. Pembahasan mengenai pengaruh densitas cairan akan dilakukan terlebih dahulu, diikuti oleh pembahasan mengenai pengaruh viskositas cairan dan densitas gas. Pada masing-masing bagian, grafik CCFL akan dibahas terlebih dahulu. Selanjutnya, pembahasan dilakukan terhadap proses terjadinya *flooding* melalui visualisasi pola aliran dan pengaruh *flooding* terhadap *pressure difference* antara RPV dan SG, kecepatan *superficial delivered* cairan, dan volume cairan yang memasuki RPV. Selanjutnya, pembahasan akan dilakukan terhadap *locus of slugging* dan diakhiri dengan penjelasan mengenai bagaimana sifat-sifat fisis fluida tersebut mempengaruhi karakteristik CCFL.

2. METODE PENELITIAN

Geometri yang digunakan pada penelitian ini adalah geometri pipa *hot leg* reaktor PWR tipe German Konvoi skala 1/30. Simulasi dilakukan secara tiga dimensi. Aparatus penelitian ini terdiri dari *reactor pressure vessel*, *hot leg*, dan *steam generator*. *Hot leg* tersusun dari pipa horizontal dan belokan. Dimensi yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada aparatus yang digunakan pada penelitian Badarudin (2018). *Hot leg* memiliki diameter dalam $D = 25,4$ mm dengan panjang pipa horizontal $L = 635$ mm ($L/D = 25$). Sudut kemiringan *hot leg* (dihitung dari sudut antara pipa horizontal dengan sumbu horizontal) yang digunakan ialah $\theta = 0^\circ$. Belokan memiliki sudut $\beta = 50^\circ$ dengan radius dalam dan luar masing-masing 67,3 mm dan 97,2 mm. *Grid* awal yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 72.511 *cells* dengan *grid* pada penampang *hot leg* berjumlah 329 *cells*. Penelitian yang dilakukan Kinoshita et al. (2011) dan Murase et al. (2012) menunjukkan bahwa *grid* dengan rentang ukuran 59.000 hingga 120.000 *cells* cukup untuk digunakan pada simulasi CCFL. *Grid independence test* dilakukan dengan meningkatkan jumlah cell menjadi 1,5 kali jumlah *cell* awal (108.094 *cells*). Geometri dan *grid* yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Geometri bagian *hot leg* reaktor PWR tipe German Konvoi skala 1/30 (mengikuti aparatus penelitian Badarudin (2018)) dan *grid* komputasi

Cairan diinjeksikan melalui bagian bawah SG dan gas diinjeksikan melalui bagian atas RPV. Cairan dan gas keluar dari aparatus penelitian melalui *outlet* yang terletak pada bagian bawah SG dibalik *baffle*. *Boundary condition* yang digunakan pada lokasi penginjeksian cairan dan gas ialah *velocity inlet* dan *boundary condition* yang digunakan pada keluaran cairan dan gas ialah *pressure outlet*. Dinding aparatus dimodelkan sebagai *stationary wall* dengan kondisi *no-slip*.

Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan komputer simulasi pada Lab. Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Komputer ini memiliki spesifikasi CPU 6 *cores* dengan *clock speed* 3,2 GHz dan RAM 32 GB. *Software* yang digunakan untuk melakukan analisis numerik adalah Ansys Fluent 2020 R2 *student version*. Model aliran dua fase yang digunakan ialah *volume of fluid* (VOF). Tiga model turbulensi yang akan dibandingkan ialah *standard k-epsilon*, *standard k-omega*, dan *k-omega SST*. Grafik *flooding* yang diperoleh dari ketiga model tersebut dibandingkan dengan grafik *flooding* yang diperoleh pada penelitian Badarudin (2018) untuk panjang *hot leg* $L = 635$ mm. Persamaan konservasi momentum diselesaikan menggunakan *second-order upwind*, sedangkan *turbulence kinetic energy* dan *dissipation rate* diselesaikan dengan menggunakan *first-order upwind*. Fraksi volume diselesaikan dengan metode *geo-reconstruction*. Algoritma penyelesaian SIMPLE digunakan untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes dan kontinuitas. Analisis dilakukan secara *transient* dan adiabatik dengan *time step* divariasikan dari 0,5–4 ms, tergantung stabilitas perhitungan. Jumlah iterasi yang dilakukan tiap *time step* ialah 20 iterasi. *Flow time* yang digunakan untuk tiap perubahan nilai kecepatan *superficial* gas ialah 15 s.

Cairan yang digunakan ialah air, larutan gliserin 10%, propil asetat, dan kloroform. Gas yang digunakan adalah udara dan uap air. Variasi nilai dari viskositas cairan, densitas cairan, dan densitas gas yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1. Kecepatan *superficial* cairan yang digunakan pada ialah $JL = 0,01$ m/s; 0,026 m/s; 0,046 m/s; 0,066 m/s; 0,085 m/s; dan 0,102 m/s. Kecepatan *superficial* gas divariasikan dari 0 m/s hingga mencapai *flooding* dengan $\Delta JG = 0,1645$ m/s.

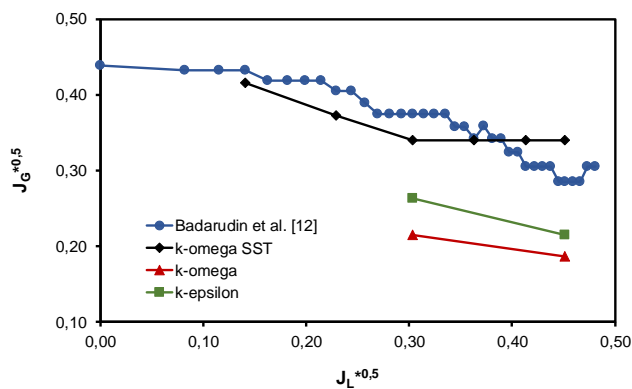
Tabel 1. Sifat Fisis Cairan dan Gas (P = 1 atm)

Jenis Fluida	Nama Fluida	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (Pa.s)	Surface tension (N/m)
Cairan	Air	999	1,00 x 10 ⁻³	72,7 x 10 ⁻³
	Larutan gliserin 10% (Glycerine Producers' Association, 1963)	1022,1	1,31 x 10 ⁻³	71,8 x 10 ⁻³
	Propil asetat (Haynes, 2016)	883	0,54 x 10 ⁻³	23,9 x 10 ⁻³
	Kloroform (Haynes, 2016)	1480	0,54 x 10 ⁻³	26,7 x 10 ⁻³
Gas	Udara	1,225	1,79 x 10 ⁻⁵	-
	Uap air	0,554	1,34 x 10 ⁻⁵	-

Data kecepatan *superficial flooding gas* (J_G) ditentukan pada saat *onset of flooding* yang ditandai dengan terjadinya penurunan kecepatan *superficial* cairan yang memasuki *reactor pressure vessel* ($J_{L,Delivered}$). Data *pressure difference* (ΔP) diperoleh dengan cara membandingkan tekanan RPV dengan tekanan SG. Gambar pola aliran diperoleh dengan cara memotong aparatus penelitian menjadi simetris terhadap permukaan x-y. Gambar tersebut berupa kontur fraksi volume. *Locus of slugging* (lokasi pembentukan *slug* awal) ditentukan dengan mengukur lokasi *slug* awal relatif terhadap lokasi belokan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Grid Independence Test



Gambar 3. Perbandingan data *onset of flooding* untuk air-udara hasil simulasi dengan grafik Badarudin (2018)

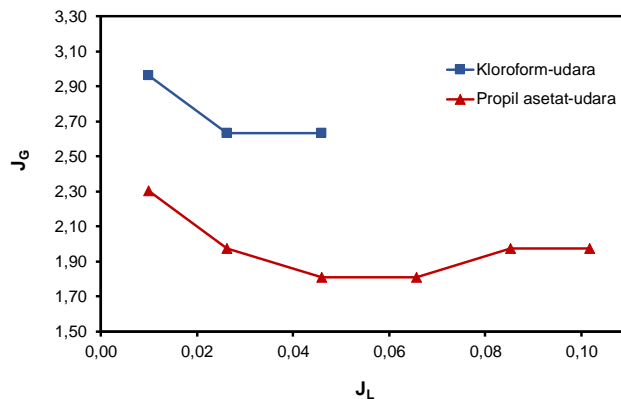
Gambar 3 menunjukkan data *onset of flooding* untuk air-udara yang diperoleh menggunakan model turbulensi *standard* k-epsilon, *standard* k-omega, dan k-omega SST. Ukuran *mesh* yang digunakan ialah 72.511 *cells*. Data tersebut dibandingkan dengan data yang didapatkan oleh Badarudin (2018). Data tersebut disajikan dalam kecepatan *superficial* tak berdimensi Wallis (1969):

$$J_k^* = J_k \left(\frac{\rho_k}{gD(\rho_L - \rho_G)} \right)^{0,5} \quad (k = G \text{ atau } L) \quad (1)$$

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa data hasil perhitungan numerik menggunakan model k-omega SST mendekati data acuan. Model standard k-omega dan standard k-epsilon memberikan data kecepatan *superficial gas* yang jauh lebih rendah dibandingkan data yang diperoleh dengan menggunakan k-omega SST pada kecepatan *superficial cairan* yang sama. Berdasarkan data yang diperoleh dari ketiga model tersebut, model turbulensi yang akan digunakan seterusnya ialah model k-omega SST.

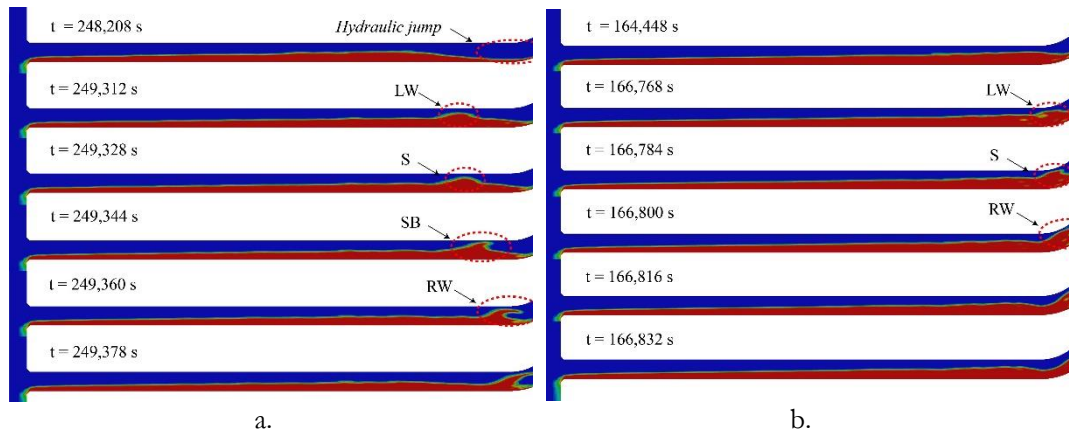
Grid independence test dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh menggunakan ukuran *mesh* 72.511 *cells* dan 108.094 *cells* (sekitar 1,5 kali ukuran *mesh* awal). **Gambar 4** menunjukkan data variasi parameter aliran terhadap waktu dari kedua ukuran mesh pada $J_L = 0,01$ m/s. Bagian atas dari gambar menunjukkan volume cairan yang berada di dalam RPV dan kecepatan *superficial cairan* yang mengalir ke dalam RPV ($J_{L,Delivered}$), sedangkan bagian bawah dari gambar menunjukkan perbedaan tekanan antara RPV dan SG (ΔP) dan kecepatan *superficial gas* yang diinjeksikan (J_G). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kedua ukuran *mesh* memberikan data *onset of flooding* yang sama dan memberikan variasi volume cairan di RPV, $J_{L, Delivered}$, ΔP , dan J_G yang serupa. Pada $J_L = 0,01$ m/s, kedua ukuran *mesh* memberikan kecepatan *superficial flooding gas* $J_G = 2,47$ m/s. Fluktuasi ΔP pada *mesh* berukuran 72.511 *cells* (**Gambar 4.a**) relatif lebih besar dibandingkan fluktuasi tekanan pada *mesh* berukuran 108.094 *cells* (**Gambar 4.b**), tetapi hal tersebut tidak signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, *mesh* berukuran 72.511 *cells* akan digunakan untuk seterusnya pada penelitian ini.

3.2. Pengaruh Densitas Cairan terhadap Karakteristik CCFL

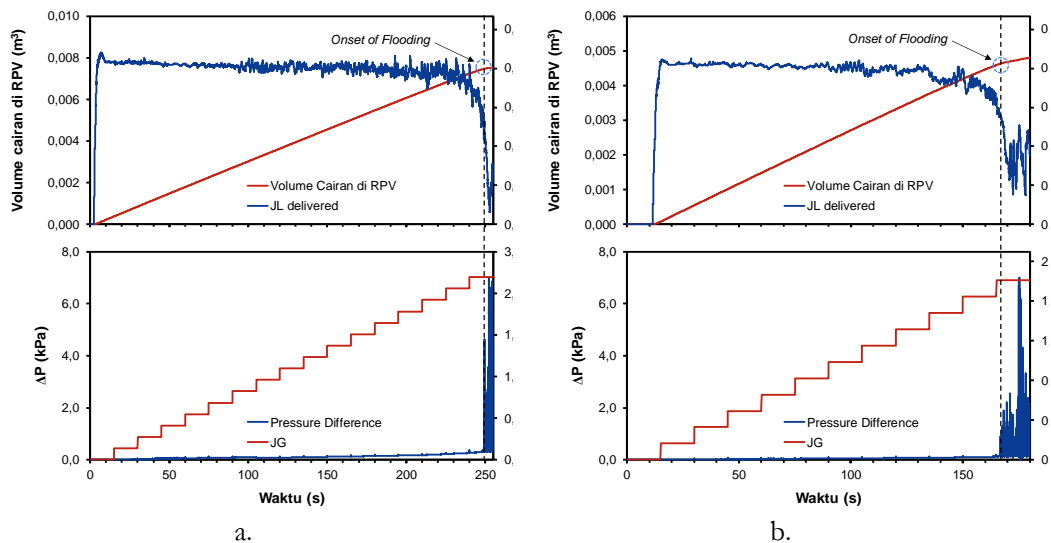


Gambar 5. Data *onset of flooding* kloroform-udara dan propil asetat

Gambar 5 menunjukkan data *onset of flooding* antara kloroform-udara dan propil asetat-udara. Data *onset of flooding* dinyatakan dalam kecepatan *superficial cairan* (J_L) dan kecepatan *superficial gas* (J_G). Hasil perhitungan numerik menunjukkan bahwa pada kecepatan *superficial cairan* yang sama, kloroform menghasilkan kecepatan *superficial flooding gas* yang lebih tinggi dibandingkan propil asetat. Berdasarkan hal tersebut, peningkatan densitas cairan akan menyebabkan peningkatan kecepatan *superficial flooding gas*.



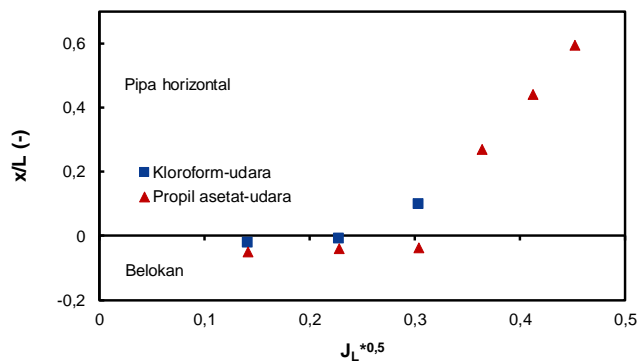
Gambar 6. Onset of slugging pada $J_L = 0,046$ m/s untuk: a. kloroform-udara dan b. propil asetat-udara



Gambar 7. Variasi parameter aliran terhadap waktu pada $J_L = 0,046$ m/s untuk: a. kloroform-udara dan b. propil asetat-udara

Gambar 6 menunjukkan proses pembentukan slug pada kondisi *flooding* pada $J_L = 0,046$ m/s. **Gambar 6.a** menunjukkan pembentukan slug untuk kloroform-udara, sedangkan **Gambar 6.b** menunjukkan pembentukan *slug* untuk propil asetat-udara. **Gambar 7** menunjukkan variasi parameter aliran untuk kedua kombinasi fluida tersebut. Pada kloroform-udara, *hydraulic jump* terbentuk pada bagian pipa horizontal. Seiring berjalannya waktu, *hydraulic jump* bergerak menuju belokan dan level air pada bagian *subcritical* meningkat. Peningkatan level cairan pada *subcritical* menyebabkan penurunan luas area untuk aliran udara sehingga aliran udara mengalami percepatan. Hal ini menyebabkan peningkatan perbedaan tekanan antara gas dan cairan pada permukaan cairan (*interface*). Aliran udara yang bersifat turbulen menyebabkan fluktuasi pada perbedaan tekanan tersebut. Gangguan (*disturbance*) berupa fluktuasi perbedaan tekanan antara gas dan cairan tersebut menyebabkan terbentuknya gelombang di bagian *subcritical*. Gelombang tersebut berkembang menjadi gelombang besar (LW) hingga akhirnya membentuk slug (S). Keberadaan *slug* menyebabkan peningkatan ΔP akibat terhalangnya aliran

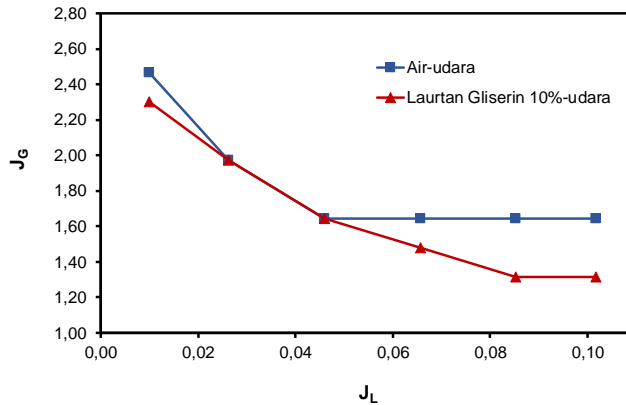
udara dan menyebabkan penurunan $J_{L, Delivered}$ (**Gambar 7.a**). Hal yang berbeda terjadi pada propil asetat-udara. Ketika *hydraulic jump* telah mencapai belokan, level cairan di *subcritical* meningkat. Fluktuasi perbedaan tekanan antara gas dan cairan akibat turbulensi menyebabkan terbentuknya gelombang kecil. Gelombang ini bergerak ke arah belokan dan menyebabkan *hydraulic jump* bergerak naik turun di belokan. Ketika *hydraulic jump* turun, gelombang besar (LW) terbentuk di dekat belokan yang berkembang menjadi slug (S). Pada kondisi *onset of flooding* untuk $J_L = 0,046$ m/s, kloroform-udara mengalami penurunan $J_{L, Delivered}$ yang relatif lebih tinggi dibandingkan propil asetat-udara. Hal ini dikarenakan ketika *slug* mengalami *breakdown* (perubahan *slug* menjadi *roll wave* yang ditandai dengan singkatan SB pada **Gambar 6**), jumlah debit cairan yang terbawa oleh aliran gas pada kloroform-udara lebih besar akibat kecepatan *superficial flooding* gas yang tinggi ($J_{G, flooding}$ kloroform-udara = 2,63 m/s, sedangkan $J_{G, flooding}$ propil asetat = 1,81 m/s).



Gambar 8. *Locus of slugging* kloroform-udara dan propil asetat-udara

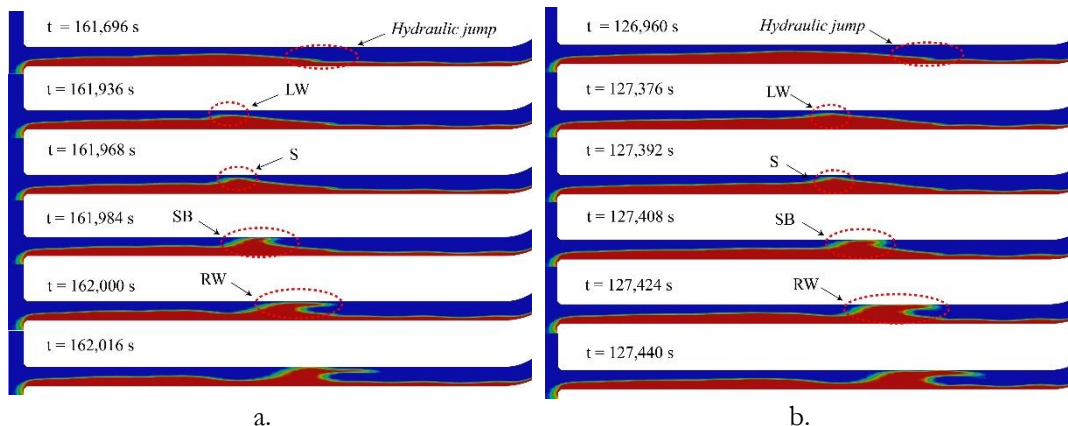
Gambar 8 menunjukkan data *locus of slugging* untuk kloroform-udara dan propil asetat-udara. Data tersebut menunjukkan bahwa peningkatan densitas mengakibatkan pergeseran *locus of slugging* menjauhi lokasi *inlet* cairan. Perbedaan kecepatan *superficial flooding gas*, fenomena pembentukan *slug*, dan *locus of slugging* dapat dijelaskan dengan menganalisis gaya inersia dari cairan. Aliran kloroform memiliki gaya inersia yang lebih tinggi dibandingkan aliran propil asetat karena densitas kloroform relatif lebih tinggi. Hal ini menyebabkan perlambatan kecepatan aliran cairan akibat *wall friction* dan *interfacial friction* (akibat aliran gas) membutuhkan jalur tempuh yang panjang sehingga *hydraulic jump* terbentuk jauh dari belokan. Pada bagian *subcritical*, gelombang terbentuk akibat fluktuasi perbedaan tekanan antara gas dan cairan. Karena tingginya gaya inersia dari aliran kloroform, diperlukan gangguan berupa fluktuasi perbedaan tekanan yang tinggi untuk membentuk gelombang. Hal ini menyebabkan *flooding* terjadi pada kecepatan *superficial gas* yang tinggi. Keberadaan *hydraulic jump* yang jauh dari belokan menyebabkan *slug* awal terbentuk jauh dari belokan.

3.3. Pengaruh Viskositas Cairan terhadap Karakteristik CCFL

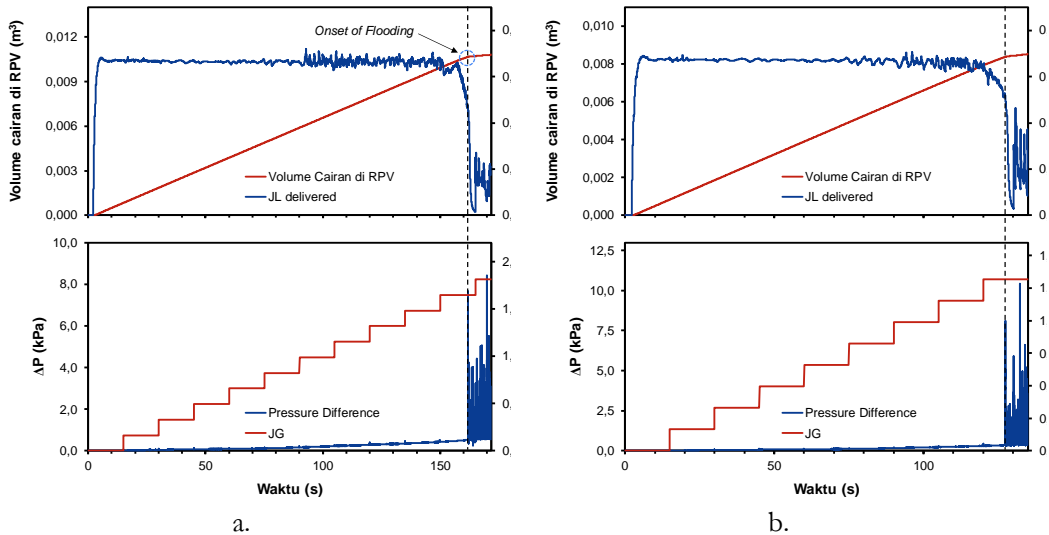


Gambar 9. Data *onset of flooding* air-udara dan larutan gliserin 10%-udara

Gambar 9 menunjukkan data *onset of flooding* antara air-udara dan larutan gliserin 10%-udara. Data *onset of flooding* dinyatakan dalam kecepatan *superficial* cairan (J_L) dan kecepatan *superficial* gas (J_G). Secara umum, hasil perhitungan numerik menunjukkan bahwa pada kecepatan *superficial* cairan yang sama, air-udara menghasilkan kecepatan *superficial flooding gas* yang lebih tinggi dibandingkan larutan gliserin 10%-udara. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan viskositas cairan akan menyebabkan penurunan kecepatan *superficial flooding gas*. Hasil tersebut sesuai dengan hasil yang didapatkan oleh Zapke dan Kroeger (1996), Mouza et al. (2005), Pantzali et al. (2007), Prayitno et al. (2012), dan Kinoshita et al. (2011), tetapi berkebalikan dengan pola hasil penelitian Suzuki dan Ueda (1977). Data *onset of flooding* yang diperoleh juga menunjukkan bahwa perbedaan kecepatan *superficial flooding gas* yang signifikan terjadi ketika $J_L > 0,046$ m/s. Data tersebut memberikan pola yang sesuai dengan data penelitian Kinoshita et al. (2011) yang menunjukkan bahwa pengaruh viskositas lebih besar pada J_L yang bernilai tinggi.



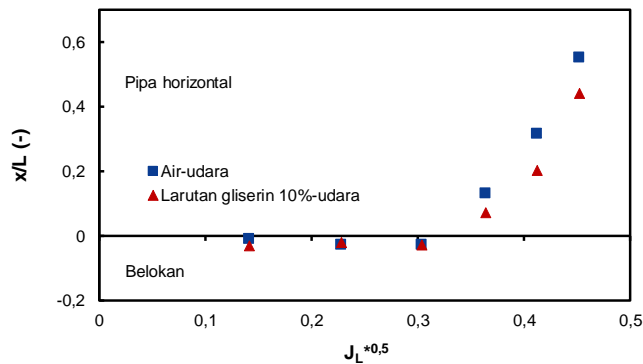
Gambar 10. *Onset of slugging* pada $J_L = 0,102$ m/s untuk: a. air-udara dan b. larutan gliserin 10%-udara



Gambar 11. Variasi parameter aliran terhadap waktu pada $J_L = 0,102$ m/s untuk: a. air-udara dan b. larutan gliserin 10%-udara

Gambar 10 menunjukkan proses pembentukan slug pada kondisi flooding pada $J_L = 0,102$ m/s. **Gambar 10.a** menunjukkan pembentukan *slug* untuk air-udara, sedangkan **Gambar 10.b** menunjukkan pembentukan *slug* untuk larutan gliserin 10%-udara. **Gambar 11** menunjukkan variasi parameter aliran untuk kedua kombinasi fluida tersebut. Pada air-udara, *hydraulic jump* terbentuk pada bagian pipa horizontal. Seiring berjalannya waktu, *hydraulic jump* bergerak menuju belokan dan level air pada bagian *subcritical* meningkat. Pembentukan gelombang di bagian *subcritical* diakibatkan oleh gangguan berupa fluktuasi perbedaan tekanan antara gas dan cairan. Gelombang tersebut berkembang menjadi gelombang besar (LW) hingga akhirnya membentuk *slug* (S). Keberadaan *slug* menyebabkan peningkatan perbedaan tekanan antara RPV dan SG akibat terhalangnya aliran udara dan menyebabkan penurunan $J_{L,Delivered}$ (**Gambar 8.a**). Proses yang serupa juga terjadi pada larutan gliserin 10%-udara.

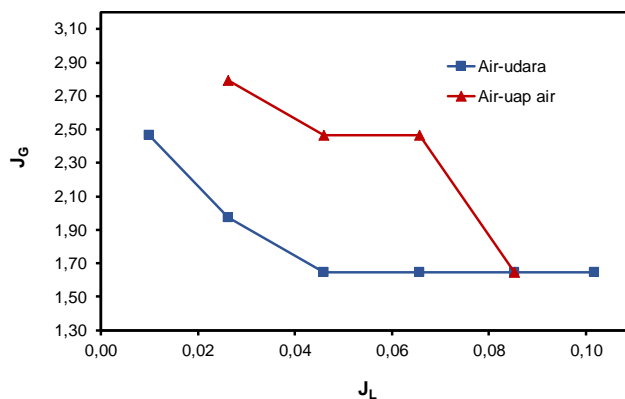
Berdasarkan **Gambar 9** dan **Gambar 10**, penurunan kecepatan *superficial flooding gas* akibat peningkatan viskositas cairan disebabkan oleh perbedaan tekanan antara cairan dan gas yang ditimbulkan oleh *wall friction* (Prayitno et al., 2012). *Wall friction* yang ditimbulkan oleh viskositas cairan menyebabkan perlambatan aliran sehingga menyebabkan peningkatan perbedaan tekanan antara gas dan cairan. Perbedaan tekanan ini akan bersifat dominan di bagian *subcritical* karena bagian ini memiliki gaya inersia yang rendah (akibat kecepatan yang rendah). Pada cairan dengan viskositas tinggi, fluktuasi perbedaan tekanan di *interface* dapat menghasilkan gelombang pada kecepatan *superficial gas* yang lebih rendah yang nantinya akan berkembang menjadi *slug*.



Gambar 12. *Locus of slugging* untuk air-udara dan larutan gliserin 10%-udara

Data *locus of slugging* untuk beberapa nilai J_L untuk air-udara dan larutan gliserin 10%-udara ditampilkan pada **Gambar 12**. Data tersebut menunjukkan bahwa lokasi terbentuknya *slug* awal pada larutan gliserin 10%-udara berada lebih dekat dengan belokan dibandingkan air-udara. Data tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan viskositas cairan menyebabkan *locus of slugging* bergeser mendekati *inlet* cairan. Hal ini dikarenakan cairan dengan viskositas tinggi akan mengalami perlambatan aliran akibat besarnya *wall friction*. *Wall friction* akan menyebabkan penurunan gaya inersia cairan sehingga cairan dengan viskositas tinggi akan mengalami perlambatan kecepatan aliran pada jarak tempuh aliran yang lebih dekat. Pada cairan dengan viskositas rendah, perlambatan aliran membutuhkan jalur yang panjang sehingga *hydraulic jump* dan *slug* awal terbentuk relatif lebih jauh dari belokan.

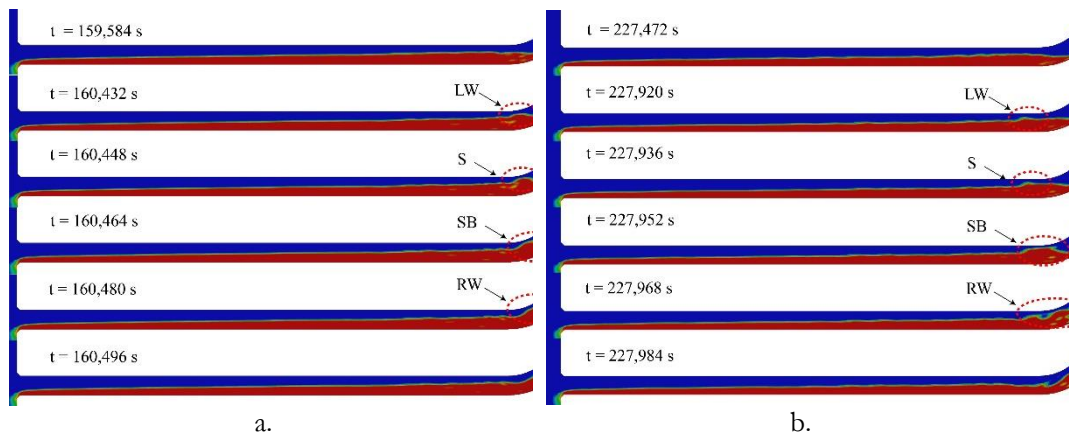
3.4. Pengaruh Densitas Gas Terhadap Karakteristik CCFL



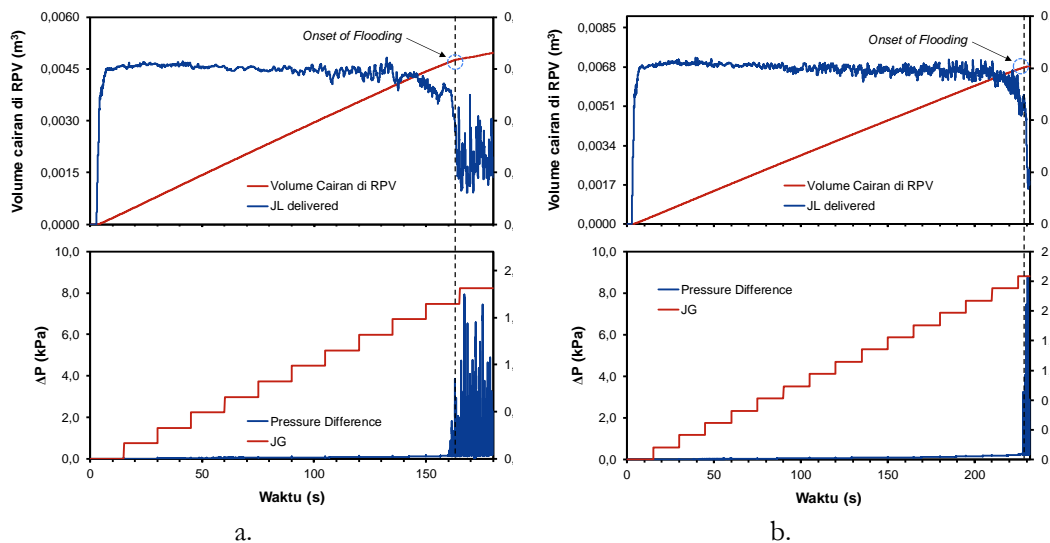
Gambar 13. Data *onset of flooding* dari air-udara dan air-uap air

Gambar 13 menunjukkan data *onset of flooding* antara air-udara dan air-uap air. Data *onset of flooding* dinyatakan dalam kecepatan superficial cairan (J_L) dan kecepatan *superficial gas* (J_G). Secara umum, hasil perhitungan numerik menunjukkan bahwa pada kecepatan superficial cairan yang sama, air-udara menghasilkan kecepatan *superficial flooding gas* yang lebih rendah dibandingkan air-uap air. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan densitas gas akan menyebabkan peningkatan kecepatan *superficial flooding gas*. Hasil yang diperoleh menunjukkan

pola yang serupa dengan hasil yang diperoleh pada penelitian Zapke dan Kroeger (1996) yang menggunakan pipa vertikal dan miring.



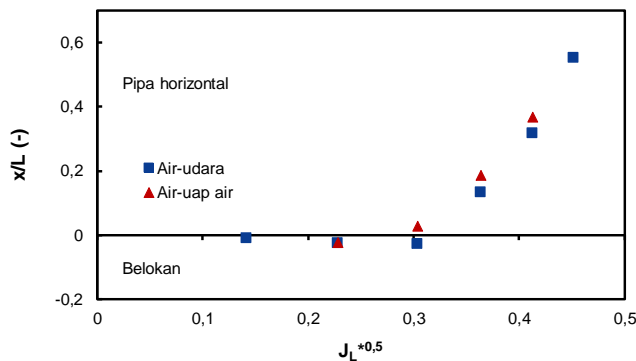
Gambar 14. *Onset of slugging* pada $J_L = 0,046$ m/s untuk: a. air-udara dan b. air-uap air



Gambar 15. Variasi parameter aliran terhadap waktu pada $J_L = 0,046$ m/s untuk: a. air-udara dan b. air-uap air

Gambar 14 menunjukkan proses pembentukan slug pada kondisi flooding pada $J_L = 0,046$ m/s. **Gambar 14.a** menunjukkan pembentukan slug untuk air-udara, sedangkan **Gambar 14.b** menunjukkan pembentukan *slug* untuk air-uap air. **Gambar 15** menunjukkan variasi parameter aliran untuk kedua kombinasi fluida tersebut. Kedua kombinasi fluida menunjukkan proses pembentukan slug yang serupa dengan fenomena pembentukan *slug* yang terjadi pada propil asetat-udara pada $J_L = 0,046$ m/s (**Gambar 6.b**). Ketika *hydraulic jump* telah mencapai belokan, level cairan di *subcritical* meningkat. Fluktuasi perbedaan tekanan antara gas dan cairan akibat turbulensi menyebabkan terbentuknya gelombang kecil. Gelombang ini bergerak ke arah belokan dan menyebabkan *hydraulic jump* bergerak naik turun di belokan. Ketika *hydraulic jump* turun, gelombang besar (LW) terbentuk di dekat belokan yang berkembang menjadi *slug* (S).

Keberadaan *slug* menyebabkan peningkatan ΔP akibat terhalangnya aliran udara dan menyebabkan penurunan $J_{L,Delivered}$ (**Gambar 15.a** dan **Gambar 15.b**).



Gambar 16. *Locus of slugging* air-udara dan air-uap air

Gambar 16 menunjukkan *locus of slugging* untuk air-udara dan air-uap air. Ketika $J_L^{*0,5} \leq 0,228$, lokasi *slug* awal antara air-udara dan air-uap air berada pada lokasi yang sama. Ketika $J_L^{*0,5} > 0,228$, *locus of slugging* air-uap air relatif lebih jauh dari lokasi *inlet* cairan dibandingkan *locus of slugging* air-udara. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan densitas gas dapat menyebabkan pergeseran *locus of slugging* menjauhi lokasi *inlet* cairan.

Peningkatan kecepatan *flooding gas* akibat penurunan densitas gas dapat dijelaskan dengan menganalisis pengaruh densitas terhadap kondisi aliran gas. Udara memiliki densitas $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas $\mu = 1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$, sedangkan uap air memiliki densitas $\rho = 0,554 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas $\mu = 1,34 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$. Pada kecepatan aliran dan luas penampang aliran yang sama, udara mengalir dengan bilangan Reynolds yang lebih tinggi dibandingkan uap air. Hal ini menyebabkan udara akan mencapai kondisi turbulen pada kecepatan yang lebih rendah dibandingkan uap air. Keberadaan turbulensi ini menyebabkan gangguan pada permukaan cairan berupa fluktuasi perbedaan tekanan antara gas dan cairan yang dapat mengakibatkan terbentuknya gelombang dan slug. Perbedaan densitas yang besar antara cairan dan gas akibat penurunan densitas gas menyebabkan penurunan *interfacial friction*. Hal ini menyebabkan perlambatan aliran cairan terjadi pada jarak tempuh yang lebih jauh sehingga gas dengan densitas rendah akan menyebabkan *hydraulic jump* terbentuk jauh dari belokan. Hal ini juga menyebabkan pembentukan *slug* awal terjadi pada lokasi yang jauh dari belokan.

4. KESIMPULAN

Pengaruh densitas cairan, viskositas cairan, dan densitas gas terhadap karakteristik *flooding* diteliti dengan menggunakan CFD. Cairan yang digunakan dalam penelitian ialah air, larutan gliserin 10%, kloroform, dan propil asetat, sedangkan gas yang digunakan ialah udara dan uap air. Geometri penelitian yang digunakan ialah pipa *bot leg* reaktor PWR tipe German Konvoi skala 1/30. Rangkuman hasil penelitian adalah sebagai berikut.

1. Peningkatan densitas cairan menyebabkan peningkatan kecepatan *superficial flooding* gas. Hal ini dikarenakan gangguan yang cukup besar berupa perbedaan tekanan antara cairan dan gas diperlukan untuk melawan gaya inersia cairan yang tinggi. Gaya inersia cairan yang tinggi juga menyebabkan pergeseran lokasi *hydraulic jump* dan *locus of slugging* menjauhi belokan karena diperlukan jarak tempuh aliran yang jauh untuk memperlambat aliran.

2. Peningkatan viskositas cairan menyebabkan penurunan kecepatan *superficial flooding* gas. Peningkatan viskositas mengakibatkan peningkatan *wall friction* yang menyebabkan perbedaan tekanan antara cairan dan gas meningkat. Peningkatan *wall friction* juga menyebabkan pergeseran lokasi *hydraulic jump* dan *locus of slugging* mendekati belokan karena jalur tempuh yang dibutuhkan untuk memperlambat aliran cairan menjadi relatif lebih dekat.

3. Penurunan densitas gas menyebabkan peningkatan kecepatan *superficial flooding* gas. Hal ini dikarenakan terjadinya penurunan *interfacial friction* yang juga menyebabkan pergeseran lokasi *hydraulic jump* menjauhi belokan sehingga *locus of slugging* berada jauh dari belokan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Badarudin, A., Setyawan, A., Dinaryanto, O., Widyatama, A., Indarto, & Deendarlianto, 2018, Interfacial behavior of the air-water counter-current two-phase flow in a 1/30 scale-down of pressurized water reactor (PWR) hot leg, *Annals of Nuclear Energy*, 116, 376–387.
- Deendarlianto, Höhne, T., Lucas, D., & Vierow, K., 2012, Gas-liquid countercurrent two-phase flow in a PWR hot leg: A comprehensive research review, *Nuclear Engineering and Design*, 243(2), 214–233.
- Deendarlianto, Höhne, T., Lucas, D., Vallée, C., & Zabala, G. A. M., 2011, CFD studies on the phenomena around counter-current flow limitations of gas/liquid two-phase flow in a model of a PWR hot leg, *Nuclear Engineering and Design*, 241(12), 5138–5148.
- Deendarlianto, Ousaka, A., Indarto, Kariyasaki, A., Lucas, D., Vierow, K., Vallee, C., & Hogan, K., 2010, The effects of surface tension on flooding in counter-current two-phase flow in an inclined tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(7), 813–826.
- Glycerine Producers' Association., 1963, *Physical Properties of Glycerine and Its Solutions*, Glycerine Producers' Association, New York.
- Haynes, W. M., 2016, *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (edisi 97), CRC Press LLC Florence : Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Kinoshita, I., Nriai, T., Tomiyama, A., Lucas, D., & Murase, M., 2011, Effects of Liquid Properties on CCFL in a Scaled-Down Model of a PWR Hot Leg, *Journal of Power and Energy Systems*, 5(3), 316–329.
- Mouza, A. A., Pantzali, M. N., & Paras, S. V., 2005, Falling film and flooding phenomena in small diameter vertical tubes: The influence of liquid properties, *Chemical Engineering Science*, 60(18), 4981–4991.
- Murase, M., Utanohara, Y., Kinoshita, I., Yanagi, C., Takata, T., Yamaguchi, A., & Tomiyama, A., 2012, VOF simulations of countercurrent gas-liquid flow in a PWR hot leg, *Journal of Computational Multiphase Flows*, 4(4), 375–386.
- Ohnuki, A., 1986, Experimental Study of Counter-Current Two-Phase Flow in Horizontal Tube Connected to Inclined Riser, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 23(3), 219–232.
- Ousaka, A., Deendarlianto, Kariyasaki, A., & Fukano, T., 2006, Prediction of flooding gas velocity in gas-liquid counter-current two-phase flow in inclined pipes, *Nuclear Engineering and Design*, 236(12), 1282–1292.
- Pantzali, M. N., Mouza, A. A., & Paras, S. V., 2007, Study of hydrodynamic characteristics of the liquid layer during counter-current flow in inclined small diameter tubes : the effect of liquid properties, *6th International Conference on Multiphase Flow*, Leipzig, 9-13 Juli 2007.
- Prayitno, S., Santoso, R. A., Deendarlianto, Höhne, T., & Lucas, D., 2012, Counter current flow limitation of gas-liquid two-phase flow in nearly horizontal pipe, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2012.

- Seidel, T., Vallée, C., Lucas, D., Beyer, M., & Deendarlianto, 2011, Two-phase flow experiments in a model of the hot leg of a pressurised water reactor, TOPFLOW-Experiments: development and validation of CFD models for steam-water flows with phase transfer, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden.
- Suzuki, S., & Ueda, T., 1977, Behaviour of liquid films and flooding in counter-current two-phase flow-Part 1, Flow in circular tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, 3(6), 517–532.
- Wallis, G. B., 1969, *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill, New York.
- Zapke, A., & Kröger, D. G., 1996, The influence of fluid properties and inlet geometry on flooding in vertical and inclined tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, 22(3), 461–472.

A Structural Design of COVID-19 Patient Lifting Device Using Crane and Hydraulic Mechanism

D.C. Hardiyasanti^{1,2}, S. Widianingrum^{1,2}, F. Bestiara^{1,2}, M. Syaroh^{1,2} and F. Triawan^{1,*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Sampoerna University, Jakarta, Indonesia

²Department of Aerospace and Mechanical Engineering, The University of Arizona, Tucson, AZ, 85721, USA.

*E-mail: farid.triawan@sampoernauniversity.ac.id

Abstract

COVID-19 has brought the mankind into the worst condition. The health care workers as the forefront player during this pandemic are psychology and physically exhausted. In 2021, the infected patient is decreasing in some countries, yet increasing in others. Therefore, this study is aimed to design and analyze a patient lifting device in order to help the health workers in handling paralyzed and bone traumatic patients in effective way. This lifting device is designed to be operated by only one person and contactless with the patient. Thus, the healthcare worker can work on safety procedure of COVID-19. The structural design of the device is using the concept of crane and hydraulic mechanism that can handle a maximum weight of 2,000 N. Every mechanical part that is considered critical becomes the focus in the strength analysis. The analysis is done by theoretical approach under static and dynamic loading. As the results, the static and fatigue analyses show that the most critical part of the lifting device is at the fork structure with safety factor of 1.04. This indicates the design is in safety condition and could have an infinite service life cycle.

Keywords : Lifting device, COVID-19 patient, Structural design, Strength analysis, Static and Fatigue.

1. INTRODUCTION

In Indonesian medical sectors, there are several technologies that have not been distributed evenly in all hospitals (Misnaniarti et al., 2018). It is proven by 4 classifications of hospital in term of service, human resources, medical equipment, and management (Oktamianti & Pebrina, 2019). The need of a mechanism which can ease the task of medical personnel is significantly needed even more during the spread of COVID-19. This virus has increases Indonesian crisis related with economy, communication and inevitably healthcare (Muryanti et al., 2021). However, the demand of healthcare itself is irrelevant with the number of the servicers which result in more health issue of the healthcare workers (HCW). Therefore, they are facing burnout or psychological response related to chronic stress while interacting with the patient (Rusca Putra & Setyowati, 2019), and undeniably they are also physically over exhausted during the pandemic. Moreover, dramatically, there are over 100 doctors and hundreds of healthcare workers (HCW) has been died reported in Indonesia on September 2020, and according to scientific research within the first 6 months of the virus spread, 51,7% of HCW was positive corona virus (Gholami et al., 2021).

Establishing a safe and effective flow of patient care remains essential and must be practiced at all levels of hospitals. Medical personnel who are at the forefront of handling the COVID-19 virus pandemic have been alerted and continue to carry out these duties in various hospitals. Even the vaccines have been distributed, similar novelty virus might occur in the future such as the heartbreaking pandemic situation in India which reported in World Health Organization (WHO) on 26 April 2021 (Pal & Yadav, 2021). Thus, the readiness to face any pandemic should be prepared.

One of the health issues which encountered by HCW is due to activity such as lifting heavy weight and transferring paralyzed and bone traumatic patient; these factors were studied by proportional random sampling of 73 HCW to be the factor of low back pain of nurses (Aljohani & Pascua, 2019; Boughattas et al., 2017). Moreover, commonly the number of people involved in lifting, lowering, and transferring patient is 3-4 workers, which during the spread of COVID-19 these number should be reduced for effectiveness and less physically contact between the patient and the HCW as the action to reduce the number of COVID-19 infection in hospital (Khoiriyah et al., 2021).

The existing of similar device has been manufactured by several brands such as Barton and Hoyerlift (Pookarath & Parameswaran, 2018). The three of them are using the same crane design, and the hydraulic system is used as the additional buffer to lift and lower the arm which is functioned to hang up the patient. Moreover, there are no published papers and journals about the development and structural design of a patient lifting device found in the online database.

Therefore, the objective of this paper is designing an innovative patient lifting device which can alleviate the Indonesian HCW as the front barrier of COVID-19 pandemic to lift, lower, and transfer patient which can be operated by only 1 person and can withstand up to 2,000 N of load. In addition, this study is aimed to be useful for the development of healthcare technology, especially in Indonesia. This paper is also provided with the strength analysis under statics and dynamics loading for the feasibility and the service life prediction.

2. METHODOLOGY

The development of patient lifting device meets some boundaries to focus with the designated purpose. The limitation specifically focuses on its dimension which has roughly $500 \times 1,500 \times 2,000$ mm, can be operated by only 1 person, and can withstand 2,000 N of load. Therefore, a guidance on engineering design by Budynas et al. and Oktaviandri et al. on Figure 1 is adopted. The flow is iterative; thus, it is suitable to have a significant optimization before it is presented to the public. The significant optimization can be achieved right after the design and its strength analysis is done. In this case, since the device will be handled by one person, therefore simple design becomes the goal, and if the initial calculation does not satisfy the infinite life cycle on dynamic loading, the material or geometry need to be changed until it meets the requirement.

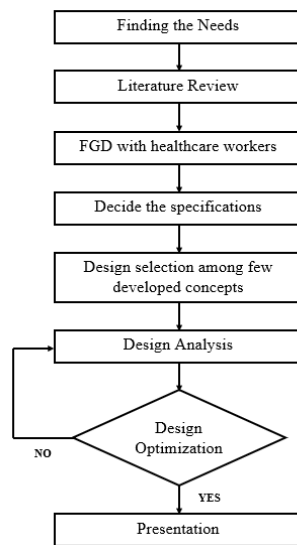


Figure 1. Design Process (Budynas et al., 2020; Oktaviandri & Paramasivam, 2020)

2.1. Design Concept

By conducting Focus Group Discussion (FGD) of 10 HCW who work in diverse hospital in Java Island, Indonesia on March 2021, it is found that all of them has experienced lifting patients. 70% of the respondent state that the process was done manually without any help of any device nor machine, 20% of respondents have equipped with patient lifting device yet still insufficient, for the device is only available in certain room such as Emergency Room (ER). This imply that the need of mechanism which can help in this task is needed. Moreover, from the FGD, it is known also that the number of HCW involved in patient lifting is from 3-4 people. Therefore, the mechanism should be operated by less people, especially during the pandemic.

The design concept is inspired by a crane and hydraulic mechanism which can lift, lower, and transport object. The lifting and lowering mechanism are using the hydraulic jack pump as stated in Figure 2. The user can easily adjust the height of the device even when the loading is bigger than his/her power by repeatedly pulling the lever arm until the desired height is reached. To see the entire design in isometric view with its main components, the device can be seen in Figure 3.



Figure 2. Hydraulic Pump

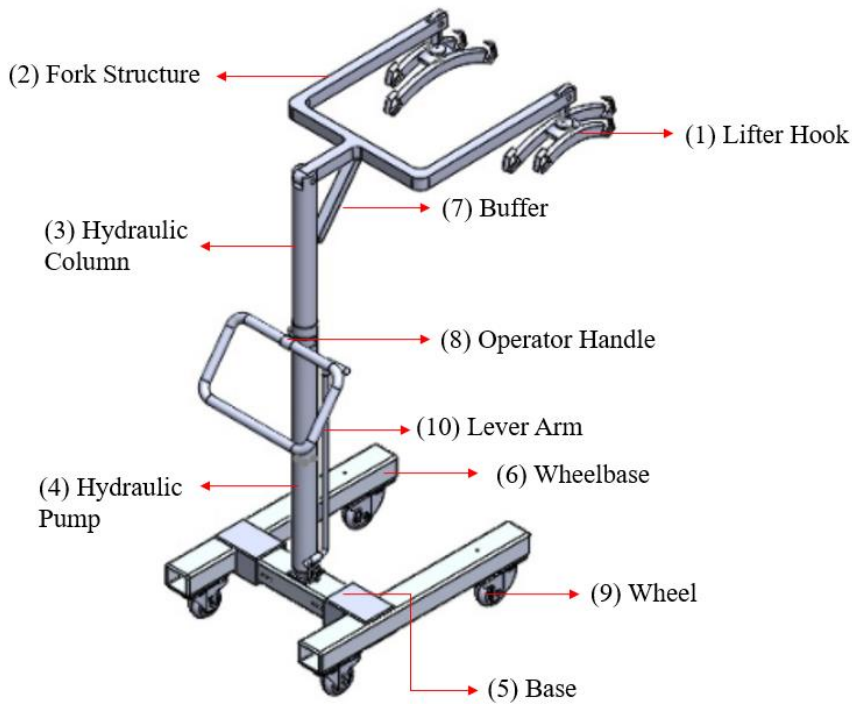


Figure 3. Isometric View with the Components' names

To get to know more about the design, the list below is made to explain each part and its mechanism refer to Figure 3.

1. The (1) Lifter Hook structure is to hook the patient lifter, it can be rotated 360° and connected to various types of carrier devices depending on the user's condition.
2. The (2) Fork Structure is made with intention to give stable position as the patient is lifted, and it is connected with a rectangular beam as the supportive component to increase the strength of the structure.
3. The (3) Hydraulic Column made of a hollow cylinder and the height can be adjusted along 0.7 m. This column is the extension of the hydraulic mechanism which can be heighten and lowered.
4. The (4) Hydraulic Pump located inside the hollow cylinder to push up and down the hydraulic column in order to adjust the height of the device in use.
5. The (5) Base is used to connect the two (6) Wheelbases of the mechanism, so that it can be stable. Then the wheelbase is connected to the wheels so that the device can be carried and moved easily, even when the patient is on the device.
6. The (7) Buffer is created to minimize the bending of the fork structure, and the (8) Operator Handle is used to move the mechanism or give additional balancing to the system.
7. The (9) Wheels are consisting of 4 that has stoppable and can be rotated 360° features.
8. The (10) Lever Arm is the part where the operator will handle the mechanism. It is located at the end of hydraulic pump. The height will be stuck on the last pump of the lever arm, and it will be lowered when the valve is open to release the air pressure on the hydraulic.

With those specifications, Figure 4 provided the system from three views. Figure 4(a), (b), and (c) are showing the mechanism from front, side, and upper view.

2.2. Material Selection

The material for the patient lifting device should be strong to hold the mass of an adult. The weight of the system also should not be heavy because it designed to be operated by 1 person. Based on those requirements, high carbon steel is considered because this material has more specific advantages such as: a) safety for human use, b) less ductile, c) resistance to wear, d) extreme hardness, and e) weldable compared the other ordinary steel material (Gorkunov et al., 2017).

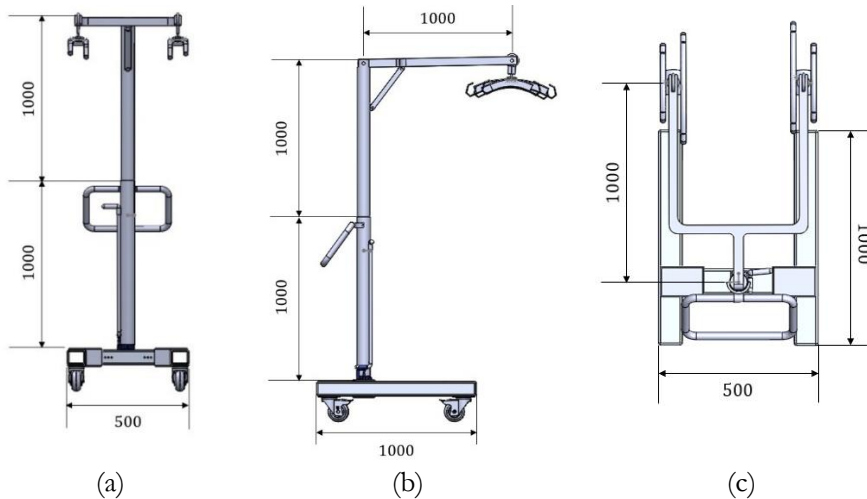


Figure 4. (a) front view, (b) side view, and (c) top view of the system in mm

To be specific, the used material is Cold-Drawn High Carbon Steel AISI 1080 (Saptaji et al., 2019). This material has density of 7.8 g/cm^3 , and high melting point about $1289\text{-}1478 \text{ }^\circ\text{C}$. With the maximum service temperature near the room temperature, Cold-Drawn High Carbon Steel AISI 1080 has the value of tensile strength of 780 MPa and the yield strength of 590 MPa (Badaruddin et al., 2020). With those specifications, the material could fulfil the needs for the system to work properly with safety factor in static analysis and fatigue analysis at least > 1 (Zulaikah et al., 2020).

2.3. Component Design

The design is created using SOLIDWORKS software application. There are three types of beam shapes that are used to construct the whole system design. They are rectangular solid, rectangular hollow, and cylindrical hollow. The use of hollow is to reduce the weight as well as the cost.

The dimension used in this design has been verified by conducting some research in order to know the availability in the marketplace. Table 1 provide the information about the dimension and beam type which significantly affect the strength calculation.

Table 1 Beam's dimension and type

Components	Dimension [mm]	Beam type
1	W* = 25.4; H = 20; L = 300	Rectangular solid
2	W = 50; H = 40; L = 1000	Rectangular solid
3	D _o = 56; D _i = 36; L = 1000	Cylindrical hollow
4	D _o = 85; D _i = 61; L = 1000	Cylindrical hollow
5	W = 100; H = 50; T = 4; L = 500	Rectangular hollow
6	W = 70; H = 50; T = 4; L = 1000	Rectangular hollow
7	W = 30; H = 40; L = 424	Rectangular solid

*Where W is weight; H is height; and L is length.

2.4. Static Analysis

Static analysis is conducted to calculate the properties of the system based on the system's dimensions and the force that given to the system in the static condition which affected each of the components. The final aim in static analysis is the static safety factor of each components. After the data from Free Body Diagram (FBD) static equilibrium analysis already gather up, use the equations as following to conduct the theoretical analysis.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{12}bd^3 \text{ or } I = \frac{\pi}{64}(do^4 - di^4) \quad (2)$$

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{avg} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{3V}{2A} \text{ or } \tau = \frac{VQ}{It} \quad (4)$$

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (5)$$

where,

σ : normal stress (Pa)

I : moment of inertia (m⁴)

M : bending moment (N m)

c : maximum distance from neutral axis (m)

do : outer diameter (m)

di : inner diameter (m)

b : base (m)

d : depth (m)

τ : shear stress (Pa)

V : shear force (N)

Q : first moment of area (m³)

A : area (m)
 n : safety factor
 S_y : yield strength (Pa)

2.5. Fatigue Analysis

The fatigue analysis is performed to determine the service life and fatigue safety factor of the proposed product (Budiman et al., 2020; Iswanto, 2020). However, the component that will be analyzed is only the component that will experience the fluctuated loading (dynamic loading). Below are the equations for finding the Marin factors.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (6)$$

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (7)$$

$$k_b = \begin{cases} 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ 1.24d^{-1.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{For axial loading, } k_b = 1 \quad (9)$$

$$\text{For non-rotating or hollow round, } d_e = 0.307d \quad (10)$$

$$\text{For rectangular section of dimension, } d_e = 0.808(hb)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{bending} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsion} \end{cases} \quad (12)$$

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (13)$$

where,

S_e : endurance strength
 S'_e : ideal endurance strength
 S_{ut} : ultimate tensile strength
 k_a : surface condition modification factor
 k_b : temperature modification factor
 k_c : load modification factor
 k_d : temperature modification factor
 k_e : reliability factor
 k_f : miscellaneous-effects modification factor

If the component has stress-concentrated factor, K_t , it means that the component also has fatigue stress-concentrated factor, K_f . The fatigue-concentrated factor needs to be calculated because it can magnify stress value. For that, this formula can be used to calculate the fatigue-concentrated factor.

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a/r}} \quad (14)$$

$$\text{For bending, } \sqrt{a} = 0.246 - 3.08(10^{-3})S_{ut} + 1.51(10^{-5})S_{ut}^2 - 2.67(10^{-8})S_{ut}^3 \quad (15)$$

where,

K_f : fatigue-concentrated factor

K_t : stress-concentrated factor

a : modification factor a

r : radius of the notch

Then, here are the equations for finding the σ_a , σ_m , and σ_{rev} .

$$\sigma_{rev} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (16)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (17)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2} \quad (18)$$

where,

σ_{rev} : reversed stress

σ_a : amplitude component

σ_m : midrange component

σ_{min} : minimum stress

σ_{max} : maximum stress

From all those calculations, now the fatigue safety factor can be determined.

$$n_f = \frac{Se}{\sigma_{rev}} \quad \text{or} \quad n_f = \frac{Se}{\sigma_{rev}K_f} \quad (19)$$

where, n_f : fatigue safety factor

3. RESULT AND DISCUSSION

In the strength analysis, static analysis and fatigue analysis are carried out in the whole system. From these analysis and calculation, the most critical part or component of the entire system can be obtained. According to the design specification, it is set that the load is 2,000 N. Hence, the FBD of the whole system is shown in the Figure 5. By considering the device as a whole, the value of the reaction forces on each wheel can be determined easily. Moreover, the

value of 2,000 N comes from the maximum load that this mechanism must achieve for the secondary specification. From the FBD of whole system, the maximum shear force and bending moment can be analysed by break it down into each component internal force. By using the statics equilibrium formula, the maximum shear force and bending moment can be seen through Shear Force Diagram (SFD) and Bending Moment Diagram (BMD) in Figure 7.

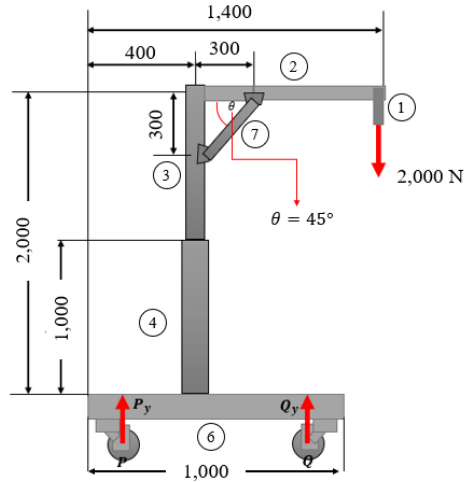


Figure 5. Free Body Diagram of Patient Lifting Device (all dimension in millimeter)

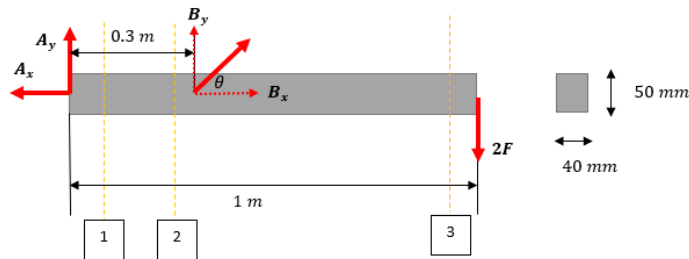


Figure 6. Internal Force at Component 2

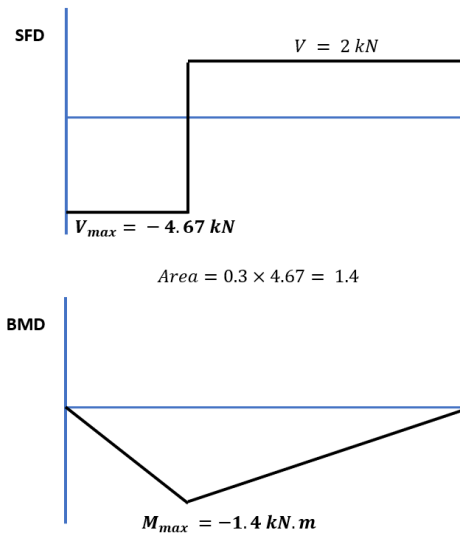


Figure 7. SFD and BMD of Component 2

Figure 6 shows the free body diagram of internal force in component 2 which loaded by 2,000 N loading. Then, from the static equilibrium formula, the value of maximum shear force for component 2 is 4.67 kN , while for the maximum bending moment is 1.4 kN.m . Moreover, these value for all components can be seen in Table 2. It is known that the critical shear force and bending moment is located on component 2 and 3.

Table 2. List of Maximum Shear Force (V), Bending Moment (M), and Axial Force (P)

Components	$V_{max} \text{ (kN)}$	$M_{max} \text{ (kN.m)}$	$P \text{ (kN)}$
1	0.5	0.075	-
2	4.67	1.4	-
3	4.67	1.4	-
4	2.0	2	-
5	1.0	0.25	-
6	1.4	0.84	-
7	-	-	9.43

3.1. Strength under Static Loading

The stress analysis is conducted to find the safety factor of each component of the system. By using the values in Table 2, the stress analysis of all components can be calculated. Based on the calculations, it was obtained that the most critical component is component 2, which indicated by the smallest value of safety factor than the other components. Therefore, it will be discussed and calculated in detail as the following explanation.

To obtain the value of normal and shear stresses, it needs information such as the area and the moment of inertia. In Table 3 shows the area and moment of inertia of all components. The maximum normal stresses of each component can be calculated using the Equation (1). From the calculation, the maximum bending moment and maximum shear force is located at

component 2 and 3. Below is the detail of calculation how to find the maximum normal stress at component 2.

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} = \frac{(1400000 \text{ N}\cdot\text{mm}) \left(\frac{50}{2} \text{ mm}\right)}{4.167 \times 10^5 \text{ mm}^4} = 83.993 \text{ MPa}$$

The stress concentration on components 1 and 2 exist due to the hole to attach the sling and lifter hook, respectively. The normal stress multiplies with stress concentration factor K_t is obtained by Equation (3). Therefore, the values of maximum normal stress of component 1 and 2 is changing due to the stress concentration factor. Then, the values of maximum normal stresses of all components are listed in Table 3. Hence, the calculation for the maximum normal stress due to stress concentration in component 2 as follows.

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= K_t \sigma_{avg} \\ \sigma_{max} &= K_t \left(\frac{Mc}{I}\right)\end{aligned}$$

$$\text{Where } I = (w - d) \frac{h^3}{12}$$

$$\frac{d}{h} = 0.125; \frac{d}{w} = 0.1$$

Thus, from Figure A-15-2 (Budynas, 2020), $K_t = 2.6$

$$\sigma_{max} = 2.6 \left(\frac{700000 \text{ N}\cdot\text{mm} \left(\frac{50}{2} \text{ mm}\right)}{(50 - 5) \frac{40^3}{12} \text{ mm}^4} \right) = 189.58 \text{ MPa}$$

Then, for the shear stress of each component can be calculated using Equation (4). Table 3 shows the value of shear stress of all components. Below is the detail calculation for shear stress of component 2. Because the bar is solid rectangular, the formula is in the following.

$$\tau = \frac{3V}{2A} = \frac{3}{2} \left(\frac{4670 \text{ N}}{2 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \right) = 3502500 \text{ Pa} = 3.503 \text{ MPa}$$

After obtaining the value of maximum normal and shear stresses, it is shown that $\sigma_{max} > \tau_{max}$. Thus, it is considered that stress and fatigue at the surface element is due to bending. Since it is assumed as a plane stress, $\sigma_x = \sigma_{max}$ while $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$. Thus, by using the Distortion Energy (DE) criterion, the Von Mises stress is $\sigma' = \sigma_x$. In Table 3 can be seen the Von Mises stress for all components.

From the Von Mises stresses' value, the safety factor can be calculated by using Equation (5). This equation is used the DE criterion for ductile material. Here, the materials used in this design is carbon steel AISI 1080, which has the value of yield strength S_y is 590 MPa . The component 2 is the most critical part in this design. Therefore, the safety factors are obtained using the calculation below.

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{590}{189.58} = 3.11$$

Table 3 shows the safety factor of all components. The most critical component is component 2, which has 3.11 value of safety factor. Since this value is bigger than 1, component 2 is still in the safety zone. In addition, this indicates that the material of the design has been considered properly, so that there is no risk of failure when it is given a maximum load of 2,000 N.

Table 3. Stress Analysis Result

Components	Values					
	Area (m ²)	Moment of Inertia (m ⁴)	Maximum Normal Stress (MPa)	Maximum Shear Stress (MPa)	Von Mises Stress (MPa)	Statics Safety Factor, n_s
1	5.08×10^{-4}	2.73×10^{-8}	160.18	1.476	160.18	3.68
2	2×10^{-3}	4.167×10^{-7}	189.58	3.503	189.58	3.11
3	1.45×10^{-3}	4.003×10^{-7}	97.927	6.269	97.927	6.02
4	2.75×10^{-3}	1.88×10^{-6}	45.213	1.428	45.213	13.05
5	1.4×10^{-3}	5.62×10^{-7}	11.121	1.021	11.121	53.05
6	1.1×10^{-3}	4.09×10^{-7}	51.345	1.544	51.345	11.49
7	1.2×10^{-3}	1.6×10^{-7}	7.858	11.788	7.858	75.08

3.2. Strength under Fatigue Loading

Fatigue analysis was performed to evaluate the service life by calculating the fatigue safety factor of components 1, 2, and 3. These components are directly experiencing the effect of the movement (fluctuated load) of the mechanism when the device is used for up and down due to the hydraulic. The type of load in this case is assumed as concentrated load. The patient is hung up by sling which attach directly at body 1. On the other hand, components 1, 2, and 3 are also components that have the lowest static safety factor, so that these components are more critical than other components.

First, S_e needs to be calculated. To obtain the endurance strength, it needs to determine the Marin factors and S_e' . For AISI 1080 carbon steel, the S_{ut} is 780 MPa. In the calculation, the component 1 has the highest endurance limit while the component 2 has the lowest endurance limit. For the surface factor, k_a , use Equation (7) after determining factor a and b . For the size factor, k_b , use Equation (8) based on d_e by Equation (11). For the loading factor, k_c , use Equation (12) based on the loading. For the ideal endurance limit, use Equation (13) based on S_{ut} . While the rest Marin factors are assumed as 1. Below is the sample calculation for the marin factor that conducted in component 2.

- Surface factor, k_a

For cold drawn surface finish, $a = 4.51$ and $b = -0.265$, then using Equation (7) to obtain k_a .

$$k_a = 4.51(635)^{-0.265} = 0.8155$$

- Size factor, k_b

For the rectangular section of dimension, find the equivalent diameter using Equation (11).

$$d_e = 0.88((50)(40))^{\frac{1}{2}} = 36.1349 \text{ mm}$$

Because $2.79 \leq d_e \leq 51 \text{ mm}$, compute the k_b using Equation (8).

$$k_b = 1.24(36.1349)^{-0.107} = 0.8447$$

- Loading factor, k_c

According to Equation (12), k_c for bending loading,

$$k_c = 1$$

- For k_d , k_e , and k_f , assume them as 1.

- Endurance limit, S_e'

Because $S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$, according to Equation (13),

$$S'_e = 0.5(635) = 317.5 \text{ MPa}$$

From those calculation, S_e can be calculated using Equation (6).

$$S_e = (0.8155)(0.8447)(1)(317.5) = 218.7108 \text{ MPa}$$

Because in component 1 and 2 there are static stress-concentrated factor, K_t . Therefore, the fatigue-concentrated factor, K_f can be calculated using Equation (14). K_f in component 2 is shown below, for its value is higher than component 1.

$$S_{ut} = 780 \text{ MPa} = 113.129 \text{ kpsi}; K_t = 2.6; r = 2.5 \text{ mm}$$

Calculate the modification factor, \sqrt{a} , by Equation (15).

$$\begin{aligned} \sqrt{a} &= 0.246 - 3.08(10^{-3})(113.129) + 1.51(10^{-5})(113.129)^2 \\ &\quad - 2.67(10^{-8})(113.129)^3 \\ &= 0.0521\sqrt{\text{in}} = 0.2626\sqrt{\text{mm}} \end{aligned}$$

Thus,

$$K_f = 1 + \frac{2.6 - 1}{1 + \frac{0.2626}{\sqrt{2.5}}} = 2.2711$$

After the value of \sqrt{a} was obtained, then for the K_f can be calculated if the unknown variables already obtained. Then, for calculating the fatigue safety factor, we need to calculate the σ_{rev} , σ_a , and σ_m .

σ_a and σ_m need to be calculated first using Equation (16) and Equation (17). For the σ_{max} , use the data from maximum normal stress as loading stress that already listed in Table 3. While for σ_{min} , it is for unloading and use 0 for this. Then calculate σ_{rev} using Equation (18). Below is the sample calculation in component 2.

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \left| \frac{189.59 - (0)}{2} \right| = 94.795 \text{ MPa} \\ \sigma_m &= \frac{0 + 189.59}{2} = 94.795 \text{ MPa} \\ \sigma_{rev} &= \frac{94.795}{1 - \left(\frac{94.795}{780}\right)} = 107.9095 \text{ MPa} \end{aligned}$$

In Table 4 shows the values of σ_a , σ_m , and σ_{rev} for components 1, 2, and 3. From those values, now the fatigue safety factor can be determined by Equation (19). For the component 2 is calculated in the following. Furthermore, the summarized values of fatigue safety factor for those components are listed in Table 4. From the table, it shows that all $n_f > 1$, it means that infinite service life can be predicted for components 1, 2, and 3. This implies the proposed design can be considered for real application and further studied for the fabrication process.

$$n_f = \frac{254.4211}{(107.9095)(2.2711)} = 1.0381$$

Table 4. Fatigue Analysis Result

Components	Values				
	Fatigue Concentration Factor, K_f	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	σ_{rev} (MPa)	Fatigue Safety Factor, n_f
1	2.0203	80.090	80.090	88.0099	1.5054
2	2.2711	94.795	94.795	107.9095	1.0381
3	-	48.964	48.964	51.8141	5.1686

4. CONCLUSION

The present work can be concluded into three points as follow:

1. The patient lifting device has been designed and analyzed in this study. The crane and hydraulic mechanism used in this device is to transfer, lift, and lower the determined maximum load of 2,000 N. From the static stress analysis, it is found that there are three critical components, yet the most critical parts are known at the fork structure (component 2) with safety factor of 3.11. Since this value is > 1 , the whole design is considered in the safety condition.
2. Moreover, the components which affected by dynamic (fatigue) loading as well as the most critical components in this case are then analyzed. The result of the fatigue analysis shows that the fork structure experiences the most critical fatigue safety factor of 1.04. Since the value > 1 , it indicates infinite service life. Therefore, the overall design of the patient lifting device is considered safe to be used without any failure.
3. In addition, the result presented in this paper can be used as reference for producing innovative tool or equipment to help the COVID-19 patient handling at the hospital or medical care station. Recommendation for further study in this device is on the ergonomic design, material selection for cost consideration, and features that can give automatic function such as for the height adjustment.

5. REFERENCES

- Aljohani, W. A., & Pascua, G. P., 2019, Impacts of Manual Handling Training and Lifting Devices on Risks of Back Pain among Nurses: An Integrative Literature Review, *Nurse Media Journal of Nursing*, 9, 2, 210–230.
- Badaruddin, M., Sugiri, A., & Wang, C. J., 2020, An experimental investigation of the mechanical strength of cold-drawn AISI 1018 steel under high-temperature steady- and transient-state conditions, *Construction and Building Materials*, 232, 117-193.
- Budiman, B. A., Sambegoro, P. L., Rahardian, S., Ilhamsyah, R., Firmansyah, R., Juangsa, F. B., & Aziz, M., 2020, Prediction of the remaining service lifetime of inflatable rubber dam with deep hole damage, *Indonesian Journal of Science and Technology*, 5, 3, 366–381.
- Gholami, M., Fawad, I., Shadan, S., Rowaiee, R., Ghanem, H. A., Hassan Khamis, A., & Ho, S. B., 2021, COVID-19 and healthcare workers: A systematic review and meta-analysis, *International Journal of Infectious Diseases*, 104, 335–346.
- Gorkunov, E. S., Zadvorkin, S. M., Goruleva, L. S., Makarov, A. V., & Pecherkina, N. L., 2017, Structure and mechanical properties of a high-carbon steel subjected to severe deformation, *Physics of Metals and Metallography*, 118, 10, 1006–1014.

- Iswanto, W. D. P. P. T., 2020, Analisis Kegagalan Poros Shipping Pump Pada Anjungan Produksi Minyak dan Gas Bumi Lepas Pantai, *Journal of Mechanical Design and Testing*, 2, 2, 137–146.
- Khoiriyah, N., Alfatih, S. A., Munir, M., & Triawan, F., 2021, Component Design and Strength Analysis of Coffin Lowering Machine for COVID-19 Corpse: A Problem-Based Learning, *Indonesian Journal of Multidisciplinary Research*, 1, 1, 137–150.
- Misnaniarti, M., Hidayat, B., Pujiyanto, P., Nadjib, M., Thabrany, H., Junadi, P., Besral, B., Purwoko, B., Trihono, T., & Yulaswati, V., 2018, Ketersediaan Fasilitas dan Tenaga Kesehatan Dalam Mendukung Cakupan Semesta Jaminan Kesehatan Nasional, *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pelayanan Kesehatan*, 1, 1, 6–16.
- Muryanti, L., Fitria, L. N., Hanaya, G., & Triawan, F., 2021, Foldable Bed Design Concept for COVID-19 Patient: A Machine Design Case Study, *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 1, 2, 127–140.
- Oktamianti, P., & Pebrina, A., 2019, Kajian Kebutuhan Pengembangan Rumah Sakit Pemerintah Daerah Kelas B di Provinsi Sulawesi Utara, *Jurnal ARSI*, 5, 2, 59–71.
- Oktaviandri, M., & Paramasivam, D. K. A. V., 2020, Design and Fabrication of Customized Ais Kacang Vending Machine, *Indonesian Journal of Computing, Engineering and Design (IJoCED)*, 2, 1, 24-31.
- Pal, R., & Yadav, U., 2021, Resurgence of COVID-19 in India: Time for introspection, *Postgraduate Medical Journal*, 10–11.
- Pookarath, H. H., & Parameswaran, M., 2018, *Design of Equipments that helps in Patient Transferring*, 1967–1969.
- R. G. Budynas, J. K. Nisbett, and J. E. Shigley, 2020, *Shigley's Mechanical Engineering Design Tenth Edition*. New York, NY: McGrawHill Education.
- Rusca Putra, K., & Setyowati, 2019, Prevalence of burnout syndrome among nurses in general hospitals in provincial East Java: Cross-sectional study, *Enfermeria Clinica*, 29, 362–366.
- Saptaji, K., Afiqah, S. N., & Ramdan, R. D., 2019, A Review on Measurement Methods for Machining Induced Residual Stress, *Indonesian Journal of Computing, Engineering and Design (IJoCED)*, 1, 2, 106-120.
- Boughattas, W., El Maalel, O., Maoua, M., Bougmiza, I., Kalboussi, H., Brahem, A., Chatti, S., Mahjoub, F. and Mrizak, N., 2017, Low Back Pain among Nurses: Prevalence, and Occupational Risk Factors, *Occupational Diseases and Environmental Medicine*, 5, 26- 37.
- Zulaikah, S., Rahmanda, W. H., & Triawan, F., 2020, Foldable Front Child-Seat Design for Scooter Motorcycle: Strength Analysis Under Static and Dynamic Loading, *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, 3, 2, 37-44.