

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 4, No. 1, June 2022

EDITORIAL

Memasuki tahun keempat kiprahnya dalam dunia penerbitan artikel publikasi ilmiah, *Journal of Mechanical Design and Testing* (JMDT) terus berupaya berbenah diri untuk memperbaiki kualitas dan format artikel yang dihadirkan. Sejak April 2022, JMDT telah dimasukkan dalam sistem GARUDA: Garba Rujukan Digital, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan (Kemendikbud) Republik Indonesia dan dapat diakses melalui tautan berikut: <https://garuda.kemdikbud.go.id/journal/view/24394>. Selain itu, mulai Vol. 4 No. 1 tahun 2022 ini, JMDT menggunakan format kertas ukuran A4 untuk menyajikan artikel-artikelnya, sehingga hal ini akan mempermudah pembaca yang bermaksud mencetak artikel yang telah diunduh. Pada edisi ini, JMDT menghadirkan beberapa artikel pilihan di bidang simulasi mekanika benda padat, fluida serta energi, di antaranya Simulasi Elemen Hingga untuk Tali Baja di Bawah Pengaruh Pembengkokan Paksa, *Preliminary Design of Electric Linear Actuator for Hospital Bed Domestic Product*, Simulasi Numerik Pengaruh Jumlah *Fuel Injector* dan Dimensi Lubang Liner Ruang Bakar Turbojet 200 N dan Analisis Numerik Dispersi Kebocoran Gas Pipeline Dalam Variasi Tekanan dan Tipe Lapisan Timbunan. Hasil kajian dari studi eksperimental juga dihadirkan pada edisi perdana tahun 2022 ini, antara lain Karakterisasi Permeabilitas Serabut Kelapa Sebagai Bahan Media Filtrasi dan Studi Eksperimental Pengendalian *Heat Input* Guna Pencegahan *Burn-Through* pada Perbaikan Pipa Dengan *Metode Weld-Deposition*. Kami berharap semua artikel yang dihadirkan ini semakin menambah kental kontribusi JMDT, khususnya di bidang keilmuan teknik mesin dan masyarakat pada umumnya.

Budi Arifvianto
Editor-in-chief, Journal of Mechanical Design and Testing
Juni 2022

JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN AND TESTING

Volume 4, No. 1, June 2022

Daftar Isi

Simulasi Elemen Hingga untuk Tali Baja di Bawah Pengaruh Pembengkokan Paksa	
A.G. Senjaya dan Suyitno	1-9
Karakterisasi Permeabilitas Serabut Kelapa Sebagai Bahan Media Filtrasi.....	
N. Wahyudi1, H.S.B. Rochardjo dan J. Waluyo	10-24
<i>Preliminary Design of Electric Linear Actuator for Hospital Bed Domestic Product.....</i>	
S. Hermawan and H.S.B. Rochardjo	25-31
Simulasi Numerik Pengaruh Jumlah <i>Fuel Injector</i> dan Dimensi Lubang Liner Ruang Bakar Turbojet 200N	
A. Syarifudin dan M.A. Bramantya	32-45
Studi Eksperimental Pengendalian <i>Heat Input</i> Guna Pencegahan <i>Burn-Through</i> pada Perbaikan Pipa Dengan Metode <i>Weld-Deposition</i>	
K. A. Pambudi dan M. N. Ilman	46-55
Analisis Numerik Dispersi Kebocoran Gas <i>Pipeline</i> Dalam Variasi Tekanan dan Tipe Lapisan Timbunan	
F. Fikri dan Fauzun	56-67

Editorial Team

Editor-in-chief

Dr. Ir. Budi Arifvianto, S.T., M.Biotech., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Section Editor

Prof. Dr. Ir. Suyitno, S.T., M.Sc., IPM., *Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Indonesia*

Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Reviewer

I Gusti Bagus Budi Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Gunawan Setia Prihandana, S.T., M.Eng., Ph.D, *Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Indonesia*

Dr. Ir. I Ketut Gede Sugita, M.T., *Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Indonesia*

Dr.Eng. Herianto, S.T., M.Eng., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Willie Prasadha, S.T., M.Eng., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Ir. Priyo Tri Iswanto, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Mohammad Rais Alfiansyah Taufiq, S.T., M.Sc., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Ir. Muhammad Akhsin Muflikhun, ST, MSME., Ph.D., *Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia*

Prof. Sugiman, S.T.,M.T., P.hD., *Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Indonesia*

Tata Letak & Sampul

Fitri Untari

Dikelola dan Diterbitkan Oleh:

Departmen 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

Simulasi Elemen Hingga untuk Tali Baja di Bawah Pengaruh Pembengkokan Paksa

A.G. Senjaya* dan Suyitno

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: ag.senjaya@gmail.com

Abstrak

Tali baja secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi. Pada kasus tertentu, tali baja dapat digunakan dengan cara dililitkan pada objek sehingga dipaksa bekerja di bawah pengaruh pembengkokan paksa. *Det Norske Veritas* (DNV) yang merupakan sebuah institusi sertifikasi independen, memberikan formulasi untuk menghitung pengurangan kapasitas tali baja berdasarkan rasio diameter pembengkokan dan diameter tali baja, D/d . Pengurangan kapasitas dalam hal ini adalah rasio terhadap kapasitas normal tali baja dalam kondisi aksial tarik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui korelasi antara kondisi pembengkokan paksa dengan pengurangan kapasitas tali baja, mengetahui selisih antara hasil simulasi dengan formulasi DNV, serta mengetahui parameter yang berkontribusi terhadap pengurangan kapasitas tali baja. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi elemen hingga. Dimulai dengan pemodelan kasus aksial tarik dengan variasi sudut lilitan, dilanjutkan dengan validasi terhadap hasil eksperimen dari literatur. Model dengan *error* minimum selanjutnya digunakan dalam simulasi pembengkokan paksa. Pengurangan kapasitas tali baja yang terjadi dibandingkan dengan hasil formulasi DNV. Hasil penelitian menunjukkan semakin kecil nilai D/d pengurangan kapasitas yang terjadi semakin besar. Perbandingan dengan formulasi DNV menunjukkan kesesuaian yang baik pada nilai D/d yang besar tetapi menurun pada nilai D/d yang semakin kecil dimana selisih yang dihasilkan semakin meningkat. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa kekakuan material sangat mempengaruhi pengurangan kapasitas tali baja di bawah pengaruh pembengkokan paksa.

Kata kunci : Tali Baja, Tekuk, Pengurangan Kapasitas.

Abstract

Steel wire ropes are widely used in various applications. In certain cases, wire ropes can be wrapped around object and forced to work under the influence of bending. *Det Norske Veritas* (DNV) as an independence certification agency, provides formulation for calculating wire rope capacity reduction based on the ratio of bending diameter and rope diameter, D/d . Capacity reduction is defined as a ratio of capacity under the influence of bending compared to axial tension capacity. This study aims to investigate the correlation between forced bending and capacity reduction of a wire rope, to find out the difference between simulation and DNV formulation results, and to determine its contributing parameters. The study was conducted through the finite element simulation method. Starting with simulation of axial tensile cases with lay angles variations, validated by experimental results from the literature. A model with minimum error is then selected for the forced bending simulation. The capacity reduction that occurs is compared to the DNV formulation results. The results showed that the smaller the D/d ratio, the greater the capacity reduction. Comparison with the DNV formulation shows good agreement at large D/d values but decreases at smaller D/d values where the resulting difference increases. The simulations also show that the stiffness of the material greatly affects the capacity reduction under the influence of forced bending.

Keywords : Wire Rope, Bending, Capacity Reduction.

1. PENDAHULUAN

Dalam berbagai bidang industri dan konstruksi, tali baja memegang peranan yang sangat penting dalam hal kapasitasnya untuk digunakan dalam operasi angkat berat. Dalam kondisi-kondisi khusus tertentu, penggunaan tali baja dengan mengaplikasikan pembengkokan paksa tidak dapat dihindari.

Berbagai penelitian dan eksperimen telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik tali baja di bawah berbagai jenis kondisi pembebanan, akan tetapi penelitian terkait pengurangan kapasitas tali baja dalam korelasinya dengan kondisi pembengkokan paksa masih terbatas. Salah satu penelitian yang mencoba mengangkat permasalahan ini dilakukan oleh de Jong yang membangun sebuah model analitis untuk menghitung pengurangan kapasitas tali baja di bawah pengaruh pembengkokan paksa. Model elemen hingga untuk mengetahui pengaruh pembengkokan pada tali baja pernah dilakukan oleh Erdönmez dan Imrak, serta Kmet dkk akan tetapi masih terbatas pada satu radius pembengkokan tertentu. Untuk keperluan praktis, formulasi pengurangan kapasitas tali baja yang diusulkan DNV pada persamaan (1) masih digunakan secara umum sebagai referensi dalam berbagai aplikasi.

$$Y_b = \frac{1}{1 - \frac{0,5}{\sqrt{D/d}}} \quad (1)$$

dimana Y_b = faktor pengurangan kapasitas, D = diameter pembengkokan, dan d = diameter tali baja.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kondisi pembengkokan paksa dengan pengurangan kapasitas tali baja, mengetahui selisih antara hasil simulasi elemen hingga dan formulasi DNV, serta mengetahui parameter yang berkontribusi terhadap pengurangan kapasitas tali baja.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mengkaji penelitian-penelitian sebelumnya dalam hal metode serta pengembangan yang bisa dilakukan. Tahap selanjutnya dilakukan pengumpulan data, dalam hal ini data yang digunakan berupa data sekunder yang diperoleh dari buku dan jurnal penelitian. Berdasarkan data dan informasi yang diperoleh dari dua tahap awal tersebut, dilakukan pemodelan elemen hingga untuk tali baja yang mencakup dua kondisi yaitu kondisi aksial tarik dan kondisi pembengkokan paksa. Enam model tali baja untuk kasus aksial tarik dengan variasi sudut lilitan akan digunakan sebagai bahan validasi dengan membandingkannya terhadap hasil eksperimen yang dilakukan oleh Utting dan Jones (1987). Model tali baja yang memberikan nilai kesalahan minimum pada simulasi aksial tarik selanjutnya digunakan sebagai dasar pemodelan kondisi pembengkokan paksa. Simulasi pembengkokan paksa menghasilkan faktor pengurangan kapasitas tali baja yang kemudian akan dibandingkan dengan nilai faktor pengurangan kapasitas hasil formulasi DNV.

2.1. Pemodelan Geometri Tali Baja

Enam model tali baja dibuat berdasarkan data-data yang diperoleh dari eksperimen yang dilakukan oleh Utting dan Jones, serta penelitian yang dilakukan oleh Jiang dan penelitian oleh de Jong. Properti material kawat penyusun tali baja dan parameter yang akan digunakan dalam pemodelan disajikan dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Properti Material Kawat Penyusun Tali Baja

Jenis material	<i>Galvanized steel (drawn zinc coated, class Z wire)</i>
Modulus Elastisitas	188 GPa
Rasio Poisson	0,3
Tegangan Leleh	1540 MPa
Kekuatan Tarik	1770 MPa – 2000 MPa
Koefisien Friksi	0,115

Komposisi kimia kawat penyusun tali baja disajikan dalam Tabel 2.

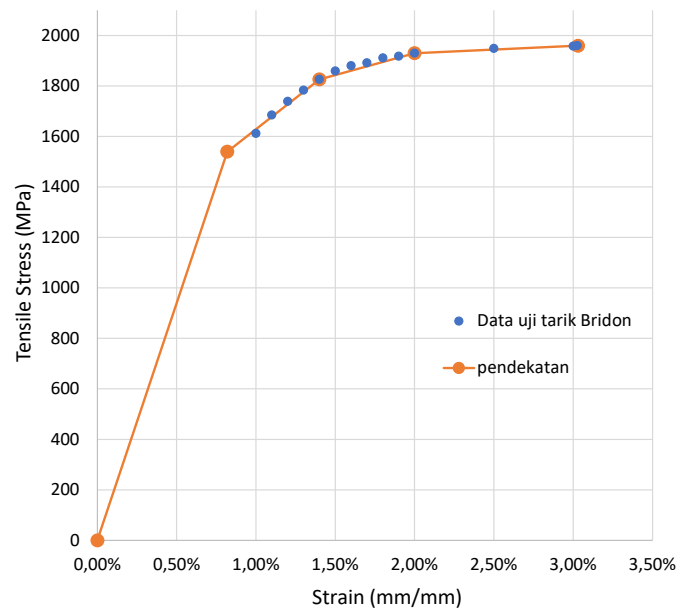
Tabel 2. Komposisi Kimia Kawat Penyusun Tali Baja

Kandungan	%
Karbon	0,7 – 0,95
Mangan	0,5 – 0,8
Silikon	0,35

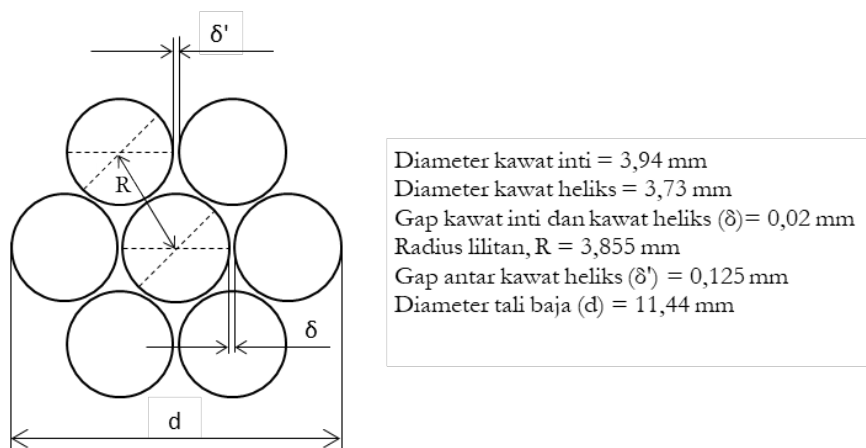
Kurva tegangan-regangan plastis diperoleh dari de Jong yang dalam penelitiannya menyajikan data uji tarik material yang dilakukan oleh perusahaan pamanufaktur tali baja Bridon Group dengan benda uji baja galvanis *extra improved plow steel* (EIPS) ukuran 2,8 mm dengan kekuatan tarik maksimum sebesar 1960 MPa seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Selain data properti material, data geometri tali baja juga sangat penting. Data ini diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Utting dan Jones yang melakukan eksperimen uji tarik terhadap 6 buah tali baja sebagai benda uji. Detail data geometri yang akan digunakan dalam simulasi disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3. Data Geometri Tali Baja

No. Tali Baja	Diameter kawat inti (mm)	Diameter kawat heliks (mm)	Radius heliks, R (mm)	Sudut heliks, α (°)	Panjang lilitan, P (mm)	1/3 Panjang lilitan (mm)
TB I	3,94	3,73	3,855	72,97	79,08	26,36
TB II	3,94	3,73	3,855	76,01	97,22	32,41
TB III	3,94	3,73	3,855	77,08	105,59	35,20
TB IV	3,94	3,73	3,855	77,80	112,03	37,34
TB V	3,94	3,73	3,855	78,97	124,26	41,42
TB VI	3,94	3,73	3,855	80,77	149,05	49,68

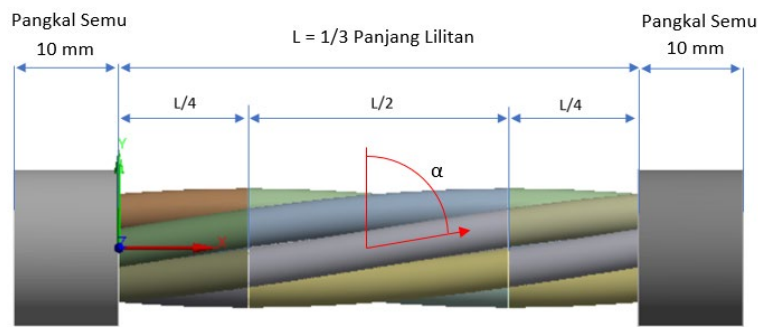


Gambar 1. Pendekatan kurva tegangan-regangan



Gambar 2. Penampang tali baja

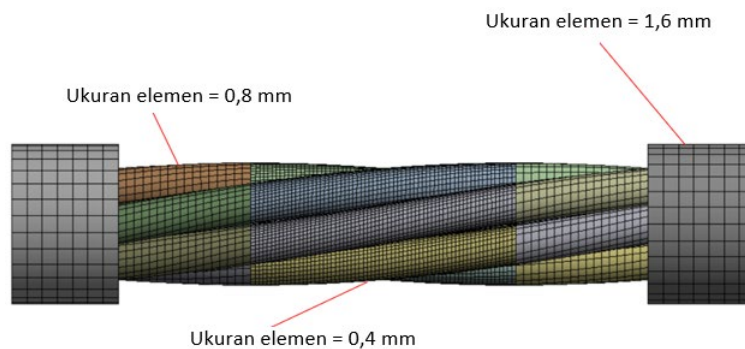
Masing-masing model tali baja akan dibuat sepanjang 1/3 panjang lilitan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Model geometri tali baja

Pada Gambar 3 di atas diperlihatkan bagian tambahan pada model yang diberi identifikasi sebagai pangkal semu. Komponen ini ditambahkan untuk keperluan aplikasi pembebanan. Properti material pangkal semu ditentukan sedemikian rupa agar regangan yang terjadi pada pangkal semu sangat kecil hingga pengaruhnya pada domain yang diteliti dapat diabaikan. Begitu pula dengan nilai tegangan leleh dan kekuatan tariknya dibuat sangat tinggi sehingga kegagalan tidak akan terjadi pada bagian ini.

Tahap pemodelan berikutnya dilanjutkan dengan diskritisasi model atau *meshing*. Ukuran *mesh* yang dipilih dan sudah divalidasi dengan analisis sensitivitas ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Diskritisasi model

Tahap berikutnya dilakukan pendefinisian kontak antara komponen model. Jenis definisi kontak yang diaplikasikan adalah kontak friksional dengan detail seperti ditunjukkan pada Tabel 4 di bawah.

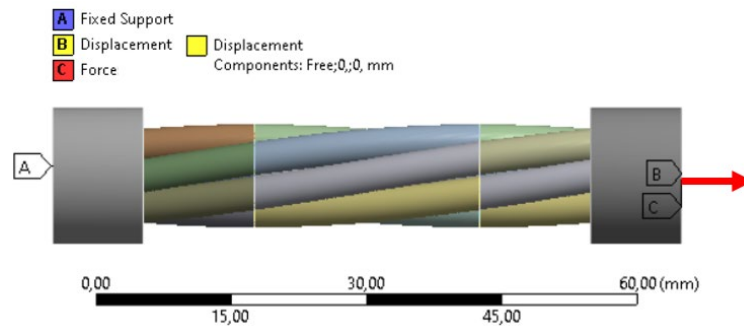
Tabel 4. Definisi Kontak antar Kawat Penyusun Tali Baja

No.	Kontak	Target	Tipe	μ	Sketsa
1	Heliks 1 (H1)	Inti	Friksional	0,115	
2	Heliks 2 (H2)	Inti	Friksional	0,115	
3	Heliks 3 (H3)	Inti	Friksional	0,115	
4	Heliks 4 (H4)	Inti	Friksional	0,115	
5	Heliks 5 (H5)	Inti	Friksional	0,115	
6	Heliks 6 (H6)	Inti	Friksional	0,115	
7	Heliks 1 (H1)	Heliks 2 (H2)	Friksional	0,115	
8	Heliks 3 (H3)	Heliks 2 (H2)	Friksional	0,115	
9	Heliks 3 (H3)	Heliks 4 (H4)	Friksional	0,115	
10	Heliks 5 (H5)	Heliks 4 (H4)	Friksional	0,115	
11	Heliks 5 (H5)	Heliks 6 (H6)	Friksional	0,115	
12	Heliks 1 (H1)	Heliks 6 (H6)	Friksional	0,115	

Kontak antar kawat ditentukan berdasarkan posisinya dalam penampang tali baja. Kawat inti memiliki enam kontak, yaitu terdiri dari satu kontak dengan masing-masing kawat heliks yang mengitarinya. Satu kawat heliks memiliki tiga kontak, yaitu satu kontak dengan kawat inti dan masing-masing satu kontak dengan kawat heliks yang bersebelahan.

2.2. Pemodelan Kasus Aksial Tarik

Kondisi batas yang digunakan untuk kasus aksial tarik adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5 berikut ini.



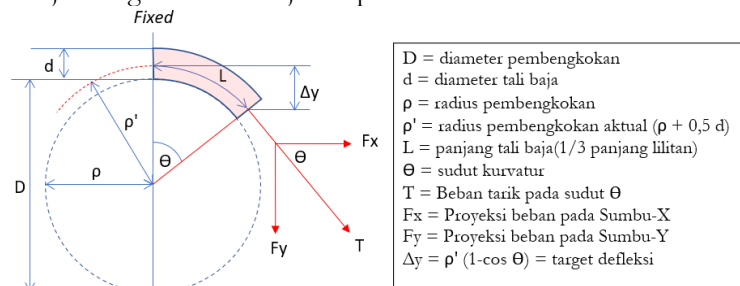
Gambar 5. Kondisi batas untuk kasus aksial tarik.

Selanjutnya simulasi aksial tarik dilakukan dengan cara meningkatkan beban aksial secara bertahap hingga terjadi kegagalan. Kegagalan diasumsikan terjadi ketika tegangan von-mises pada luas penampang salah satu dari 7 kawat penyusun tali baja mencapai nilai tegangan tarik maksimum sebesar 1960 MPa. Hasil simulasi aksial kemudian akan divalidasi dengan hasil percobaan Utting dan Jones (1987). Dari hasil validasi selanjutnya dipilih salah satu model tali baja dengan nilai kesalahan minimum untuk digunakan dalam pemodelan kasus pembengkokan paksa.

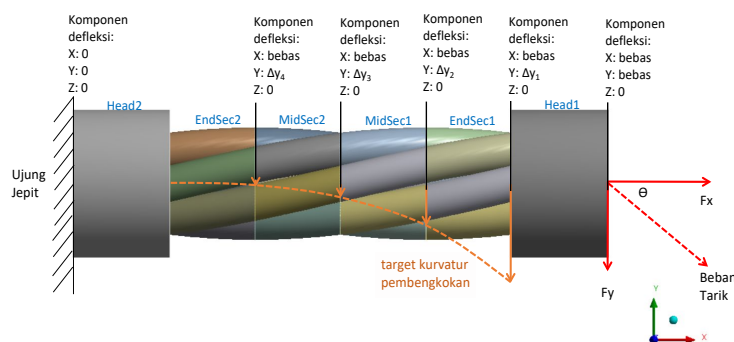
2.3. Pemodelan Kasus Pembengkokan Paksa

Simulasi tali baja di bawah pengaruh pembengkokan paksa dilakukan dengan menggunakan model geometri tali baja yang memberikan nilai kesalahan minimum pada kasus aksial tarik. Duplikasi model geometri dan penyesuaian kondisi batas akan dilakukan untuk beberapa variasi radius pembengkokan yaitu 100X, 70X, 45X, 25X, 20X, 15X dan 10X diameter tali baja.

Kondisi batas yang digunakan untuk simulasi pembengkokan paksa terdiri dari beberapa seri defleksi (Δy) dan aksial tarik pada sudut tertentu sesuai dengan bentuk target kurvatur pembengkokan. Nilai defleksi yang diaplikasikan dihitung dengan dasar asumsi bahwa kurvatur pembengkokan akan mengikuti persamaan sebuah lingkaran dengan radius yang bersesuaian dengan nilai D/d , dan nilai beban aksial tarik selalu diaplikasikan normal terhadap penampang tali baja sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Skema aplikasi kondisi batas untuk kasus pembengkokan paksa



Gambar 7. Aplikasi kondisi batas pembengkokan paksa pada model

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Simulasi Aksial Tarik

Tabel 5 berikut ini menyajikan hasil simulasi aksial tarik pada enam model tali baja dan perbandingannya dengan hasil eksperimen Utting dan Jones (1987).

Tabel 5. Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen Kasus Aksial Tarik

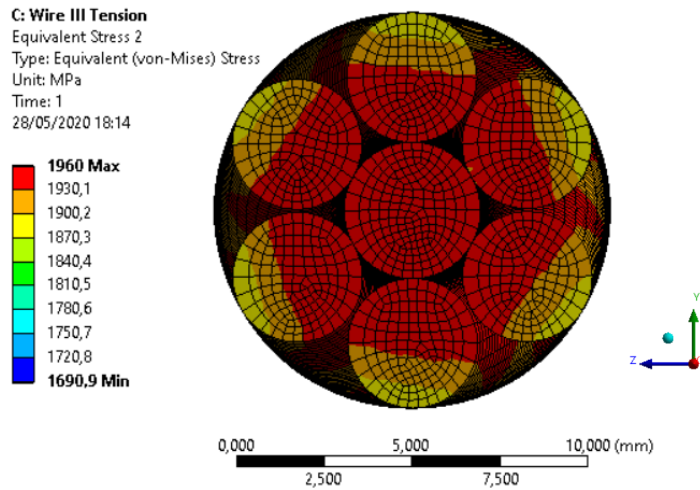
No. Tali Baja	Sudut heliks, α (°)	Beban Tarik (kN)	Beban Putus hasil eksperimen (kN)	% deviasi dari beban putus hasil eksperimen	% deviasi dari rata-rata beban putus hasil eksperimen
TB I	73,0	131,0	137,0	-4,38%	-5,89%
TB II	76,0	136,5	139,6	-2,22%	-1,94%
TB III	77,1	138,4	138,6	-0,14%	-0,57%
TB IV	77,8	142,0	145,4	-2,34%	2,01%
TB V	79,0	141,1	136,7	3,22%	1,36%
TB VI	80,8	143,3	137,9	3,92%	2,95%
rata-rata		138,7	139,2	-0,29%	-0,35%

Dari hasil di atas terlihat bahwa keenam model memberikan hasil yang cukup baik dengan selisih terbesar terhadap hasil eksperimen sebesar 4,38%. Perbandingannya dengan hasil eksperimen dalam bentuk grafik ditunjukkan pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Perbandingan beban putus hasil simulasi vs hasil eksperimen

Dari keenam model di atas model TB III yang memiliki nilai kesalahan paling rendah sebesar 0,14% dipilih untuk digunakan dalam pemodelan pembengkokan paksa. Distribusi tegangan pada penampang TB III yang ditunjukkan pada Gambar 9 memperlihatkan bahwa kegagalan terjadi diawali pada bagian kawat inti dimana tegangan maksimum sebesar 1960 MPa tercapai lebih dahulu.



Gambar 9. Distribusi tegangan pada penampang TB III untuk kasus aksial tarik

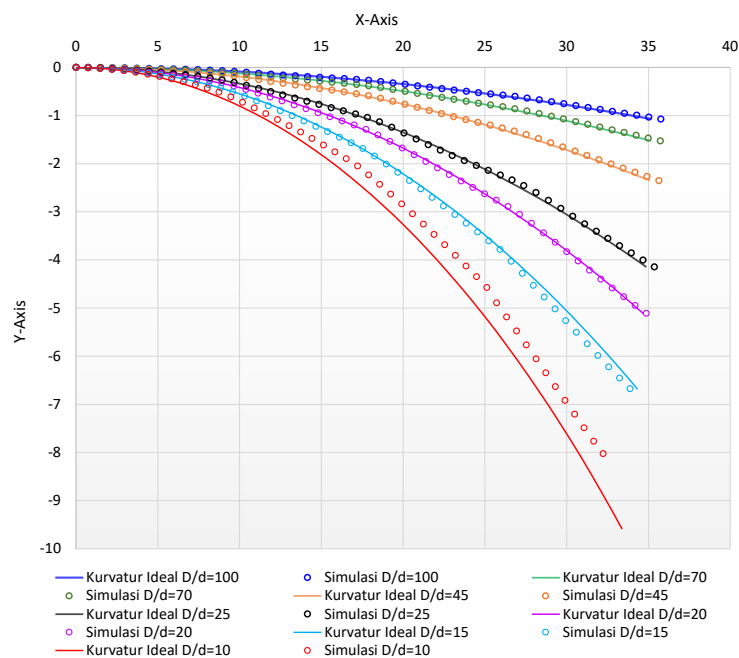
3.2. Hasil Simulasi Pembengkokan Paksa

Hasil simulasi diperoleh dengan cara mengaplikasikan kurvatur pembengkokan pada model tali baja seiring dengan penambahan nilai beban aksial tarik secara bertahap hingga terjadi kegagalan pada tali baja. Besarnya beban tarik yang menyebabkan kegagalan pada kondisi pembengkokan paksa selanjutnya dibandingkan dengan beban tarik tereduksi sesuai formulasi DNV.

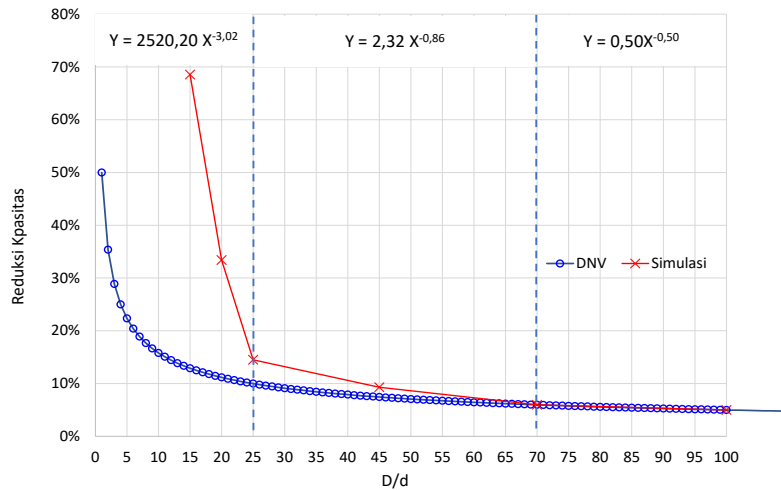
Plot kurvatur pembengkokan untuk masing-masing kasus dan perbandingannya dengan kurvatur ideal yang diturunkan berdasarkan persamaan lingkaran diperlihatkan pada Gambar 10. Plot kurvatur dibentuk berdasarkan deformasi yang terjadi pada kawat inti.

Hasil plot kurvatur pembengkokan memperlihatkan kesesuaian yang cukup baik antara kurvatur hasil simulasi dengan kurvatur ideal kecuali pada kasus $D/d = 10$, hal ini disebabkan pada diameter pembengkokan tersebut, deformasi lokal yang terjadi telah melampaui titik regangan maksimum sehingga pada bagian tersebut kriteria kegagalan telah tercapai terlebih dahulu, akibatnya simulasi terhenti dan konvergensi tidak tercapai.

Selanjutnya, hasil simulasi beban tarik yang menyebabkan kegagalan pada kondisi pembengkokan paksa untuk masing-masing variasi D/d disajikan dalam Gambar 11 dan Tabel 6 di bawah.



Gambar 10. Plot kurvatur pembengkokan hasil simulasi vs kurvatur ideal



Gambar 11. Grafik pengurangan kapasitas dengan formulasi DNV vs hasil simulasi

Tabel 6. Beban Tarik Maksimum di bawah Pengaruh Pembengkokan Paksa

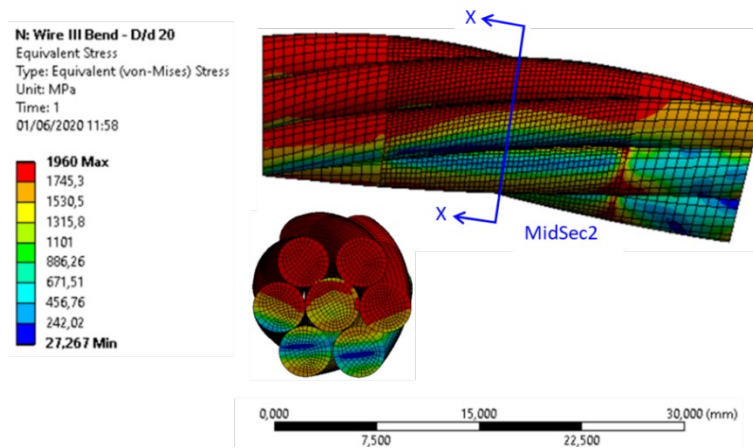
D/d	Kapasitas Tarik TB III (kN)	Kapasitas di bawah pengaruh pembengkokan (kN)	% Reduksi Simulasi	% Reduksi (DNV)
10	138,40	non-konvergen	non-konvergen	15,81%
15	138,40	43,55	68,53%	12,91%
20	138,40	92,19	33,36%	11,18%
25	138,40	118,33	14,50%	10,00%
45	138,40	125,52	9,30%	7,45%
70	138,40	130,13	5,98%	5,98%
100	138,40	131,48	5,00%	5,00%

Dari Gambar 11 dan Tabel 6 di atas terlihat bahwa hasil simulasi menunjukkan tingkat kesesuaian yang beragam dibandingkan dengan hasil formulasi DNV pada rentang nilai D/d tertentu, yang secara matematis masing-masing mengikuti fungsi pangkat yang berbeda. Pada rentang nilai $D/d \geq 70$, pengurangan kapasitas dapat didekati dengan persamaan $Y = 0,50X^{-0,50}$ dimana Y adalah persentase pengurangan kapasitas, dan X adalah rasio diameter, D/d . Pada rentang nilai $70 > D/d \geq 25$, fungsi yang mendekati adalah $Y = 2,32X^{-0,86}$. Sedangkan pada rentang nilai $D/d < 25$, pengurangan kapasitas dapat didekati dengan fungsi $Y = 2520,20X^{-3,02}$.

Semakin kecil nilai rasio D/d , selisih hasil simulasi dan formulasi DNV semakin besar. Hal ini dikarenakan regangan lokal yang terjadi pada saat pembengkokan diaplikasikan tidak diperhitungkan dalam formulasi DNV.

Pada nilai rasio $D/d = 100$ dan $D/d = 70$, hasil simulasi memberikan hasil yang sama dengan formulasi pengurangan kapasitas DNV. Pada nilai rasio $D/d = 45$ dan $D/d = 25$ berturut-turut simulasi elemen hingga memberikan hasil yang lebih konservatif dibandingkan hasil formulasi DNV dengan selisih 1,85% dan 4,50%. Pada nilai rasio $D/d = 20$, persentase reduksi hasil simulasi sebesar 33,85% sementara formulasi DNV menghasilkan nilai reduksi sebesar 11,18%. Pada $D/d = 15$, simulasi elemen hingga menghasilkan persentase reduksi sebesar 68,53% sementara hasil formulasi DNV hanya menghasilkan nilai reduksi sebesar 12,91%. Pada nilai $D/d = 10$, simulasi elemen hingga tidak memberikan hasil yang konvergen, hal ini disebabkan oleh radius pembengkokan yang kecil mengakibatkan regangan lokal yang terjadi melebihi 3%, artinya tali baja sudah terlebih dahulu mengalami kegagalan sebelum dibebani. Untuk kondisi yang sama, formulasi DNV memberikan nilai pengurangan kapasitas sebesar 15,81%.

Distribusi tegangan pada penampang tali baja untuk salah satu kasus pembengkokan paksa yaitu pada rasio $D/d = 20$ ditunjukkan pada Gambar 12 di bawah.



Gambar 12. Plot distribusi tegangan untuk kasus $D/d = 20$

Dari hasil plot distribusi tegangan pada penampang tali baja, terlihat bahwa kegagalan terjadi pada kawat yang berada pada sisi luar kurvatur pembengkokan hal ini sesuai dengan fakta bahwa kurvatur luar akan mengalami deformasi yang lebih besar dibandingkan bagian sisi dalam penampang tali baja.

4. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi elemen hingga untuk tali baja di bawah pengaruh pembengkokan paksa diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengurangan kapasitas tali baja di bawah pengaruh pembengkokan paksa sangat bergantung pada rasio diameter pembengkokan terhadap diameter tali baja. Semakin kecil nilai D/d pengurangan kapasitas yang terjadi semakin besar mengikuti sebuah fungsi pangkat yang berbeda untuk masing-masing rentang nilai D/d .
2. Perbandingan hasil simulasi dengan formulasi DNV menunjukkan hasil yang sama pada rentang nilai $D/d \geq 70$, mengikuti hubungan $Y = 0,50X^{-0,50}$. Pada rentang nilai $70 > D/d \geq 25$, hubungan antara pengurangan kapasitas dengan rasio diameter D/d dapat didekati dengan persamaan $Y = 2,32X^{-0,86}$. Pada rentang ini selisih antara hasil simulasi dan formulasi DNV dapat mencapai 4,50%. Pada rentang nilai $D/d < 25$, pengurangan kapasitas dapat didekati dengan persamaan $Y = 2520,2X^{-3,02}$, dimana selisih antara simulasi dengan formulasi DNV menjadi sangat signifikan, hal ini dikarenakan formulasi DNV tidak memperhitungkan deformasi plastis yang terjadi akibat pembengkokan. Dengan demikian, penggunaan formulasi DNV untuk nilai $D/d < 25$ tidak dianjurkan.
3. Selain rasio diameter pembengkokan dan diameter tali baja, kekakuan material sangat berpengaruh juga terhadap besarnya faktor reduksi. Hal ini mulai terlihat pada simulasi dengan nilai rasio $D/d < 25$ dimana regangan lokal yang terjadi akibat pembengkokan paksa sudah memasuki daerah plastis bahkan sebelum beban diaplikasikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- de Jong, B. C., 2015, Analytical and experimental analysis of the capacity of steel wire ropes subjected to forced bending, *Thesis*, Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Delft University of Technology.
- Erdönmez, C. and Imrak, C. E., 2009, Modeling and Numerical Analysis of The Wire strand, *Journal of Naval Science and Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 30-38. [3] Leheta, H. (2008), *Cathodic Protection Design Procedure for Steel Offshore Structures*, Alexandria University, Egypt.
- Jiang, W-G., 2011, *A concise finite element model for pure bending analysis of simple wire strand*, *International Journal of Mechanical Sciences*, doi:10.1016/j.ijmecsci.2011.09.008.
- Kmet, S., Stanova, E., Fedorko, G., Fabian, M., and Brodniansky, J., 2013, *Experimental investigation and finite element analysis of a four-layered spiral strand bent over a curved support*, *Journal of Engineering Structures*, Science Direct, Vol. 57, pp. 475-483.
- Utting, W.S., Jones, N., 1987, The response of wire rope strands to axial tensile loads – Part I. Experimental Results and Theoretical Predictions, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 29, No. 9, pp. 605-619.

Karakterisasi Permeabilitas Serabut Kelapa Sebagai Bahan Media Filtrasi

N. Wahyudi^{1*}, H.S.B. Rochardjo², dan J. Waluyo²

¹Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

E-mail: lek Nur2000@gmail.com

Abstrak

Media filtrasi merupakan material yang pada saat kondisi operasi sebuah filter memiliki sifat mampu alir terhadap fluida tertentu dan juga memiliki sifat tidak mampu alir terhadap zat-zat pengotor tertentu. Filter tipe *Deep-bed filtration* memiliki media filtrasi berbentuk padatan granular seperti pasir maupun berupa lapisan serat alam, serat sintesis ataupun serat metal yang dipadatkan. Serat yang digunakan sebagai media filtrasi *Deep-bed filtration* bekerja dengan prinsip saat fluida mengalir melalui filter maka zat-zat partikulat pengotor tertahan dan terkumpul di sela-sela rongga pori-pori yang terbentuk diantara sekumpulan serat media filtrasi. Jumlah serat yang digunakan per satuan volume atau densitas media filtrasi menentukan nilai tahanan alir atau permeabilitas sebuah media filtrasi. Penelitian ini difokuskan dalam melihat karakteristik permeabilitas media filtrasi serat sabut kelapa berdasarkan jumlah kerapatan serat yang digunakan. Karakteristik permeabilitas media filtrasi sangat berpengaruh terhadap efisiensi aliran fluida dalam aplikasi filter pasir sumur minyak bumi. Karakteristik permeabilitas serat sabut kelapa diukur dengan cara membuat core spesimen uji diameter 3,8 cm, panjang 7 cm dan variasi massa serat sabut kelapa spesimen uji 7,5; 10; 15; 17,5 dan 20 gram. Kemudian masing-masing spesimen uji core diukur nilai permeabilitasnya menggunakan alat *Permeability Meter* AFS200. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai permeabilitas serat sabut kelapa menurun seiring bertambahnya massa serat sabut kelapa yang digunakan untuk membuat core spesimen uji. Nilai permeabilitas paling rendah 8508 miliDarcy diperoleh dari spesimen uji dengan massa sabut 20 gram dan nilai permeabilitas paling tinggi 19.790 miliDarcy dihasilkan dari spesimen uji dengan massa sabut 7,5 gram.

Kata kunci : Media Filtrasi, Serat Sabut Kelapa, Permeabilitas, miliDarcy.

Abstract

A filter medium is a material which at the operating conditions of the filter has flowability to certain fluids and also has an impermeability to selected impurities. A Deep Bed Filtration type filter have a filtration medium in the form of granular solids such as sand or in the form of fibers layer as Natural fibers, Synthetic fibers and Metal fibers. The fibers as a filter medium of Deep Bed Filtration works on the principle that when the fluid flows through the filter, the impurities particulate solids are held and collected in between the porous cavities formed by group of filter medium fibers. An number of fibers per unit volume or density used to develop the filter lead the flow resistance or permeability value of a filter medium. This research focused on permeability characterization of coir as filter medium material based on the coir fiber density. The permeability characterization of the filter medium is highly impact to the fluid flow efficiency of the oil well with sand filter application. The permeability characterization process of the coir fiber was carried out by build a core specimen with a diameter of 3.8 cm, 7 cm in length and weight variable of the coir fiber specimens for 7.5, 10, 15, 17.5, and 20 grams. Then the permeability of the core specimens measured using permeability meter AFS200. The results showed the permeability value of coir decreased as increasing the coir fiber weight for developing the core specimens. The lowest permeability value recorded at 8508 millidarcy for 20-gram coir specimen and the highest permeability value at 19.790 millidarcy for 7.5-gram coir specimen.

Keywords : Filter medium, Coir fiber, Permeability, miliDarcy.

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan tropis dengan panjang garis pantai terpanjang nomor 2 (dua) di dunia merupakan salah satu negara penghasil buah kelapa terbesar di dunia. Dengan jumlah produksi buah kelapa mencapai 17 juta ton per tahun menjadikan Indonesia memiliki 30% production share dari seluruh total produksi buah kelapa di dunia (*worldatlas.com*, 2019). Besarnya produksi buah kelapa ini ternyata tidak dibarengi dengan besarnya produksi produk sampingan dari pemrosesan buah kelapa berupa serabut kelapa atau coir. Berdasarkan data dari Direktorat Jendral Perkebunan-Kementrian Pertanian, total ekspor produk serabut kelapa mentah dan yang sudah diproses pada tahun 2015-2017 hanya sekitar 35.000-ton. Indonesia hanya menempati peringkat ke-5 sebagai negara produsen serabut kelapa mentah (*coir*) di dunia, jauh dibawah negara India yang mampu memproduksi sekitar 390.000-ton pertahun. (*marketwatch.com*, 2019). Menurut Lay dan Pasang (2003), serabut kelapa ini terkenal memiliki sifat kuat, ulet, elastis, tahan suhu tinggi dan tidak mudah lapuk. Serabut kelapa memiliki ukuran diameter serat antara 0,1-1,5 mm (Djarmiko dkk., 1990) dan memiliki kemampuan filtrasi limbah cair rumah makan dengan menurunkan kadar *Biological Oxygen Demand* (BOD) dan *Total Suspended Solid* (TSS) (Utomo dkk., 2018).

Penelitian pemanfaatan serabut serat kelapa sebagai adsorban pada aplikasi filter air telah dilakukan untuk memproses limbah cairan industri tekstil. Penelitian tersebut dilakukan dengan memadatkan serabut kelapa di dalam pipa dengan ketebalan 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm dan 50 cm. Simulasi cairan limbah tekstil yang terbuat dari methylene blue dicampur air dilewatkan pada pipa yang sudah terisi serabut kelapa. Cairan yang keluar dari saluran pipa dengan serabut kelapa ditampung dan diukur tingkat intensitas cahayanya menggunakan Luxmeter. Kesimpulan dari percobaan pemanfaatan serabut kelapa pada aplikasi filter air limbah pewarna tekstil didapatkan hasil bahwa ketebalan dan kerapatan serabut kelapa sangat berpengaruh terhadap efektivitas filtrasi. Semakin tebal dan rapat serabut kelapa yang digunakan maka semakin efektif dalam melakukan filtrasi limbah pewarna tekstil, hal ini dapat dilihat dari semakin jernihnya air keluaran dari filter tersebut (Pratama dkk., 2016).

Menurut Wahyuningrum dkk. (2014) serabut serat kelapa bisa digunakan sebagai media filtrasi fluida gas untuk memisahkan padatan dari aliran gas. Aplikasi serabut kelapa pada proses filtrasi fluida gas dilakukan dengan melakukan pengujian filtering padatan emisi zat partikulat berukuran PM 2,5-mikron yang berasal dari kendaraan sepeda motor. Proses penelitian dilakukan dengan cara membentuk serabut kelapa menjadi filter batangan yang menyerupai bentuk Diesel particulate Filter (DPF). Pembentukan filter DPF menggunakan serabut kelapa dilakukan beberapa variasi kerapatan batangannya. Efisiensi filtrasi gas buang ini dibuktikan dengan mengukur konsentrasi zat partikulat berukuran PM 2,5 mikron yang keluar dari filter tersebut. Dari hasil pengujian efektivitas filtrasi sebuah filter DPF serabut kelapa didapatkan nilai efektivitas sistem filtrasi sekitar 36% sampai 47%. Pengaruh kerapatan batang filter DPF serabut kelapa menyebabkan perbedaan efisiensi filtrasi. Semakin kecil nilai kerapatan batang filter DPF yang digunakan menghasilkan semakin rendah nilai efisiensi filtrasinya.

Hasil penelitian aplikasi filtrasi menggunakan sabut kelapa oleh Pratama dkk. (2016) dan Wahyuningrum dkk. (2014) menunjukkan adanya hubungan antara densitas serabut kelapa yang digunakan dengan efektivitas filtrasi. Kenaikan densitas serabut kelapa yang digunakan menaikkan efektivitas sistem filtrasinya. Kedua penelitian tersebut belum menyinggung masalah permeabilitas yang terjadi pada media filtrasi berdasarkan densitasnya. Penulis berkeinginan untuk meneliti karakteristik permeabilitas serat sabut kelapa berdasarkan massa per satuan volume serat atau densitas.

Penelitian tentang hubungan antara permeabilitas media filtrasi aplikasi filter pasir (K_{ann}) dan permeabilitas reservoir (K_r) sumur minyak bumi sudah dilakukan oleh Hodge dkk. (2002). Nilai permeabilitas media filtrasi mempengaruhi efisiensi aliran fluida dari reservoir ke lubang sumur. Nilai permeabilitas media filtrasi sebuah filter pasir (K_{ann}) yang sama besar nilainya dengan nilai permeabilitas reservoir (K_r) (perbandingan $K_{ann}/K_r = 1$) menyebabkan nilai efisiensi aliran fluida menjadi 50%. Nilai perbandingan $K_{ann}/K_r = 3$ menghasilkan efisiensi aliran fluida 72%. Dan nilai efisiensi aliran fluida tertinggi 80% dihasilkan dari perbandingan nilai $K_{ann}/K_r = 50$, serta nilai efisiensi 80% cenderung flat sampai perbandingan nilai $K_{ann}/K_r = 1000$.

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, serat sabut kelapa memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai media filtrasi aplikasi filter pasir sumur minyak bumi jenis *Deep-bed filtration*. Prinsip kerja *Deep-bed filtration* filter pasir adalah apabila fluida minyak mengalir melalui filter maka padatan partikulat pengotor pasir formasi tertahan dan terkumpul di sela-sela rongga porous yang terbentuk diantara sekumpulan serat media filtrasi. Data permeabilitas media filtrasi merupakan salah satu faktor yang penting dalam perencanaan aplikasi filter pasir. Sejauh yang penulis ketahui dari berbagai referensi, saat ini belum ada penelitian yang menunjukkan data permeabilitas serat sabut kelapa berdasarkan kerapatan serat.

Pada penelitian ini, penulis ingin meneliti karakteristik permeabilitas serat sabut kelapa berdasarkan densitas kerapatan serat. Data permeabilitas serat sabut kelapa selanjutnya digunakan sebagai acuan perencanaan kerapatan

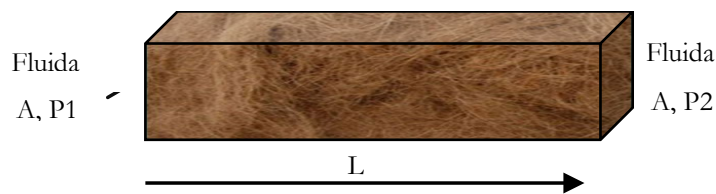
serat yang sesuai untuk aplikasi filter pasir sumur minyak miyak bumi lapangan Delta di Riau. Sumur minyak lapangan Delta memiliki data permeabilitas reservoir antara 500-2000 miliDarcy.

2. METODE PENELITIAN

Filtrasi merupakan proses pemisahan dengan menghilangkan partikel padatan, mikro organisme ataupun droplets yang berasal dari cairan maupun gas yang kemudian diendapkan pada media filtrasi (septum). Partikel yang ditangkap diendapkan pada permukaan media filtrasi maupun di dalam media filtrasi. Proses filtrasi pada umumnya berguna untuk membersihkan fluida dari partikel-partikel pengotor yang kadang terikut dalam aliran fluida. Partikel-partikel pengotor yang terkumpul pada media filtrasi selanjutnya dibuang secara kontinu selama filter beroperasi maupun secara intermitten dibersihkan ketika filter sedang tidak digunakan.

2.1. Pengukuran Permeabilitas

Permeabilitas merupakan kemampuan untuk mengalirkan fluida oleh suatu media berpori, yang mana masing-masing pori-pori tersebut saling terhubung antara satu dengan lainnya. Nilai permeabilitas suatu media di industri lebih sering dinyatakan dalam satuan Darcy. Nilai permeabilitas (k) 1 Darcy menunjukkan media dengan luas penampang (A) 1 cm² dengan panjang (L) 1 cm mampu mengalirkan fluida yang memiliki viskositas (μ) 1 centipoise dengan menghasilkan debit aliran (Q) 1 cm³/detik dan pressure drop aliran (dP) 1 atm. Gambar formulasi untuk mencari nilai permeabilitas suatu material (bahan) dapat dilihat seperti pada Gambar 1. dan rumus untuk mencari formulasi nilai permeabilitas dapat dijelaskan pada persamaan (1) berikut ini:



Gambar 1. Formulasi permeabilitas suatu material

$$Q = k \frac{dP}{L} \frac{A}{\mu} \quad (1)$$

Pengujian permeabilitas material porous menggunakan media air mengacu pada standar pengujian ASTM D5084. Standar pengujian ini menjelaskan metode pengukuran konduktivitas hidrolis atau permeabilitas sebuah material berongga menggunakan permeameter dinding fleksibel. Pengujian permeabilitas di industri perminyakan biasanya dilakukan terhadap spesimen core batuan reservoir yang diambil dari dalam sumur minyak bumi. Data permeabilitas batuan selanjutnya digunakan sebagai data pendukung optimisasi produksi sumur minyak bumi.

2.2. Pengujian Permeabilitas Serat Sabut Kelapa

2.2.1. Pemilahan sabut kelapa

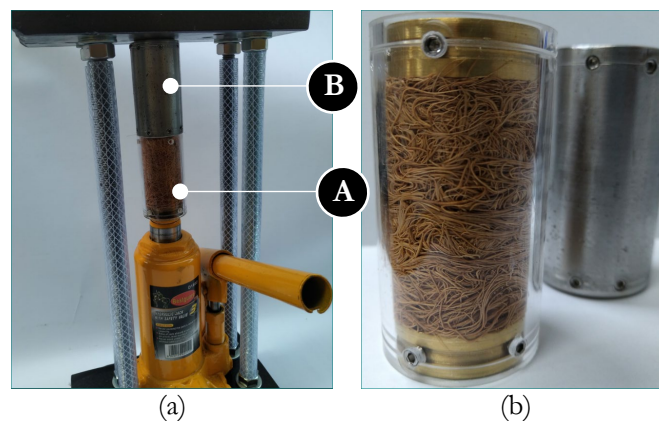
Bahan sabut kelapa sebelum diproses menjadi spesimen uji core permeabilitas, diperlukan langkah-langkah persiapan agar didapatkan spesimen uji yang baik dan seragam. Langkah pertama yang dilakukan yaitu pemilahan serat sabut kelapa yang baik, bersih & seragam serta memisahkan dari sisa-sisa kulit kelapa dan gabus yang masih menempel pada serat sabut kelapa. Pemilahan dimaksudkan agar data permeabilitas yang didapatkan selama pengukuran merupakan gambaran nilai permeabilitas serat sabut kelapa murni dan meminimalkan kemungkinan adanya pengaruh zat pengotor gabus dan kulit kelapa. Zat pengotor gabus dan kulit kelapa yang sudah dipisahkan dari serat sabut kelapa dapat dilihat pada Gambar 2 (a). Dan serat sabut kelapa yang baik terlihat seperti pada Gambar 2 (b).



Gambar 2. (a) Zat pengotor dan (b) serat sabut kelapa hasil pemilahan

2.2.2. Pembentukan core spesimen uji permeabilitas

Serat sabut kelapa yang sudah lulus proses pemilahan selanjutnya dilakukan penimbangan menggunakan neraca massa. Serat sabut kelapa ditimbang masing-masing massanya 7,5 gram, 10 gram, 15 gram, 17,5 gram dan 20 gram sebagai variasi massa serat sabut kelapa spesimen uji. Kemudian masing-masing spesimen serat sabut kelapa dimasukkan ke dalam core spesimen uji yang terbuat dari selongsong plastik akrilik & selongsong baja tahan karat. Core uji memiliki tutup yang terbuat dari kuningan berlubang pada kedua bagian sisi selongsong. Core spesimen uji memiliki dimensi ukuran diameter luar 3,8 cm, diameter dalam 3,2 cm, panjang total 7 cm dan tebal tutup kuningan masing-masing 1 cm. Alat tekan hidrolik digunakan untuk memudahkan proses pemasukan serabut kelapa ke dalam selongsong core. Detail susunan proses penekanan serabut kelapa dapat dilihat pada Gambar 3 (a). Cara penekanan serabut kelapa diawali dengan memasukkan serabut kelapa ke dalam selongsong plastik pembantu (A) dan selongsong core (B), kemudian selongsong core disusun diatas selongsong plastik pembantu. Lalu dari bagian bawah selongsong plastik pembantu ditekan dengan poros alat tekan hidrolik sehingga serabut kelapa bergerak masuk ke dalam selongsong core spesimen uji. Setelah serat sabut kelapa ditekan ke dalam selongsong core selanjutnya pada kedua tutup kuningan diikat dengan menggunakan baut tanam agar bentuk core spesimen uji permeabilitas memiliki ukuran panjang yang tetap dan seragam. Core spesimen uji permeabilitas serat sabut kelapa yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 3 (b).



Gambar 3. (a) Alat tekan dan (b) core Spesimen untuk uji permeabilitas

2.2.3. Pengujian permeabilitas

Pengujian permeabilitas serabut kelapa dilakukan di fasilitas laboratorium PT. CPI, di Duri, Riau. Peralatan yang digunakan untuk mengukur permeabilitas yaitu permeability meter AFS200. Detail gambar alat permeability meter AFS200 dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Alat uji permeability meter AFS200

Secara umum, komponen alat uji *Permeability Meter* AFS200 terdiri dari *Teledyne Isco Pump*, *Hassler Core Holder*, *Hydraulic Pump*, *Pressure Transmitter* dan *Digital Backpressure*. Detail diagram skematik alat uji *Permeability Meter* AFS200 dapat dilihat pada Gambar 5.

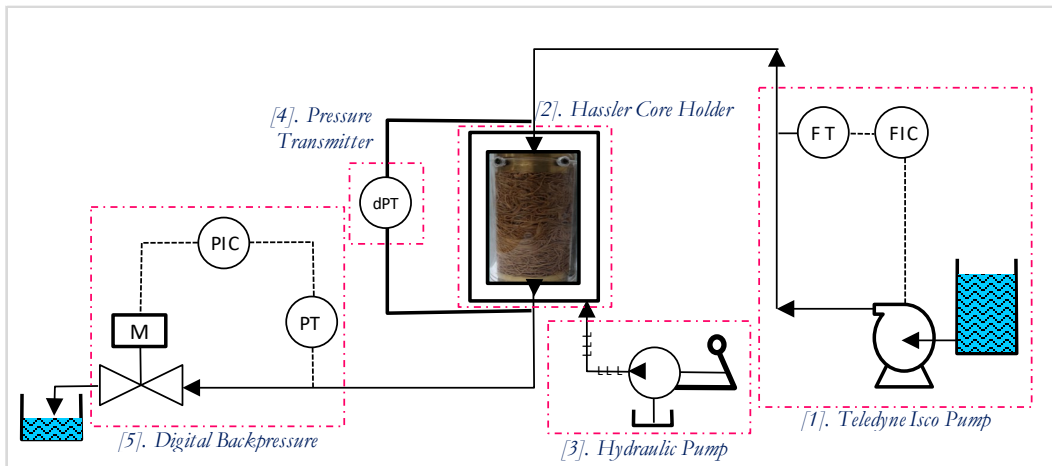
Teledyne Isco Pump 500D berfungsi untuk memompa fluida uji secara kontinyu dengan prinsip pompa piston. Alat ini memiliki spesifikasi debit aliran sebesar 0,001 – 200 ml/menit dengan akurasi 0,5% dari titik setingnya. Alat ini mampu beroperasi pada range tekanan 0 – 260 kg/cm² dengan akurasi 0,5% dari titik setingnya.

Hassler Core Holder berfungsi sebagai tempat spesimen core yang memegang spesimen uji. Alat ini memiliki spesifikasi tekanan kerja maksimal sampai 560 kg/cm² dan mampu memegang spesimen uji core dengan ukuran diameter core 2,5 – 3,8 cm dan panjang core maksimal sampai 10 cm.

Hydraulic Pump berfungsi untuk memberikan tekanan oli terhadap karet perapat di dalam *Hassler Core Holder*.

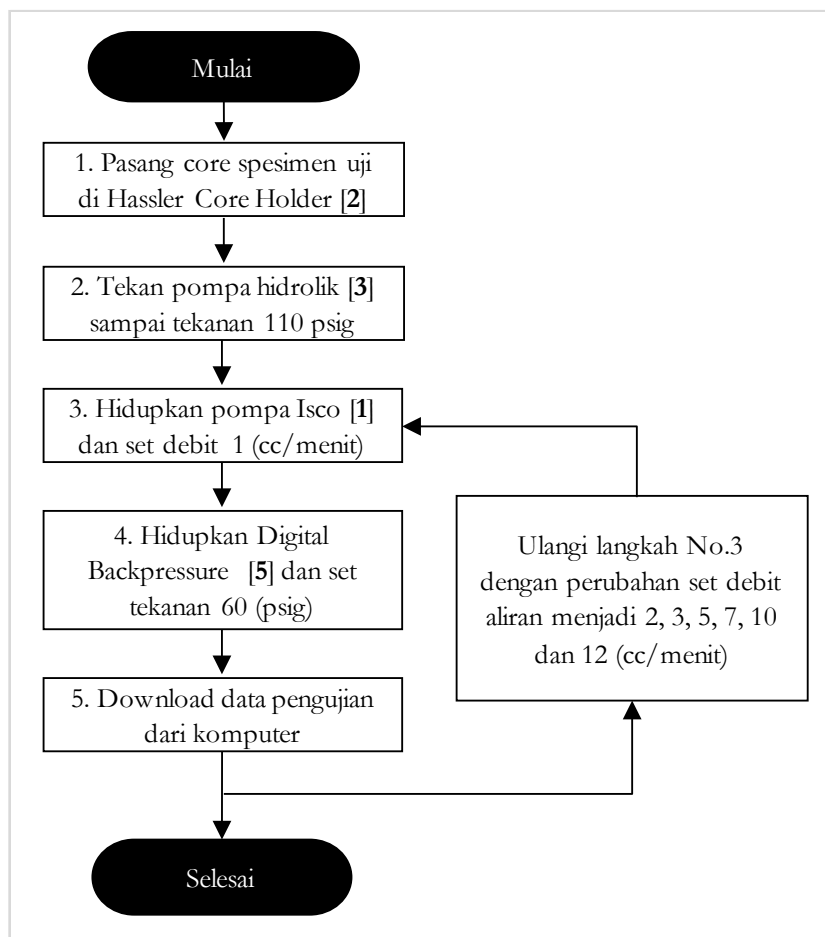
Pressure Transmitter berfungsi untuk mengukur perbedaan tekanan disisi *upstream* dan *downstream* spesimen uji. Perbedaan tekanan antara *upstream* dan *downstream* ini menunjukkan pressure drop aliran yang terjadi pada core. Nilai perbedaan tekanan tersebut digunakan dalam perhitungan nilai permeabilitas spesimen uji. Alat ini memiliki spesifikasi tekanan kerja maksimum sampai 560 kg/cm² dengan batasan perbedaan tekanan antara 7×10^{-4} – 70 kg/cm².

Digital Back Pressure berfungsi untuk mengontrol tekanan pori pada sistem dengan menggunakan kontrol elektronik motor servo. Alat ini memiliki spesifikasi tekanan kerja antara 3 – 527 kg/cm².



Gambar 5. Diagram skematik alat uji permeability meter AFS200

Langkah-langkah proses pengujian permeabilitas core dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram alir proses pengujian permeabilitas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pengujian permeabilitas core spesimen uji massa serat 7,5 – 20 gram dapat dilihat pada Tabel 1 – 5.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Massa Serat 7,5 gram

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.01	386.8
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.02	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.02	644.7
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.07	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Massa Serat 10 gram

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Massa Serat 15 gram.

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ*L/(60*A)
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.03	644.7
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.05	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.04	902.6
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.06	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.07	1289.5
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.08	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Massa Serat 17,5 gram.

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.02	257.9
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.03	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.03	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.02	386.8
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.05	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.04	644.7
7	0.9	4.83	8.2610	0.06	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.06	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.06	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.06	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.06	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.06	902.6
10	0.9	4.83	8.2610	0.08	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.08	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.08	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.08	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.09	1289.5
12	0.9	4.83	8.2610	0.1	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.11	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.11	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.1	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.09	1547.4

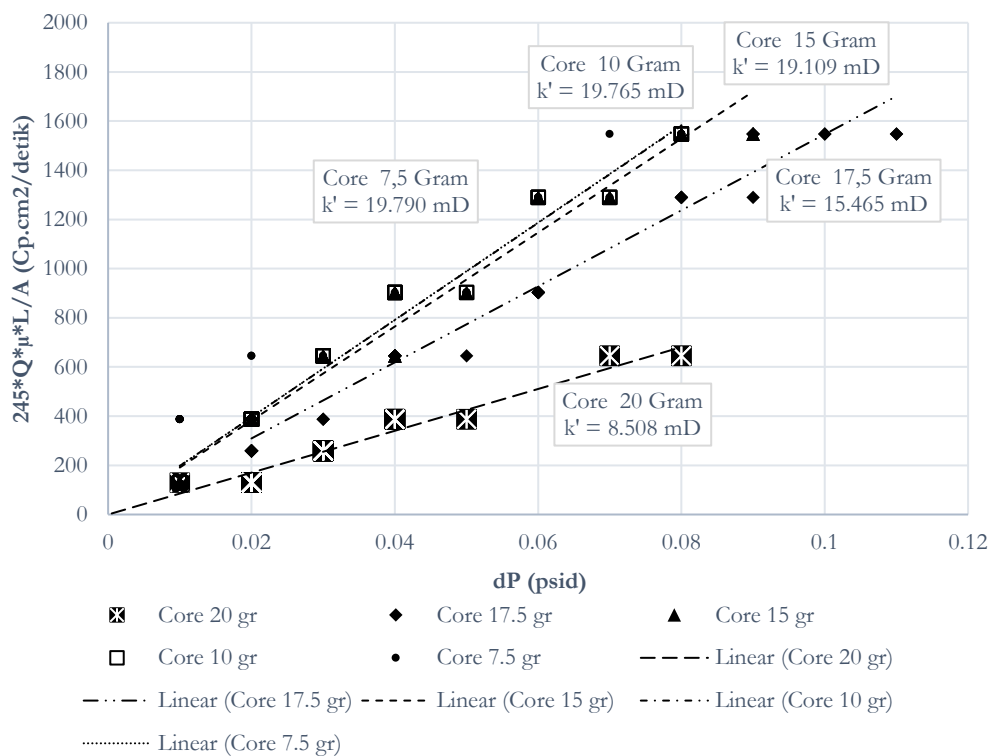
Tabel 5. Data Hasil Pengujian Massa Serat 20 gram.

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
1	0.9	4.83	8.2610	0.01	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ *L/(60*A)
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
1	0.9	4.83	8.2610	0.02	128.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
2	0.9	4.83	8.2610	0.03	257.9
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.05	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.05	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
3	0.9	4.83	8.2610	0.04	386.8
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.08	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.08	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.08	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.08	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.08	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.07	644.7
5	0.9	4.83	8.2610	0.08	644.7
7	0.9	4.83	8.2610	0.1	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.12	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.11	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.11	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.11	902.6

Debit [Q] (ml/menit)	Viskositas [μ] (cP)	Panjang [L] (cm)	Area [A] (cm ²)	dP (psid)	1000*14.7*Q* μ*L/(60*A)
7	0.9	4.83	8.2610	0.11	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.1	902.6
7	0.9	4.83	8.2610	0.11	902.6
10	0.9	4.83	8.2610	0.15	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.15	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.15	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.15	1289.5
10	0.9	4.83	8.2610	0.15	1289.5
12	0.9	4.83	8.2610	0.19	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.18	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.18	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.19	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.19	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.19	1547.4
12	0.9	4.83	8.2610	0.19	1547.4

Plot data hasil pengujian permeabilitas core serat sabut kelapa dapat dilihat pada Gambar 7.



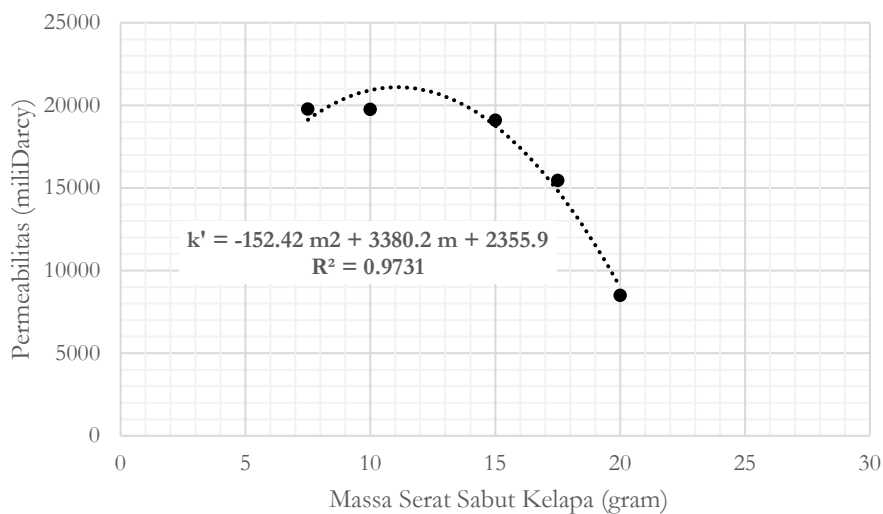
Gambar 7. Permeabilitas core sabut kelapa

Data hasil pengujian nilai permeabilitas core spesimen uji memperlihatkan bahwa untuk massa core sabut kelapa 7,5 gr, 10 gr & 15 gr memiliki nilai permeabilitas yang relatif sama. Ketiga spesimen uji tersebut memiliki nilai permeabilitas sekitar 19.000 mili Darcy ($19 \times 10^{-2} \text{ m}^2$). Specimen uji massa core sabut kelapa massa 17,5 gr nilai permeabilitasnya mulai kelihatan turun $\pm 21\%$ seiring bertambahnya massa sabut kelapa (dibandingkan nilai permeabilitas massa core spesimen uji massa 7,5 gr) menjadi sekitar 15.000 mili Darcy ($15 \times 10^{-2} \text{ m}^2$). Relasi massa core sabut kelapa dengan nilai permeabilitas semakin kelihatan pada spesimen uji dengan massa serat 20 gr dimana nilai permeabilitasnya turun hingga 57% jika dibandingkan dengan nilai permeabilitas core spesimen uji massa 7,5 gr menjadi 8.508 mili Darcy ($8,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$). Data hasil pengujian permeabilitas dari Gambar 7. kemudian dibuat tabel permeabilitas serat berdasarkan massa serat yang digunakan seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Permeabilitas Core Sabut Kelapa

Data	Massa Core Spesimen Uji (gram)	Permeabilitas (miliDarcy)
1	7,5	19.790
2	10	19.765
3	15	19.109
4	17,5	15.465
5	20	8.508

Data dari Tabel 6 kemudian diplot dalam Gambar 8. yang memperlihatkan hubungan antara data nilai permeabilitas masing-masing spesimen uji core sabut kelapa dengan massa serat sabut kelapa yang digunakan untuk membuat core spesimen uji.



Gambar 8. Relasi nilai permeabilitas dan massa core sabut kelapa

Gambar 8. menjelaskan hubungan permeabilitas & massa serat sabut kelapa yang digunakan untuk membuat core spesimen uji dengan batasan massa serat antara 7,5 – 20 gram. Dengan mengaplikasikan regresi polinomial derajat-2 pada titik-titik data, didapatkan kurva yang menyatakan bahwa massa serat sabut kelapa berpengaruh terhadap nilai permeabilitas spesimen uji dengan formulasi persamaan (2).

$$k' = -152.42 m^2 + 3380.2m + 2355.9 \quad (2)$$

Persamaan (2) menunjukkan hubungan massa serat sabut kelapa (m) yang digunakan untuk membuat spesimen core mempengaruhi nilai permeabilitas core (k') dengan batasan massa serat antara 7,5 – 20 gram. Semakin besar massa serat sabut kelapa yang digunakan untuk membuat core menyebabkan nilai permeabilitas core semakin menurun. Nilai permeabilitas core menurun seiring semakin besar massa serat sabut kelapa dapat dijelaskan korelasinya dimana saat jumlah helai serat yang digunakan bertambah dengan volume tabung core yang tetap maka jumlah ruang porous yang terbentuk di dalam core berkurang. Volume ruang porous di dalam core berkurang yang menjadi salah satu faktor penyebab turunnya nilai permeabilitas core sabut kelapa. Pernyataan ini sesuai dengan materi yang disebutkan dalam buku *Filters and Filtration Handbook* dalam sub bab *Filter Permeability* yang menyatakan bahwa ketebalan atau jumlah material filtrasi mempengaruhi nilai permeabilitas, dimana dengan adanya media filtrasi menyebabkan adanya hambatan di dalam sebuah aliran fluida (Sparks and Chase, 2016).

Berdasarkan penelitian Hodge dkk. (2002) tentang hubungan permeabilitas media filtrasi dan nilai efisiensi aliran fluida sumur minyak bumi, Spesimen uji core massa 20 gram memiliki nilai efisiensi aliran fluida sekitar 72% jika diaplikasikan sebagai filter pasir sumur minyak bumi lapangan Delta di Riau. Filter pasir memiliki perbandingan $K_{ann}/K_r > 4$ saat menggunakan massa spesimen uji core 20 gram. Core spesimen uji memiliki diameter dalam core 3,2 cm, panjang efektif core yang terisi serat 5 cm dan massa serat 20 gram memiliki densitas atau kerapatan serat sekitar 0,5 gram/cm².

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian permeabilitas serat sabut kelapa dengan variasi massa serat dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Nilai permeabilitas core sabut kelapa menurun seiring bertambahnya massa serat sabut kelapa yang digunakan untuk membuat core spesimen uji permeabilitas. Nilai permeabilitas serat dengan massa serat spesimen uji 7,5 gram memiliki nilai permeabilitas terbesar dengan nilai 19.790 miliDarcy. Nilai permeabilitas mulai menurun saat serat sabut kelapa yang digunakan untuk membuat core memiliki massa 15 gram dan dalam pengujian core dengan massa 20 gram nilai permeabilitasnya mencapai 8508 mili Darcy.
2. Nilai permeabilitas sabut kelapa menurun saat massa serat sabut kelapa yang digunakan membuat core filter bertambah disebabkan oleh densitas serat di dalam core meningkat. Hal ini dapat dijelaskan bahwa saat jumlah massa serat yang digunakan di dalam core semakin meningkat dengan volume tabung core yang tetap, maka jumlah ruang porous yang terbentuk di dalam core filter berkurang (densitas serat meningkat). Bertambahnya densitas serat di dalam core filter mengakibatkan bertambahnya hambatan yang dialami fluida saat melewati core filter tersebut. Kesimpulan ini sesuai dengan materi yang disebutkan dalam buku "*Filters & Filtration Handbook*" dalam sub bab "*Filter Permeability*" yang menyatakan bahwa ketebalan atau jumlah media filtrasi mempengaruhi nilai permeabilitas sebuah filter, media filtrasi menyebabkan adanya tambahan hambatan di dalam sebuah aliran fluida (Sparks and Chase, 2016).
3. Filter pasir dengan media filtrasi serat sabut kelapa yang memiliki kerapatan serat 0,5 gram/cm² apabila diaplikasikan pada sumur minyak lapangan Delta di Riau akan mampu menghasilkan efisiensi aliran fluida sekitar 72% berdasarkan data hubungan nilai permeabilitas reservoir lapangan Delta dan nilai permeabilitas media filtrasi yang disebutkan dalam penelitian Hodge dkk. (2002).
4. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk menguji nilai permeabilitas sabut kelapa dengan variasi massa sabut kelapa yang lebih besar untuk mengetahui massa sabut kelapa yang menghasilkan nilai permeabilitas lebih beragam.
5. Perlu dilakukan penelitian lanjutan juga untuk menguji efektivitas filtrasi sabut kelapa berdasarkan variasi ukuran diameter butiran pasir didalam fluida agar bisa diketahui hubungan nilai permeabilitas sabut kelapa terhadap efektivitas filtrasi berdasarkan variasi ukuran diameter butiran pasir.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Djarmiko B., Raharja S., dan Iskandar A., 1990, *Pra Studi Kelayakan Komoditi*, Semarang.
- Hodge R. M., Burton R. C., Constein V., and Skidmore V., 2002, An Evaluation Method for Screen-Only and Gravel-Pack Completions, *SPE-73772*.
- Lay, A. dan Pasang P. M., 2003, Alat penyerat sabut kelapa tipe balitka, *Prosiding Konferensi Nasional Kelapa V*, Riau.
- Pratama I. M. R., Sulhadi, Aji M. P., 2016, Pemanfaatan Serabut Cocos Nucifera Sebagai Filter Air Limbah Pewarna tekstil, *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXX HFI Jateng & DIY*, Salatiga.
- Sparks, T., and Chase, G., 2016, *Filter & Filtration Handbook*, Edisi Ketujuh, Butterworth-Heinemann, Inggris.
- Utomo K. P., Pramadita S., and Saziati A., 2018, Coco Fiber Sebagai Filter Limbah Cair Rumah makan Cepat Saji, *Jurnal Teknologi Lingkungan Laban Basah*, Vol.01, No.2, 2018: 030-039
- Wahyuningrum A., Wardoyo A. Y. P., dan Darmawan H. A., 2014, *Sistem Filtering Berbahan Serabut Kelapa Untuk Emisi Partikulat PM 2,5 (Particulate Matter 2,5) dari Sepeda Motor*, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya, Malang.
- Marketwatch, 2019. <https://www.marketwatch.com/press-release/coir-market-growth-opportunities-analysis-of-sales-unit-and-share-by-players-and-forecast-to-2025-2019-05-14>, (online accessed 16 Agustus 2019).
- Worldatlas, 2019. The World Leaders in Coconut Production. <https://www.worldatlas.com/articles/the-world-leaders-in-coconut-production.html>, (online accessed 18 Agustus 2019).

Preliminary Design of Electric Linear Actuator for Hospital Bed Domestic Product

S. Hermawan^{1,*} and H.S.B. Rochardjo²

¹Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan. Jl. Pahlawan No. 10 Gejlig Kajen Pekalongan Jawa Tengah Indonesia 51161

²Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2, Yogyakarta Indonesia 55281

E-mail: setiyohermawan0306@gmail.com

Abstract

Nowadays, the need for linear actuator as a component of a hospital bed is increasing due to the growing needs of electric bed. The function of this component is to adjust the form of the bed for the patient's comfort. However, the producers of the local hospital bed mostly rely on foreign products. To reduce the production cost, an effort was made to design a low cost yet functional electric linear actuator. The actuator using basic components, consists of a DC motor, transmission, and screw mechanism. Stainless steel pipe with outer diameter of 26 mm was used for the body of the actuator. The performance of the actuator was tested by applying gradual loading with variations on the stroke. It was shown that the the actuator works well in varying loads from 0 to 150 kg with varying stroke from 0 to 19 cm.

Keywords : Hospital bed, electric linear actuator, screw mechanism.

Abstrak

Saat ini kebutuhan akan linier aktuator sebagai salah satu komponen tempat tidur rumah sakit semakin meningkat, seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan tempat tidur tipe elektrik. Fungsi dari linier aktuator ini adalah untuk mengatur tinggi rendahnya posisi tempat tidur dengan maksud agar pasien merasa nyaman. Namun, produsen tempat tidur rumah sakit skala lokal, sebagian besar komponen linear aktuatornya masih mengandalkan produk luar negeri. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka untuk menekan biaya produksi, dilakukanlah perancangan linier aktuator tipe elektrik berbiaya rendah. Aktuator menggunakan komponen yang terdiri dari motor DC, transmisi, dan mekanisme sekrup. Pada komponen pipa, digunakan pipa stainless steel dengan diameter luar 26 mm. Performa aktuator diuji dengan menerapkan pembebanan bertahap dengan variasi panjang langkah selama pembebanan. Telah ditunjukkan bahwa aktuator bekerja dengan baik pada beban yang bervariasi dari 0 hingga 150 kg dengan variasi langkah dari 0 hingga 19 cm.

Kata kunci : tempat tidur rumah sakit, linier aktuator elektrik, mekanisme sekrup.

1. INTRODUCTION

The need for hospital beds is increasing from year to year (Lolita et al, 2020). The increase occurred more in the non-VIP class. This condition tend also to increase the need of linear actuator. The linear actuator is a part of the hospital bed that changes the shape of the bed to get a comfortable position for the patient. This component still needs to be imported. The production capacity of local industries needs to be increased by using as many local products as possible.

Linear actuator is a component that can extend and retract linearly. For centuries actuators like this use hydraulic power. However, the use of hydraulic power on the hospital bed will make noise, heavy and expensive. On the other hand, the use of an electric actuator will be quiet, light and inexpensive as well as easy to control, and can stop at the desired position.

Today there are many linear actuator design innovations that have been carried out. For example, Khidir (2004) made a linear actuator with Shape Memory Alloy material. This actuator is only for small loads and small strokes. Enrici et al. (2016) made linear actuator design for the aeronautic application. The actuator was designed to replace pneumatic or hydraulic devices that function as cylinder. The weaknesses of this special actuators are complex manufacturing design but with the existing technological advances such as mechanics and microelectronics. The innovation can be upgraded to reach more functional in control system such as increasing the ability to positioning in accurate position (Peng, 2015).

This paper reports the design, manufacture and testing of an electric linear actuators using DC motors, transmissions, and screw mechanisms for use in hospital beds.

2. METHODOLOGY

Collecting data needed for design calculation in the research of data on the DC electric motor which included RPM motors, power needed, materials used on the upper arm pipe and determining calculations for elections diameter upper arm pipe, bearing type used to support the load of screw.

Design based on the load received by the linear actuator primarily on the upper arm pipe section and calculated the torque required by the motor to up and down the power of bearing, buckling on the screw and so on. after the calculation process completed, the next step is to draw a design using notebook installed the autodesk software inventor 2015.

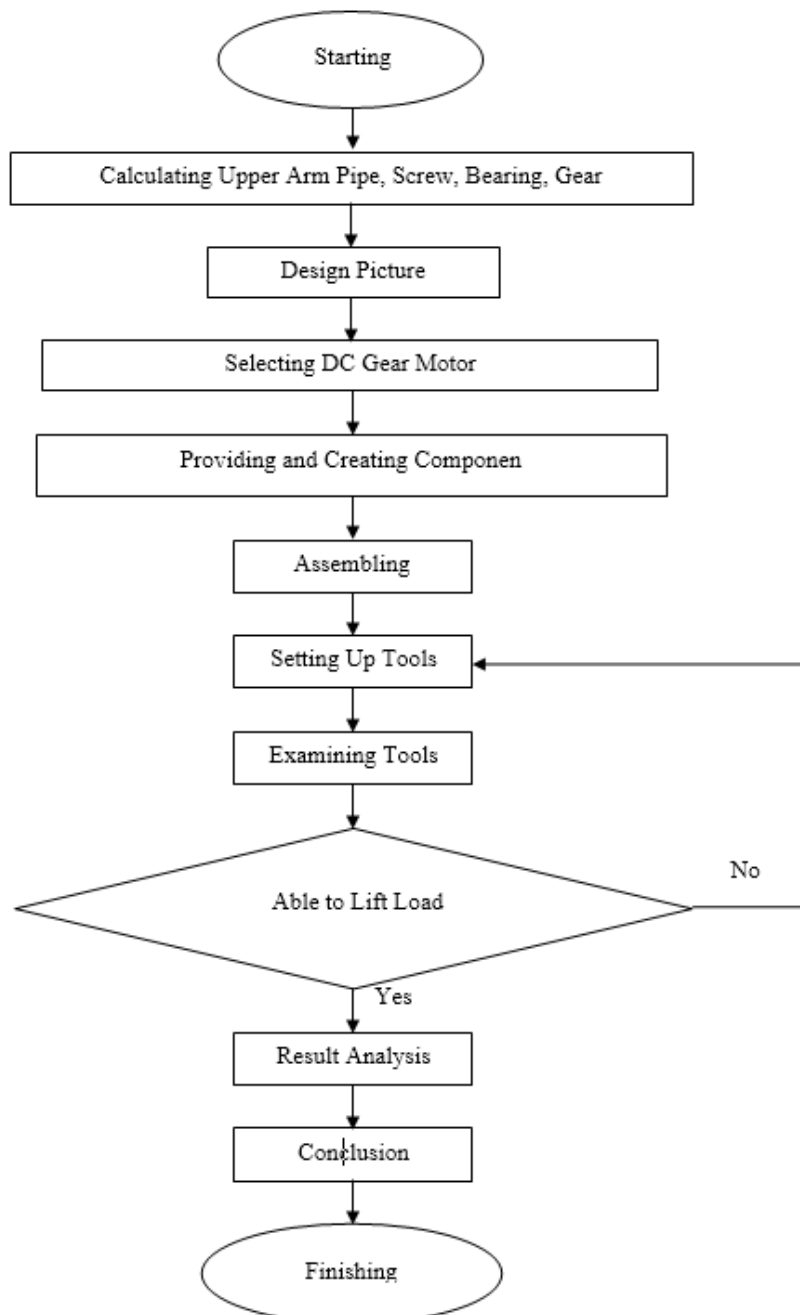


Figure 1. Flowchart

First of all is starting early process research. The next step is calculating the power and the diameter of the upper arm pipe. Counting the length and type of the screw, gears and also counting the power of bearing which support load on the screw. Then selecting the motor used. There are several types of motors, such as AC motor, motor stepper or DC. AC motor is electric motor works as alternating current. While stepper motor is a motor handled by microcontroller. The voltage on microcontroller is usually only 5 volt, therefore it needs other component to supply current on stepper motor. Dc motor is direct current, it is appropriate for this research as motor drive. The raise and fall of the actuator shaft, not as fast as the turn of the motor, therefore it is used DC type gear motor in order to reduce the spin. In selecting motor, RPM and torque are concerned. It refers to the previous calculation which is the torque needed to screw and so on, because the motor function is rolling the transmittion which drive the up and down power to lift the load. If the choosen motor doesn't work, we recheck the calculation.

The next step is providing the materials used and then designing work picture by using autodesk inventor 2015 software from electric linear actuator made. After that assembling the support component of electric linear actuator. Then setting up for the tools to prepare object test.

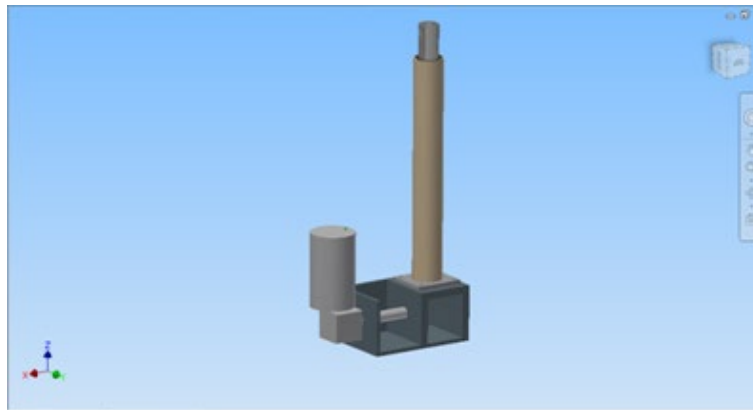


Figure 2. Electric linear actuator design

3. RESULT AND DISCUSSION

In this chapter there are some calculations on electric linear actuator design. Such as calculation on diameter upper arm, bearing power and screw. Power screw used in this design is lead screw type because it has self-locking character. Calculating the diameter upper arm pipe to the certain load (P) = 6500 N, upper arm length (L) = 300 mm, safety factor = 5.

The material used is stainless steel pipe with value of Yield Strength = 170 MPa. A material said yield when the stressed reach a critical value known as Yield Strength. The safe limit for the voltage is the Yield value strength is divided by safety number, so that:

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{\sigma_y}{sf} \\ &= \frac{170 \text{ MPa}}{5} = 34 \text{ Mpa}\end{aligned}\quad (1)$$

Pipes used for safe design are pipes that have a stress value below 34 MPa.

$$\begin{aligned}A &= \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4} = 0.785(d_2^2 - d_1^2) \\ A &= 0.785(26.67^2 - 20^2) \\ &= 0.785(311.28) \\ &= 244.47 \text{ mm}^2\end{aligned}\quad (2)$$

The upper arm diameter used is a pipe with an inner diameter of 20 mm and an outer diameter of 26.67 mm. The pressure acting on the bearing (P_b) is calculated using the formula:

$$P_b = \frac{P}{2\pi n_a r_m h} \quad (3)$$

$$P_b = \frac{6500 \text{ N}}{(2)(3.14)(17.5)(1.5\text{mm})(1\text{mm})} = \frac{6500\text{N}}{164.8\text{mm}} = \mathbf{39.42 \text{ Nmm}^{-2}}$$

Safe load on the bearing

$$W = P_b d_b l_b \tag{4}$$

$$W = (39.42)(15)(11) = \mathbf{6504 \text{ N}}$$

The calculating on the screw can be seen in the caption below. Figure 3 shows a scroll mechanism that has the function of raising and falling load by spinning nut. If one thread we draw, then the result is as shown in figure 4 that shows the section of the scroll and the forces that work on raising and falling load.

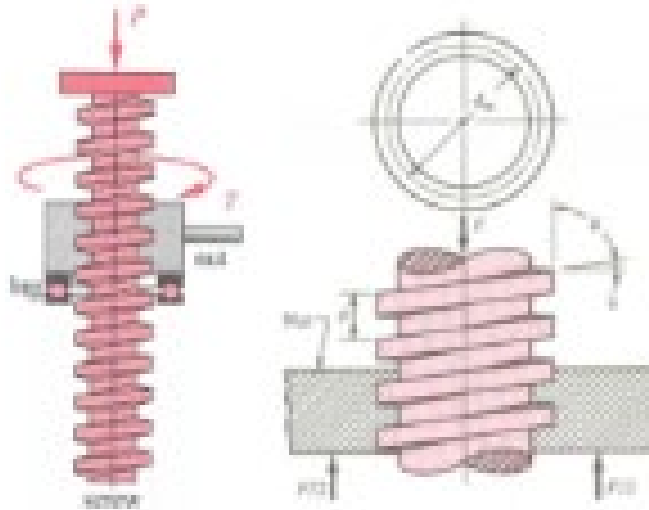


Figure 3. The Power Mechanism

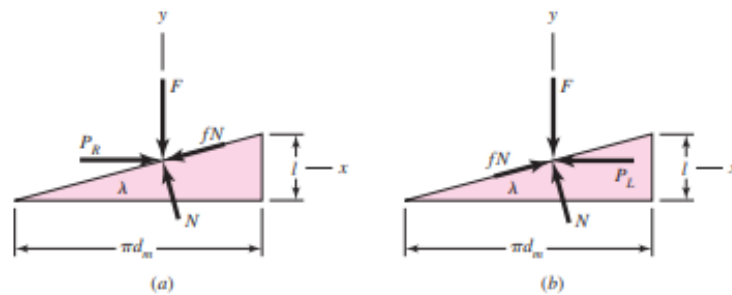


Figure 4. Force diagrams raising and falling load.

$$T_R = \frac{(6.5)(12)}{2} \left(\frac{4 + (3.14)(0.11)(12)}{3.14(12) - 0.11(4)} \right) + \frac{(6.5)(0.11)(12.5)}{2}$$

$$= 39 \left(\frac{4 + 4.14}{37.7 - 0.44} \right) + 4.46$$

$$= 39 \left(\frac{8.14}{37.26} \right) + 4.46 = \mathbf{12.98 \text{ Nm}}$$

$$T_L = \frac{(6.5)(12)}{2} \left(\frac{3.14(0.11)(12) - 4}{3.14(12) + 0.11(4)} \right) + \frac{(6.5)(0.11)(12.5)}{2}$$

$$= 39 \left(\frac{4.14 - 4}{37.7 + 0.44} \right) + 4.46$$

$$= 39 \left(\frac{0.14}{38.14} \right) + 4.46 = \mathbf{4.60 \text{ Nm}}$$

$$P_{\text{screw}} = \frac{nT}{9545} \text{ (kW)} \tag{5}$$

$$\text{Speed rate screw } (V_s) = 2 \text{ mm/s} \tag{6}$$

$$n = \frac{\text{speed rate}}{\text{pitch}} \quad n = \frac{2\text{mm/s}}{2\text{mm}} = \frac{1\text{put}}{\text{s}} = \frac{60\text{put}}{\text{menit}} \quad Z \tag{7}$$

$$P_{\text{screw}} = \frac{60(12.98)}{9545} = 0.0081 \text{ kW} = \mathbf{81 \text{ Watt}}$$

$$i = \frac{\text{Motor rotation (N)}}{\text{Screw rotation (n)}} \tag{8}$$

$$i = \frac{92 \text{ rpm}}{60 \text{ rpm}} = 1.52 \sim 1.5$$

$$\text{Input} = 1.5 \text{ Output} = 1$$

Self locking on power screw concern on the condition where the screw can't spin when no axle style is given on nut. It is very usefull because self locking is keep on the position when support the load. The power screw stays in its place when it holds the load. A screw will lock itself (self locking) when fulfilling the following equation

$$\pi f d_m > 1 \tag{9}$$

$$3.14 (0.11)12 > 4$$

$$4.14 > 4$$

The results of the research tests appear to be shown at table 1 and table 2. The given load to the electric linear actuator, is gradually ranging from light loads to heavy ones. At the same power and speed of the motor, it shows the test of the upper stroke arm the linear actuator gets bigger. Then it would take more and more time to travel, according to the formula. The greater the lending, the greater the P would be. It showsThe time of passage is directly proportional to the size of the power.

Table 1. Result at Stroke Length 15 cm

No	Load (kg)	Stroke length (m)	Time (s)	P
1	15	0.15	19.3	4.694 x 10 ⁻⁵
2	20	0.15	20.7	5.073 x 10 ⁻⁵
3	40	0.15	25.0	5.076 x 10 ⁻⁵
4	44	0.15	25.9	5.698 x 10 ⁻⁵
5	48	0.15	26.6	5.738 x 10 ⁻⁵
6	50	0.15	26.9	5.779 x 10 ⁻⁵
7	60	0.15	28.5	5.831 x 10 ⁻⁵
8	70	0.15	29.8	5.951 x 10 ⁻⁵
9	76	0.15	30.6	5.968 x 10 ⁻⁵
10	100	0.15	33.5	5.984 x 10 ⁻⁵
11	115	0.15	35.0	6.034 x 10 ⁻⁵
12	131	0.15	36.5	6.061 x 10 ⁻⁵
13	136	0.15	36.9	6.090 x 10 ⁻⁵
14	143	0.15	37.5	6.101 x 10 ⁻⁵
15	150	0.15	38.1	6.102 x 10 ⁻⁵

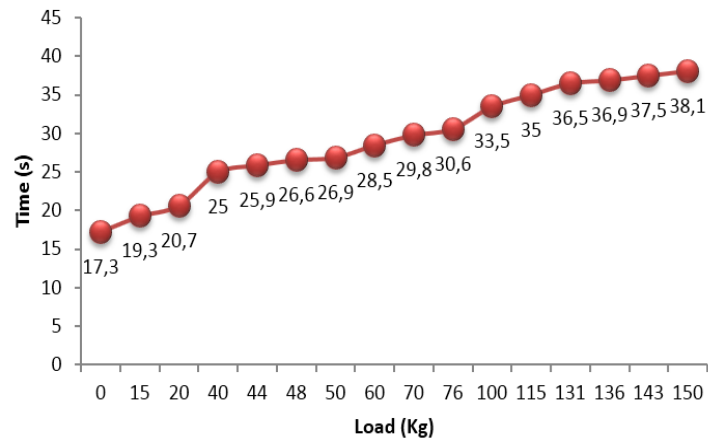


Figure 5. Chart of test results at stroke of 15 cm

Table 2. Results at Stroke Length 19 cm

No	Load (kg)	Stroke length (m)	Time (s)	P
1	15	0.19	24.1	3.054×10^{-5}
2	20	0.19	26.0	3.243×10^{-5}
3	40	0.19	32.1	3.446×10^{-5}
4	44	0.19	33.0	3.489×10^{-5}
5	48	0.19	33.9	3.511×10^{-5}
6	50	0.19	34.3	3.531×10^{-5}
7	60	0.19	36.4	3.545×10^{-5}
8	70	0.19	38.3	3.550×10^{-5}
9	76	0.19	39.3	3.568×10^{-5}
10	100	0.19	43.0	3.584×10^{-5}
11	115	0.19	45.0	3.596×10^{-5}
12	131	0.19	46.9	3.619×10^{-5}
13	136	0.19	60.1	1.783×10^{-5}
14	143	0.19	60.2	1.868×10^{-5}
15	150	0.19	60.4	1.933×10^{-4}

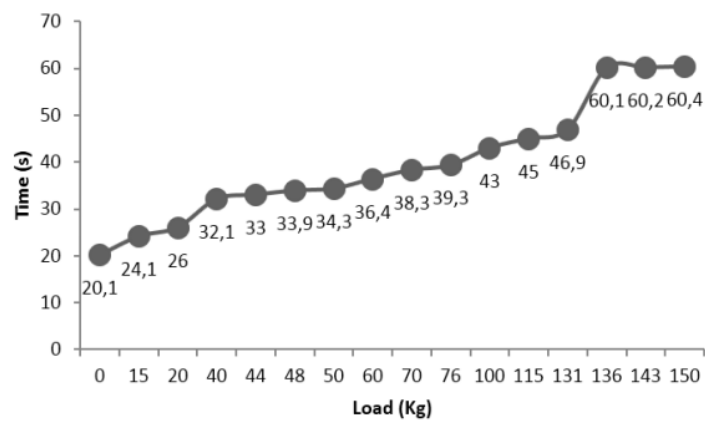


Figure 6. Chart of test results at stroke of 19 cm

4. CONCLUSION

Based on the results of calculations and test tools, it can be concluded that the electric linear actuator design is in accordance with the calculations to be applied to hospital beds.

Testing the tool by giving loading gradually on the electric linear actuator, the results obtained are directly proportional to the load and travel time. The greater the load given, the longer the travel time required to perform the push step.

5. REFERENCES

- Budynas, R.G., and Nisbett, J.K., 2011, "Shigley's Mechanical Engineering Design Ninth Edition.", Mc Graw Hill, New York.
- Dacapo Stainless, 2018 "Nominal Pipe Sizes, Pipe Dimensions, Imperial/Metric Pipe Chart", Netherland.
- Enrici, P., Dumas, F., Ziegler, N., and Matt, D., 2016, "Design of a High – Performance Multi – Air Gap Linear Actuator for Aeronautical Applications", Volume 31 No. 3, IEEE Transactions on Energy Conversion.
- Kemenperin, 2009, Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 49/M-IND/PER/5/2009, tentang "Pedoman Penggunaan Produk Dalam Negeri dalam Pengadaan Barang dan Jasa Pemerintah.", Jakarta.
- Kharagpur, 2015, "Module 6 Power Screw – Lesson 1 Power Screw Drives and Their Efficiency", India.
- Khidr, EA., Mohamed, NA., Nor, MJM., and Mustafa, MM., 2007, "A New Concept of a Linear Smart Actuator", Sensor and Actuators, A 135, 244 – 249, Elsevier.
- Kohara Gear Industry, 2015, "Katalog Steel Bevel Gears Modul 1 – 8", Nakacho Kawaguchi-shi Saitama-ken Japan.
- Lolita, Sella, Nurhayati, and Kusworini, Dyah, (2017), Analisis Kebutuhan Tempat Tidur Tiap Kelas di Unit Rawat Inap Rumah Sakit Djatiroto Kabupaten Lumajang, Artikel Ilmiah Hasil Penelitian Mahasiswa, Universitas Jember
- Paramount Bed Indonesia, 2018, "Produk Rumah Sakit ICU Bed PA-66250DX", Jakarta.
- Peng Y., Cao, Jie, Guo Zhao and Yu Haoyong (2015), A linear actuator for precision positioning of dual objects, Smart Materials and Structures 24(12):125039
- Yunus, A.D., 2010, "Diktat Mekanika Kekuatan Material", Program Studi Teknik Mesin, Universitas Darma Persada, Jakarta.

Simulasi Numerik Pengaruh Jumlah *Fuel Injector* dan Dimensi Lubang Liner Ruang Bakar Turbojet 200 N

A. Syarifudin* dan M.A. Bramantya

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: anwar.syarifudin@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Ruang bakar merupakan salah satu komponen terpenting dalam turbojet karena menentukan gaya dorong turbojet. Tantangan pada turbojet kecil adalah menghasilkan pembakaran sempurna pada ruang yang terbatas. Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh jumlah fuel injector dan lubang liner terhadap temperatur gas dan sisa CO pada outlet ruang bakar turbojet 200 N. Desain ruang bakar yang digunakan adalah *reverse flow annular combustion chamber*. Metode penelitian ini menggunakan permodelan pembakaran *non premixed* dan model turbulensi k- ϵ dengan solver ANSYS Fluent yang memvariasikan jumlah fuel injector dan diameter lubang liner. Model yang akan disimulasikan memiliki 4 buah *boundary condition*. Batas *Inlet-Fuel* dengan masukan laju alir kerosin ($C_{12}H_{23}$) 0.0076 kg/s dan temperatur 293 K. Inlet udara dengan input laju alir udara masuk 0,53kg/s, temperatur udara masuk 407K, batas *combustor-wall* diasumsikan adiabatik. Batas outlet dengan inputan tekanan 1 atmosfer. Dalam studi ini didapatkan hasil jumlah fuel injector yang optimal berjumlah 8 buah dan penambahan diameter lubang dilution liner akan meningkatkan temperatur dan sisa CO yang tidak terbakar pada outlet. Dapat disimpulkan jumlah fuel injector dan dimensi lubang liner berpengaruh pada kinerja ruang bakar yang selanjutnya pada gaya dorong turbojet.

Kata kunci : turbojet, 200 N, CFD, ruang bakar, dan fuel injector.

Abstract

Combustion chamber is one of the most important components in a turbojet because it determines the thrust of the turbojet. The challenge of turbojets is how to produce complete combustion in a limited space. This research studies the effect of fuel injectors and liner holes on gas temperature and CO residual at the combustion chamber outlet of 200 N turbojet. Design of this combustion chamber is a reverse flow annular type. This research method uses non-premixed combustion modeling and k- ϵ turbulence model with ANSYS Fluent solver that varies the number of fuel injectors and the diameter of the liner holes. The model to be simulated has 4 boundary conditions. Inlet-Fuel boundary with kerosene flow rate ($C_{12}H_{23}$) 0.0076 kg/s and temperature is 293 K as an input. Inlet air with an input is air flow rate 0.53 kg/s, intake air temperature is 407K, Combustor-wall boundary is assumed to be adiabatic. Outlet boundary with input pressure of 1 atmosphere. In this study, the optimal number of injectors is 8 and the addition of the diameter of the dilution liner holes would increase the temperature and the remaining unburned CO at the outlet. It can be concluded that the number of fuel injectors and the dimensions of the liner holes have an effect on the performance of the combustion chamber which in turn affects the turbojet thrust.

Keywords : turbojet, 200 N, CFD, combustion chamber, and fuel injector

1. PENDAHULUAN

Penggunaan turbin gas kecil meningkat menjadi teknologi populer baik pada lapangan penyedia listrik skala kecil, *auxiliary power unit*, maupun pada dunia penerbangan. Wahana tanpa awak atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menggunakannya sebagai tenaga pendorong dalam berbagai misi seperti untuk keamanan nasional, telekomunikasi, pengintaian dalam dunia militer, pengindraan jauh, dan memantau pertanian maupun pemilu (Oppong, 2015). Penggunaannya cocok untuk aplikasi tersebut karena tingginya rasio antara tenaga yang dihasilkan dibandingkan beratnya yang ringan.

Pada turbojet kecil yang menjadi permasalahan adalah bagaimana agar terjadi pembakaran sempurna pada ruang bakar yang terbatas ukurannya. Pembakaran yang tidak sempurna mengakibatkan turbojet tidak dapat menghasilkan gaya dorong yang diinginkan. Pada ruang bakar indikator utama adalah temperature gas pada outlet. Temperatur yang terlalu tinggi berbahaya bagi bagian hilir yaitu sudu-sudu turbin. Temperatur yang rendah

mengakibatkan gaya dorong yang rendah. Pembakaran yang tidak sempurna akan menghasilkan sisa CO yang tidak terbakar pada bagian outlet. Jadi, sisa CO dan temperatur outlet dapat menjadi parameter yang menentukan kinerja ruang bakar.

Ruang bakar yang menjadi objek penelitian ini bertipe *annular*. Menurut Marka, dkk (2016) kelebihan tipe *annular* adalah pembakaran lebih seragam, ukuran lebih kecil (oleh karena itu lebih ringan), dan lebih sedikit luas area permukaannya. Hal ini menyebabkan ruang bakar tipe *annular* banyak digunakan pada turbojet kecil. Ruang bakar terbagi menjadi 3 zona yaitu primer, sekunder, dan *dilution* (pembilasan). Zona primer merupakan tempat terjadinya pembakaran campuran kaya udara dan kerosin. Sebagian udara mengalir melalui lubang-lubang zona sekunder untuk menyempurnakan pembakaran. Zona *dilution* dimana sebagian besar udara masuk ke zona ini berguna untuk mendinginkan gas hasil pembakaran agar temperaturnya tidak melebihi kemampuan material sudu-sudu turbin dan nosel.

Benini, dkk (2007) melakukan penelitian yang meliputi desain, manufaktur dan operasi untuk mengembangkan turbojet dengan *static thrust* 200 N yang digunakan untuk pendidikan dan penelitian. Desainnya menggunakan kompresor sentrifugal 1 tingkat dengan rasio kompresi 2,66 pada 60.000 rpm, ruang bakar *annular direct-flow*, dan turbin aksial 1 stage dengan temperatur masuk turbin sekitar 950 K. Ditemukan permasalahan yang berkaitan dengan pembakaran terutama kestabilan *flame* di mana harus melibatkan desain ruang bakar yang akurat dan set-up resirkulasi yang efisien di dalam zona primer ruang bakar. Hal ini dikarenakan desain ruang bakar pada gas turbin kecil merupakan tantangan tersendiri.

Chaudari, dkk (2012) melakukan desain ruang bakar annular dengan bahan bakar kerosin dan simulasi CFD Ansys CFX untuk mencari distribusi temperatur di pusat liner, dinding liner, dan exit (bagian keluar) ruang bakar. Analisa menggunakan model k- ϵ dan ditargetkan untuk menganalisis pola aliran di dalam liner pembakaran dan melalui bermacam lubang laluan udara yaitu *primary zone*, *dilution zone*, dan pendinginan dinding. Selanjutnya dilakukan studi terhadap distribusi temperatur dalam liner dan pada dinding dan kualitas temperatur pada tempat keluar ruang bakar. Simulasi CFD oleh Chaudari menunjukkan kecepatan gas yang tinggi terjadi di daerah dinding liner ruang bakar. Hal ini mengakibatkan *pressure drop* pada lubang untuk dinding pendingin meningkat sehingga perlu dilakukan desain ulang pada lubang tersebut. Juga berpengaruh terhadap *mass flow rate* yang dihitung dengan CFD lebih sedikit dibanding dengan desain yang mengakibatkan temperatur dinding liner lebih tinggi. Kurang banyaknya lubang pada *primary zone* juga mengakibatkan tidak terdistribusinya udara secara seragam sehingga pembakaran kerosin kurang sempurna.

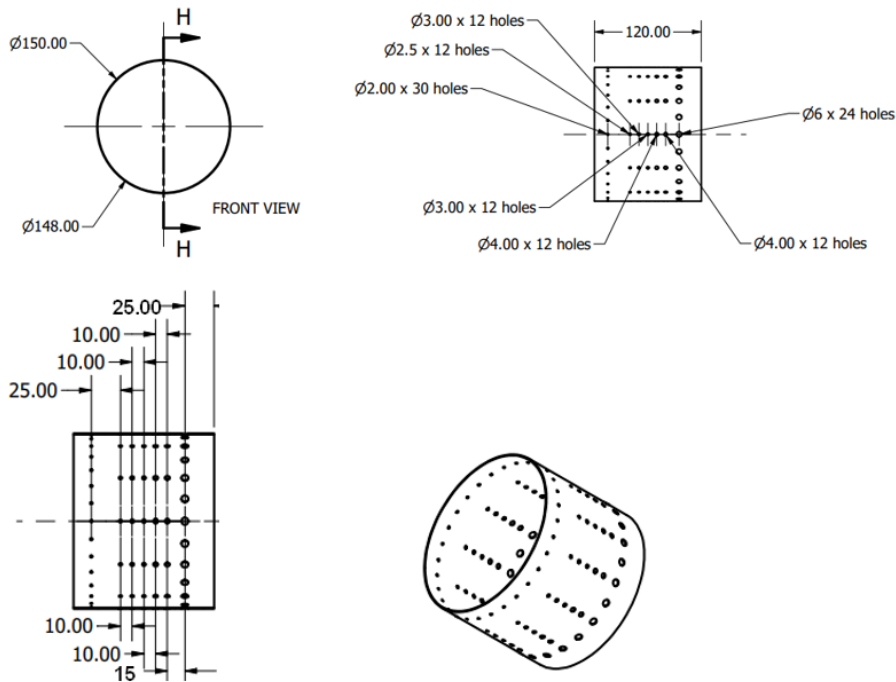
Hartono F, (2013) melakukan penelitian karakteristik aliran udara di dalam ruang bakar dengan permasalahan terjadinya pembakaran di luar nosel pada mesin turbojet kecil 500 N. metode penelitian menggunakan simulasi CFD menggunakan model 3D pada kondisi dingin, *steady state*, dan kerapatan udara dianggap konstan. Simulasi ruang bakar dengan menggunakan CFD menemukan fenomena di mana campuran bahan bakar dan udara terlalu kaya pada zona primer dan sekunder. Kondisi tersebut menyebabkan bahan bakar masih banyak yang belum terbakar di zona primer lalu mengalir ke zona sekunder. Sedangkan udara yang masuk melalui lubang-lubang liner pada zona sekunder hanya 17,8 % padahal yang dibutuhkan sekitar 29 % Sedangkan sebagian besar udara masuk ke zona terakhir (zona dilusi) ditambah dengan sisa bahan bakar yang tidak terbakar di zona-zona sebelumnya sehingga terjadi pembakaran di zona terakhir sehingga nyala api ikut keluar nosel.

Dari studi literatur didapat permasalahan pada pembakaran yang dipengaruhi oleh injeksi bahan bakar dan lubang-lubang liner. Mengatasi permasalahan pembakaran, distribusi temperatur, dan suplai bahan bakar membutuhkan pengujian eksperimen mahal dengan banyak iterasi. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menjadi alat yang dapat diandalkan karena mempunyai kemampuan untuk menerangkan fisik aliran di dalam ruang bakar. Medan aliran di dalam ruang bakar yang dihasilkan oleh temperatur tinggi, tekanan, dan laju alir dapat dimodelkan sehingga dapat digunakan untuk memprediksi unjuk kerja turbojet. Setidaknya ada 4 fenomena fisik yang akan dimodelkan pada proses pembakaran *non-premixed* yaitu aliran, *turbulent mixing*, transfer panas, dan reaksi kimia. Dalam studi ini dilakukan analisa pengaruh jumlah fuel injector dan dimensi lubang-lubang dilution liner terhadap kesempurnaan pembakaran yang ditandai oleh parameter sisa CO dan temperatur outlet ruang bakar.

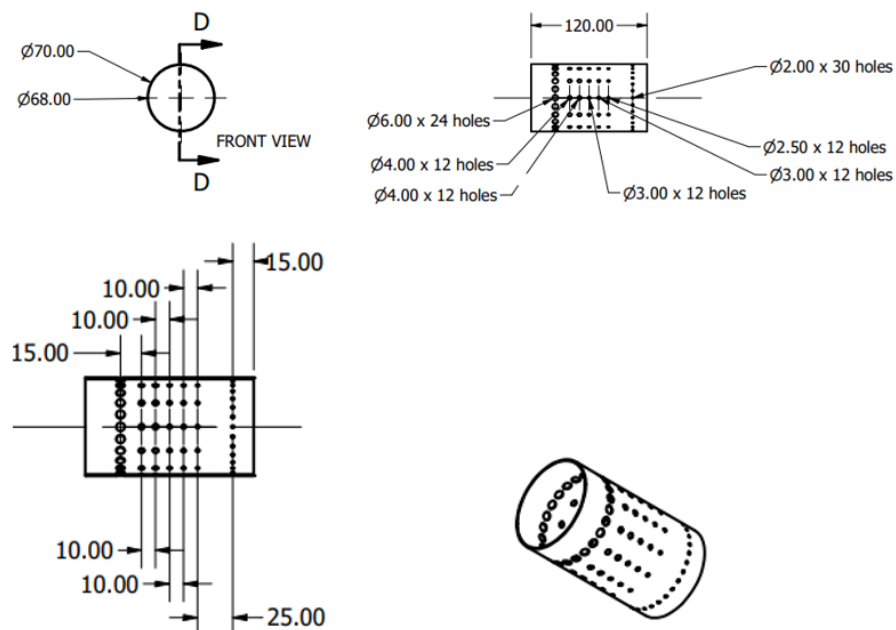
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan solver ANSYS Fluent 18.2. Pada simulasi ini akan dimodelkan proses pembakaran *non-premixed* pada ruang bakar dengan variasi jumlah fuel injector dan ukuran lubang *dilution*. Variabel input pada model ruang bakar terdiri dari laju alir udara, laju alir bahan bakar, temperatur udara masuk, dan temperatur bahan bakar masuk. Keempat variabel tersebut diinputkan pada varian ruang bakar dengan nilai sama. Setelah simulasi dijalankan, akan dibandingkan suhu keluar dan produk reaksinya masing-masing varian pada outlet ruang bakar.

Proses simulasi CFD terbagi menjadi 4 tahap : pembuatan model geometri, pembuatan *mesh*, konfigurasi model, dan *post-processing*. Selanjutnya model ruang bakar dimodifikasi hingga membentuk *domain* fluida.

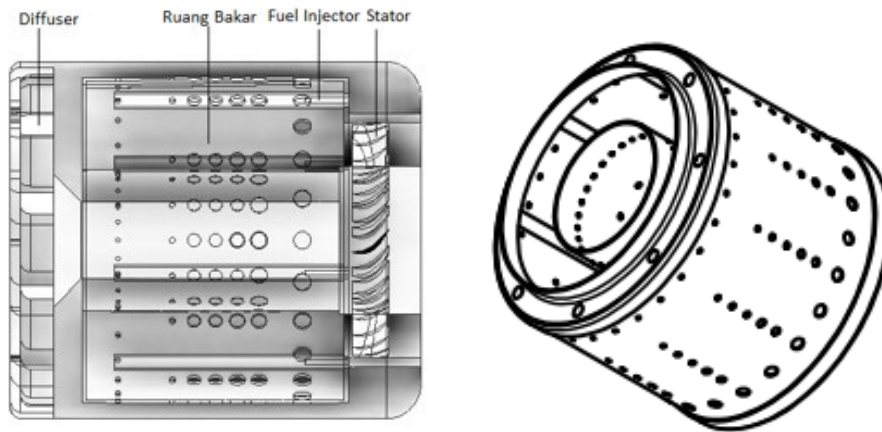


Gambar 1. Liner luar



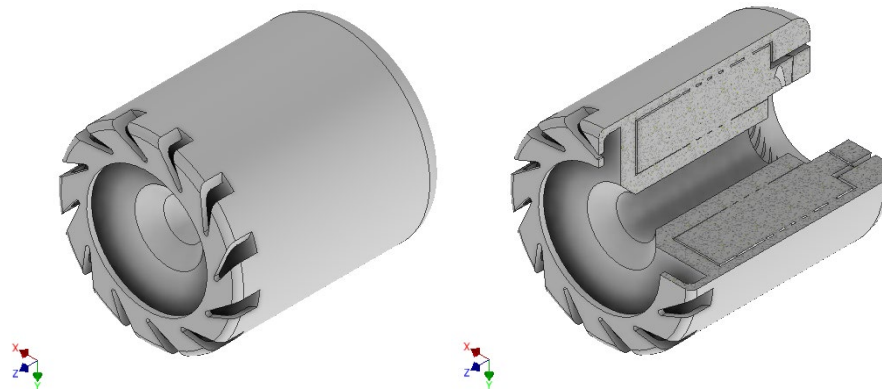
Gambar 2. Liner dalam

Geometri liner luar (Gambar 1) dan liner dalam (Gambar 2) disatukan secara konsentris membentuk sebuah geometri ruang bakar tipe annular (Gambar 3).



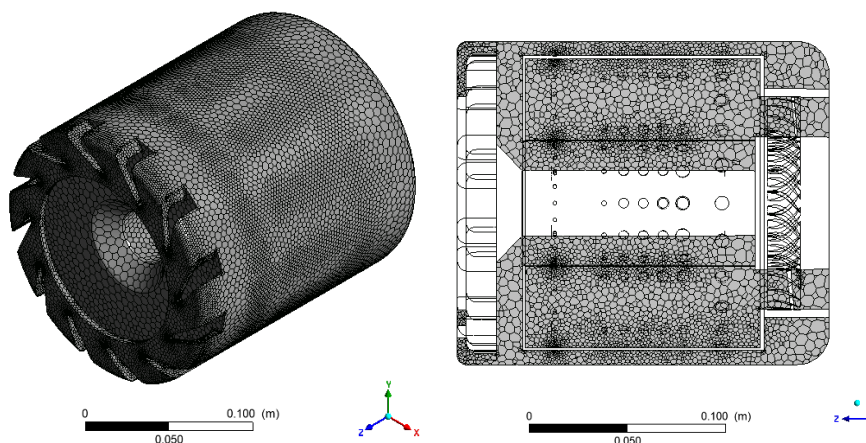
Gambar 3. Geometri ruang bakar

Geometri tersebut kemudian diambil hanya bagian yang dilewati fluida membentuk domain fluida seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Domain fluida

Struktur *mesh* yang digunakan adalah tipe polyhedral seperti ditunjukkan pada Gambar 5 karena dapat mempercepat laju konvergen. Jumlah sel pada domain fluida ruang bakar sekitar 4.000.000 sel.



Gambar 5. *Mesh* ruang bakar

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan asumsi fluida *compressible*, *steady-state* dan mengabaikan efek gravitasi. Pemodelan ini memiliki 4 buah fenomena fisik : aliran, perpindahan panas, *turbulent mixing*, dan reaksi kimia. Fenomena aliran dinyatakan dengan persamaan kekekalan massa dan momentum. Fenomena perpindahan panas dinyatakan dengan persamaan kekekalan energi. Fenomena *turbulent mixing* dinyatakan dengan persamaan kekekalan turbulen kinetik dan disipasi. Sedangkan fenomena reaksi kimia pembakaran *non-premixed* dinyatakan

dengan persamaan *mean mixture fraction* dan *mixture fraction variance*. Total persamaan yang harus diselesaikan oleh komputer adalah sebanyak 7 buah persamaan yaitu persamaan kekekalan massa, kekekalan momentum, kekekalan energi, kekekalan turbulen kinetik, kekekalan turbulen disipasi, kekekalan *mean mixture fraction*, dan kekekalan *mixture fraction variance*.

Persamaan kekekalan massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Persamaan kekekalan momentum:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

Persamaan kekekalan energi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \dot{q} - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (3)$$

Persamaan kekekalan turbulen kinetik:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left(-\overline{p'u'} + 2\overline{\mu u'e'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j u'_i} \right) - 2\overline{\mu e'_{ij} e'_{ij}} + (-\rho \overline{u'_i u'_j} \cdot E_{ij}) \quad (4)$$

Persamaan kekekalan turbulen disipasi:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

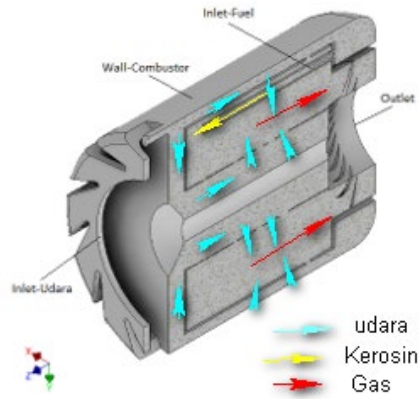
Persamaan kekekalan mean mixture fraction:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (6)$$

Persamaan kekekalan mixture fraction variance:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \quad (7)$$

Model yang akan disimulasikan memiliki 4 buah *boundary condition* seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Tabel 1 dan Tabel 2 menentukan nilai kondisi batas dan setup simulasi numerik. Lapis batas *Fuel inlet* menggunakan tipe *mass-flow-inlet* dengan inputan berupa laju alir kerosin ($C_{12}H_{23}$) masuk 0.0076 kg/s, temperatur kerosin masuk 293 K. Lapis batas udara inlet menggunakan tipe *mass-flow-inlet* dengan inputan berupa *flow rate* udara masuk 0,53kg/s (Dinara, 2020), temperatur udara masuk 407K. Lapis batas ruang bakar *wall* diasumsikan adiabatik. Lapis batas *outlet* bertipe *pressure outlet* dengan inputan berupa tekanan 1 atmosfer.



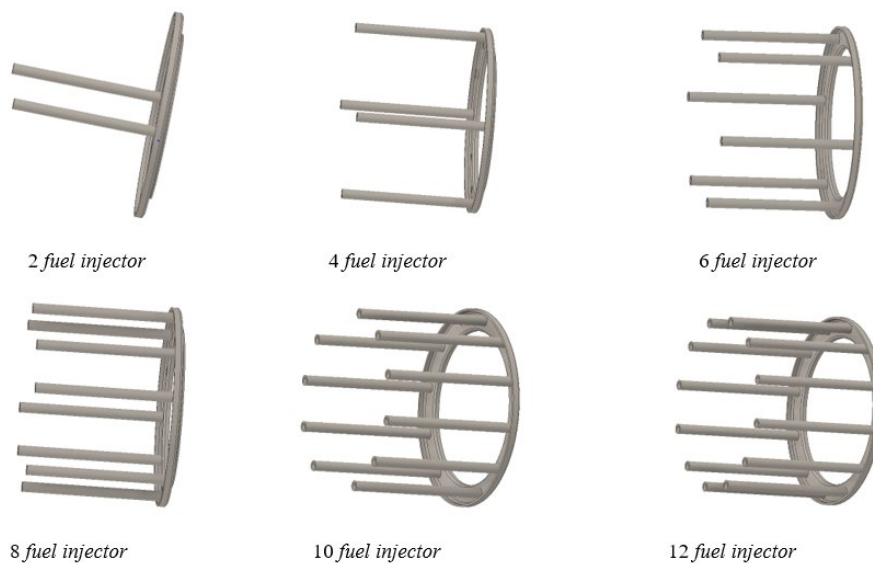
Gambar 6. Kondisi batas ruang bakar *reverse flow*

Tabel 1. Kondisi Batas Simulasi

Permukaan	Kondisi Batas	Nilai
<i>air inlet</i>	<i>mass flow inlet</i>	0.53 kg/s
<i>Fuel inlet</i>	<i>mass flow inlet</i>	0.0076 kg/s
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	1 atm
<i>Combustor casing</i>	<i>Wall</i>	

Tahap pertama adalah menguji daerah primer (lubang 2 mm) dan sekunder (lubang 2,5 mm) dengan memvariasikan jumlah tubing injector yang masuk daerah tersebut. Variasi jumlah tubing *fuel injector* seperti ditunjukkan pada Gambar 7. yang digunakan untuk mendapatkan jumlah tubing *fuel injector* yang optimal dengan melihat pengaruhnya terhadap temperatur rata-rata dan sisa CO pada *outlet* ruang bakar.

- Variasi 1 yaitu ruang bakar dengan 2 tubing *fuel injector*.
- Variasi 2 yaitu ruang bakar dengan 4 tubing *fuel injector*.
- Variasi 3 yaitu ruang bakar dengan 6 tubing *fuel injector*.
- Variasi 4 yaitu ruang bakar dengan 8 tubing *fuel injector*.
- Variasi 5 yaitu ruang bakar dengan 10 tubing *fuel injector*.
- Variasi 6 yaitu ruang bakar dengan 12 tubing *fuel injector*.



Gambar 7. Variasi jumlah *fuel injector*

Tabel 2. Setup simulasi

Setup Parameter	Setting
Tipe Solver	Pressure based
Model Turbulensi	K-epsilon
Wall treatment	Standard wall function
Model species	Non-premixed combustion
Spatial discretization	Second order

Setelah didapatkan jumlah tubing *fuel injector* yang sesuai selanjutnya dilakukan simulasi tahap 2 untuk menguji lubang-lubang dilution. Simulasi berdasarkan lubang-lubang liner untuk melihat pengaruhnya terhadap temperatur rata-rata dan jumlah sisa *fuel* yang masih ada pada outlet ruang bakar seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variasi lubang-lubang liner

Variasi	Formasi Lubang-Lubang Liner												
	Diameter Lubang-Lubang Liner Luar						Diameter Lubang-Lubang Liner Dalam						
	Primer (mm)	Sekunder (mm)	Dilution (mm)				Primer (mm)	Sekunder (mm)	Dilution (mm)				
Variasi 1	2	2.5	3	3	4	4	5	2	2.5	3	3	3	5
Variasi 2	2	2.5	4	4	5	5	6	2	2.5	4	4	4	6
Variasi 3	2	2.5	5	5	6	6	7	2	2.5	5	5	5	7
Variasi 4	2	2.5	6	6	7	7	8	2	2.5	6	6	6	8

Penyelesaian model matriks menggunakan skema SIMPLE (Semi Implicit Pressure Linked Equation) dengan variable tekanan sebagai koreksi nilai taksir. Sedangkan diskretisasi menggunakan skema *second-order* untuk mendapatkan hasil lebih akurat. Kalkulasi dilakukan sebanyak 1000 iterasi dengan kriteria minimum residual 10^{-3} .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

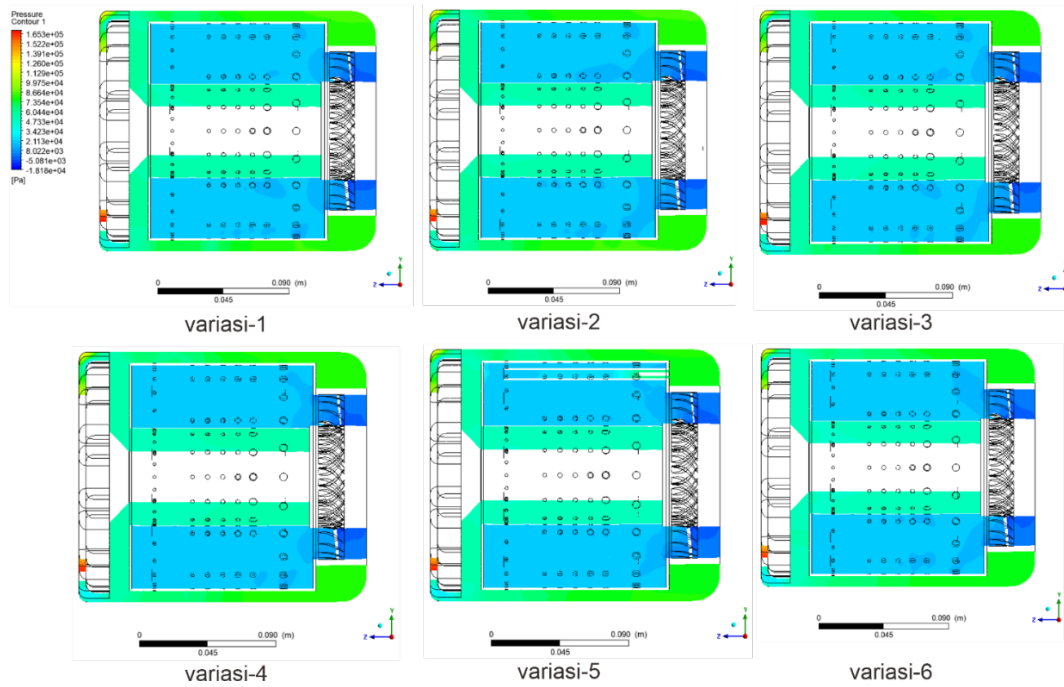
Tahap berikutnya adalah *Post-processing* merupakan tahap menampilkan hasil simulasi, baik data kuantitatif maupun kualitatif.

3.1. Variasi Jumlah Fuel Injector

Variasi jumlah tubing *fuel injector* ini untuk menguji pencampuran bahan bakar dan udara sekaligus pembakaran yang terjadi pada daerah primer dan sekunder dan melihat efeknya pada ruang bakar.

3.1.1. Distribusi Tekanan

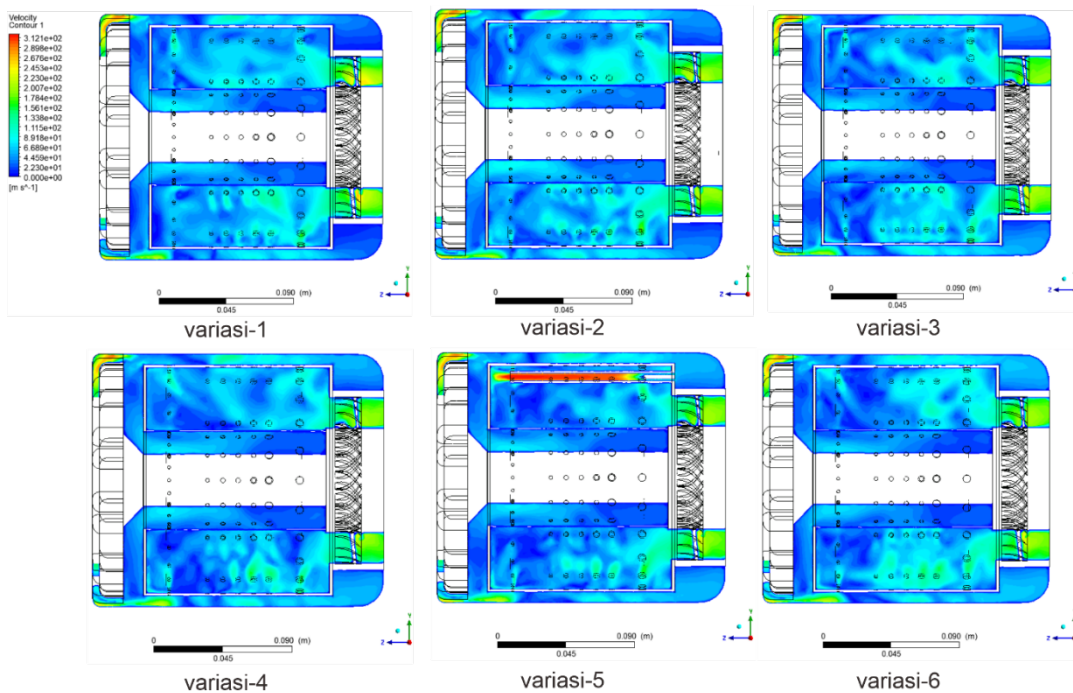
Gambar 8. menampilkan kontur tekanan total dalam arah aksial untuk melihat rugi-rugi tekanan yang terjadi antara tekanan masuk ruang bakar dan tekanan pada *outlet* ruang bakar. Secara umum terjadi penurunan tekanan ketika aliran fluida mendekati bagian sudu-sudu *nozzle*. Namun terlihat adanya perbedaan distribusi tekanan fluida yang terjadi disebabkan pengaruh jumlah *fuel injector*. Dilihat dari distribusi tekanan pada variasi 1 (2 buah *injector*) dan variasi 2 (4 buah *injector*) tekanan didalam ruang bakar tidak merata, dengan penambahan *injector* (variasi 3 - 6) distribusi tekanan fluida menjadi cukup merata.



Gambar 8. Kontur tekanan

3.1.2. Distribusi Kecepatan Fluida

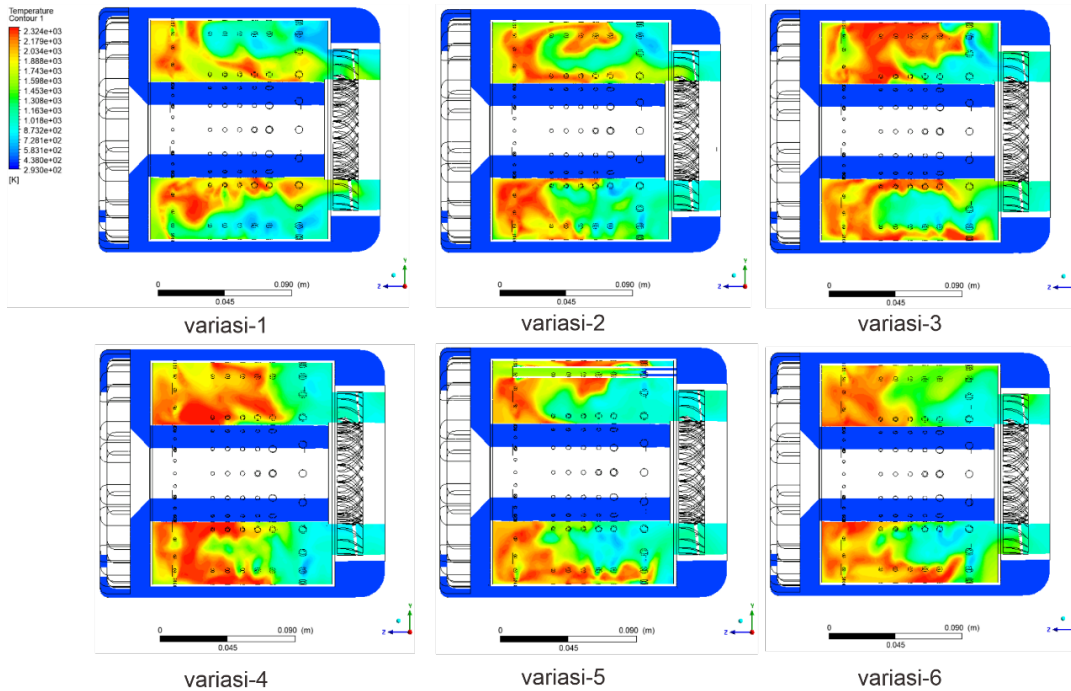
Pada variasi 1 (jumlah *injector* 2 buah) dan variasi 2 (jumlah *injector* 4 buah) terlihat tingginya kecepatan fluida pada daerah primer. Hal ini tidak diharapkan karena kecepatan fluida yang tinggi di daerah primer menyebabkan sulitnya penyalan dan pembentukan api pembakaran. Penambahan *injector* seperti pada variasi 3 sampai 6 menunjukkan hasil yang diharapkan dimana kecepatan fluida pada daerah primer cukup rendah dan pada daerah *tertier* kecepatannya meningkat seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Kontur kecepatan

3.1.3. Distribusi Medan Temperatur

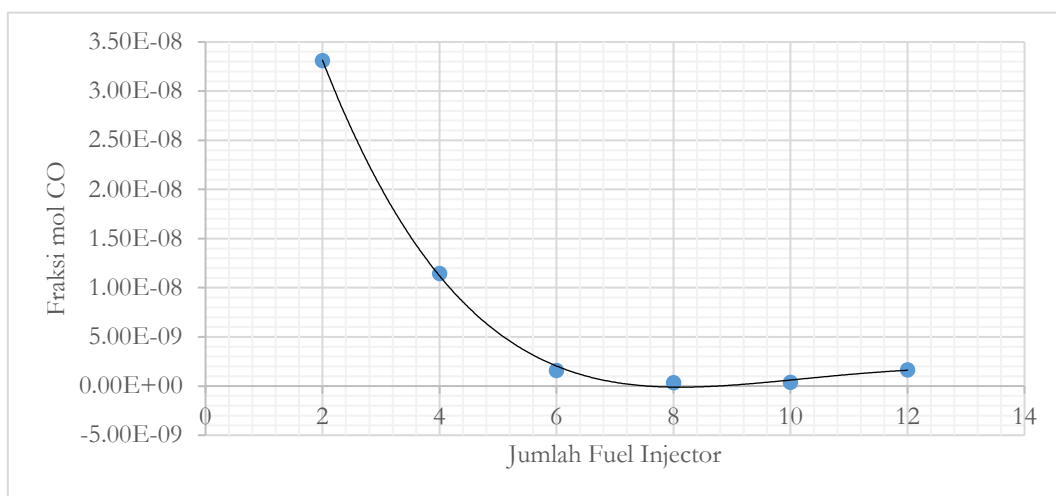
Hasil simulasi distribusi medan temperatur terlihat pada Gambar 10. Pada variasi 1 dan 2 terlihat temperatur tidak merata pada daerah primer dan sekunder. Hal ini menunjukkan campuran bahan bakar dan udara tidak terbakar sempurna. Variasi 4 cukup bagus dengan temperatur yang tinggi dan seragam pada daerah primer, sekunder, dan *dilution*. Variasi 5 dan 6 juga cukup bagus dengan keseragaman temperatur yang bagus pada daerah primer dan sekunder, namun pada daerah *dilution* distribusinya tidak seragam. Temperatur yang sangat tinggi pada daerah tertier dengan temperatur yang sama dengan temperatur pembakaran daerah primer juga terjadi pada variasi 5 dan 6.



Gambar 10. Kontur temperatur

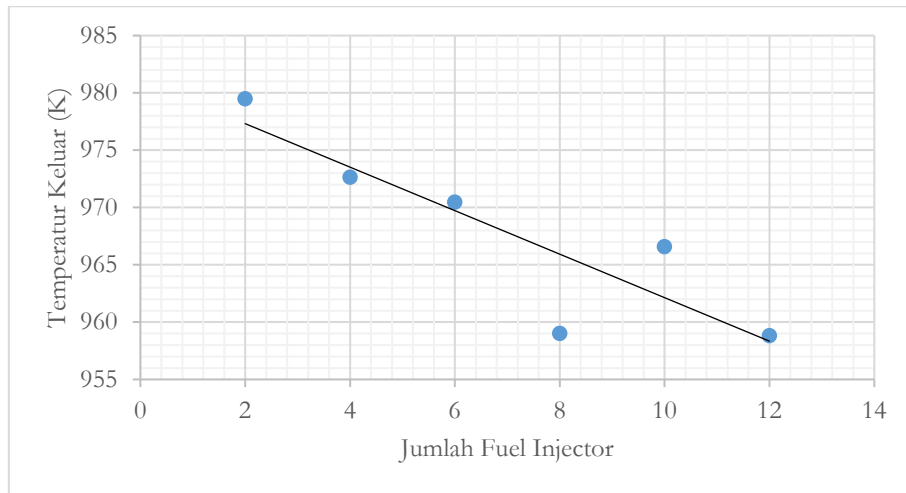
3.1.4. Pengaruh Variasi Jumlah *Fuel Injector* Terhadap Sisa CO Hasil Pembakaran

Gambar 11. menunjukkan pengaruh jumlah *fuel injector* terhadap fraksi mol CO di sisi *outlet*. Semakin kecil fraksi mol CO yang dihasilkan, maka semakin sempurna proses pembakaran. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah *fuel injector*, semakin kecil fraksi mol CO yang dihasilkan. Dengan melihat aspek kemudahan manufaktur, didapatkan bahwa jumlah *fuel injector* 8 buah adalah paling optimal.



Gambar 11. Pengaruh jumlah *fuel injector* terhadap fraksi mol CO

Gambar 12. menunjukkan pengaruh jumlah *fuel injector* terhadap suhu keluar di sisi outlet. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah *fuel injector*, semakin kecil suhu keluar. Berdasarkan tujuan desain, suhu keluar yang disarankan adalah 950 K, maka jumlah *fuel injector* 12 buah menjadi pilihan yang tepat karena mendekati suhu desain. Namun melihat aspek kemudahan manufaktur, dan fraksi mol CO yang dihasilkan, jumlah *fuel injector* 8 buah menjadi lebih optimal.

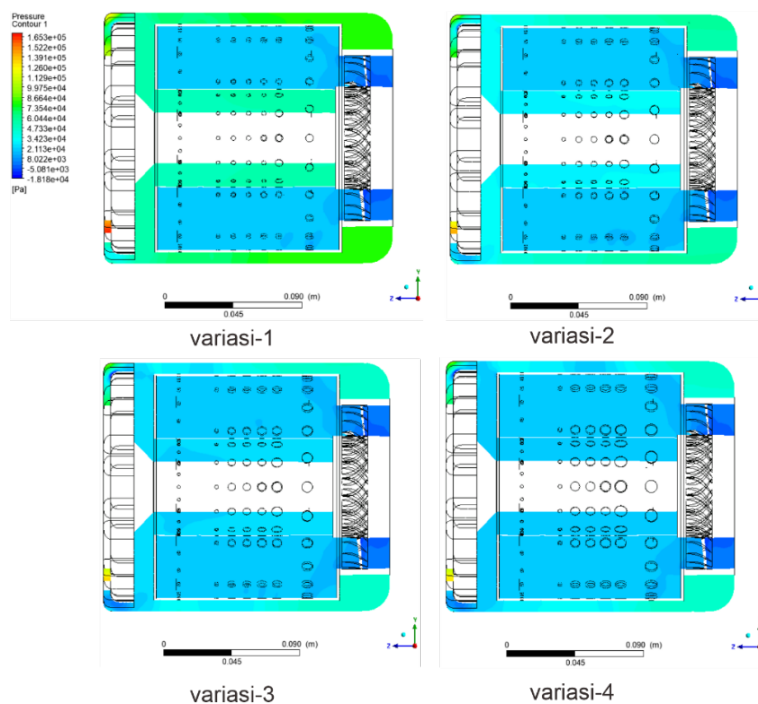


Gambar 12. Pengaruh jumlah *fuel injector* terhadap temperatur keluar

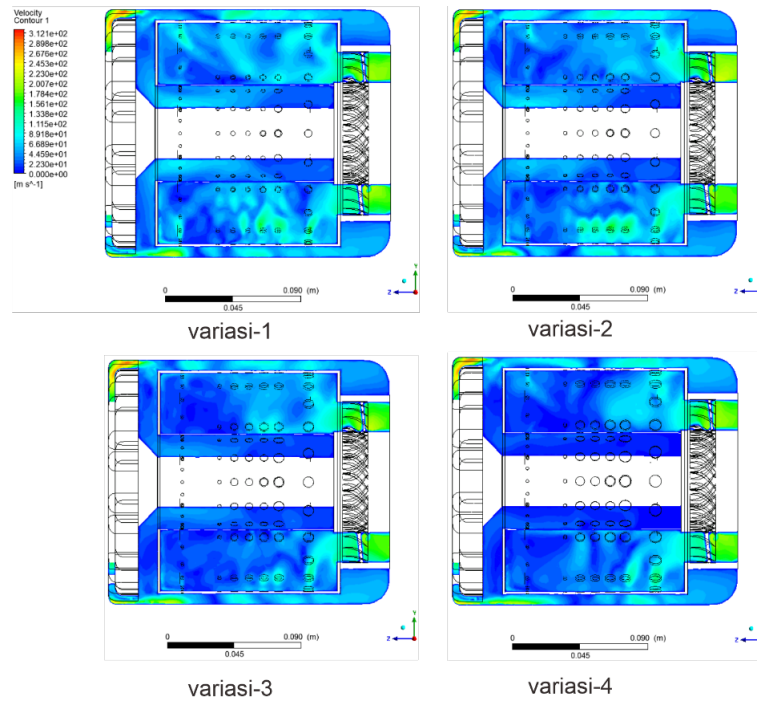
3.1.5. Variasi Ukuran Lubang *Dilution*

Berdasarkan analisis jumlah *fuel injector*, didapatkan bahwa jumlah *fuel injector* yang optimal adalah 8 buah. Pada pembahasan ini akan dibahas mengenai pengaruh ukuran lubang *dilution* terhadap performa ruang bakar, dengan jumlah *fuel injector* 8 buah sebagai variable tetap dimana ukuran diameter lubang *dilution* pada setiap variasi akan di tambah 1 mm.

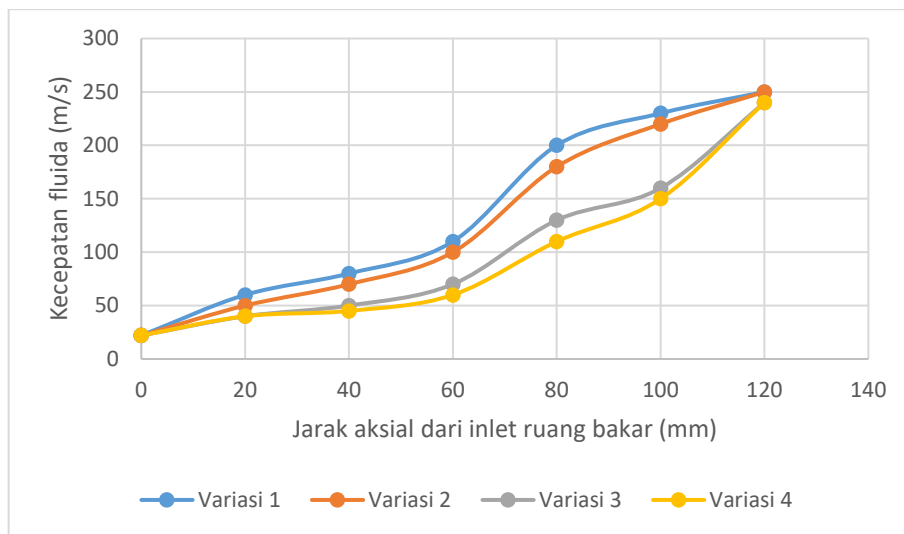
Gambar 13. menunjukkan kontur tekanan pada variasi 1 terlihat lebih merata pada keseluruhan bagian dalam ruang bakar. Kontur kecepatan pada variasi 1 memperlihatkan medan kecepatan yang terdistribusi lebih merata, sedangkan pembakaran pada daerah primer dan sekunder (bagian depan ruang bakar) terlihat paling merata pada variasi 1.



Gambar 13. Kontur tekanan

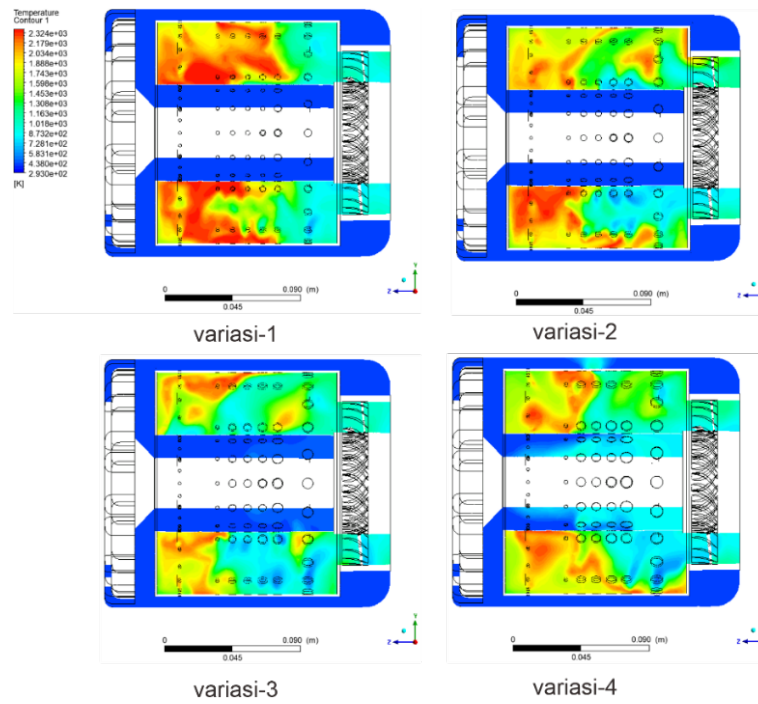


Gambar 14. Kontur kecepatan

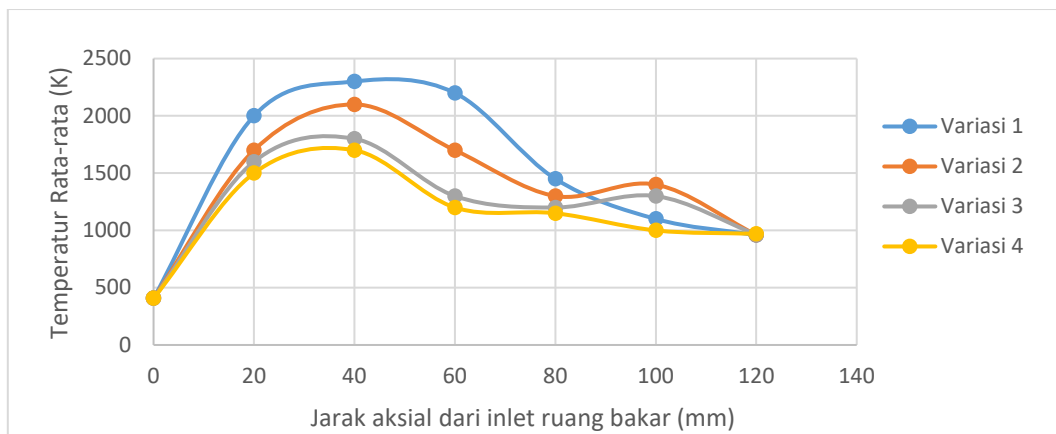


Gambar 15. Kecepatan Rata-Rata Fluida

Kontur Kecepatan pada Gambar 14. menunjukkan pada variasi 1 kecepatan gas yang terbentuk mengalami kenaikan lebih cepat dan kecepatan yang lebih tinggi diikuti oleh variasi 2, 3, dan 4. Hal ini semakin jelas terlihat pada kecepatan rata-rata yang terjadi pada sepanjang garis aksial sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15.



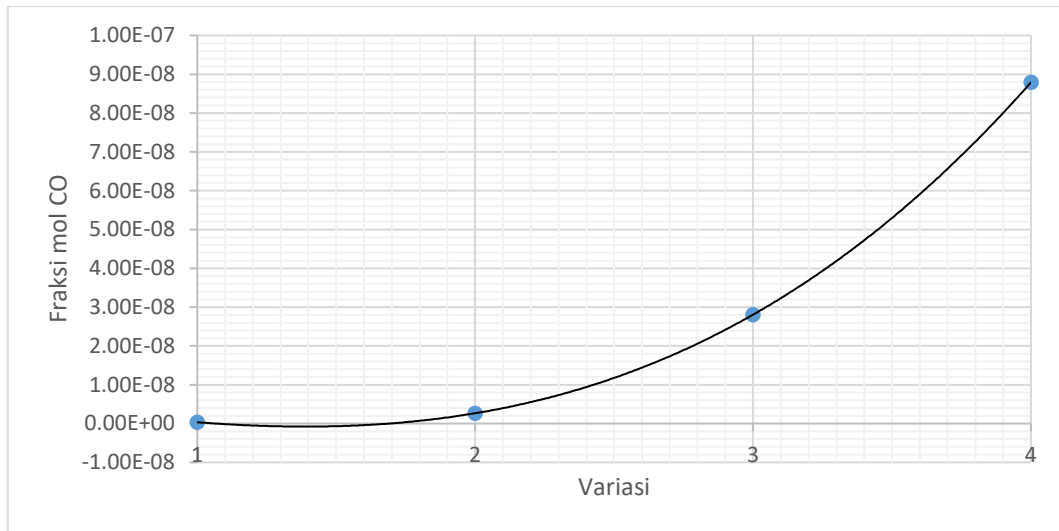
Gambar 16. Kontur Temperatur



Gambar 17. Distribusi temperatur sepanjang garis aksial

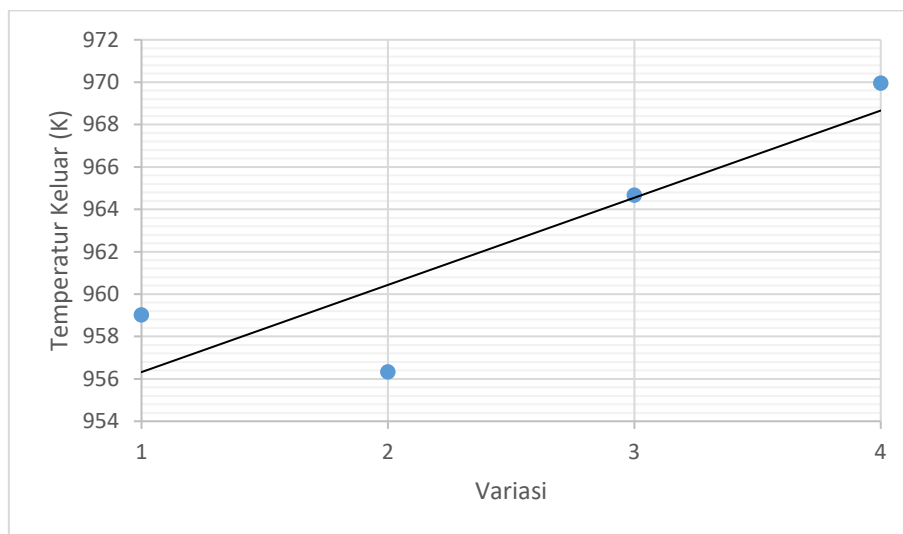
Kontur temperatur pada Gambar 16. Memperlihatkan pada variasi 1 temperatur pembakaran yang tinggi pada daerah primer cepat tercapai diikuti variasi 2, 3, dan 4. Hal ini diperjelas dengan distribusi temperatur sepanjang garis aksial pada Gambar 17. yang menunjukkan temperatur maksimum terjadi pada daerah antara primer dan sekunder. Pada variasi 1 temperatur maksimum yang terjadi paling tinggi yang sebanding dengan banyaknya species yang terbakar. Penambahan dimensi lubang-lubang liner pada variasi 2, 3, dan 4 menunjukkan semakin menurunnya temperatur maksimum pada daerah antara primer dan sekunder.

Gambar 18. menunjukkan pengaruh variasi lubang dilution terhadap fraksi mol CO. Dari grafik tersebut didapatkan bahwa semakin besar ukuran lubang dilution, maka semakin tinggi fraksi mol CO, atau dengan kata lain semakin tidak sempurna proses pembakarannya. Oleh karena itu, pilihan variasi 1 adalah pilihan yang tepat.



Gambar 18. Pengaruh variasi ukuran lubang dilution terhadap fraksi mol CO

Gambar 19. menunjukkan pengaruh variasi lubang *dilution* terhadap temperatur. Dari grafik tersebut didapatkan bahwa semakin besar ukuran lubang *dilution*, maka semakin tinggi temperaturnya. Oleh karena itu, diantara pilihan variasi lubang dilution pada table 3 maka variasi 1 adalah pilihan yang tepat karena mendekati suhu desain.



Gambar 19. Pengaruh variasi lubang *dilution* terhadap temperatur keluar

Berdasarkan pembahasan diatas, dapat diamati bahwa proses pembakaran pada variasi 1 cukup sempurna sebab hanya menghasilkan sisa CO paling sedikit yaitu sekitar 3.28×10^{-10} . Hal ini mengindikasikan kerosin hampir terbakar seluruhnya di dalam ruang bakar. Pada variasi 2 sisa CO yang tidak terbakar meningkat sebesar 2.43×10^{-9} . Penambahan lubang diameter liner menghasilkan sisa CO yang tidak terbakar semakin banyak yang terlihat pada variasi 3 sebesar 2.98×10^{-8} dan variasi 4 sebesar 8.82×10^{-8} . Temperatur outlet ruang bakar pada variasi 1 mendekati target 950 K, dan semakin meningkat pada penambahan lubang diameter liner yaitu sebesar 965 K pada variasi 3 dan 970 K pada variasi 4. Dapat diambil kesimpulan jumlah fuel injector yang optimal sebanyak 8 buah dengan variasi pertama lubang *dilution*.

Validasi eksperimental berdasarkan proyek riset yang dilakukan oleh Benini, dkk (2007) dari universitas Padova Italia yang mengembangkan turbojet 200 N dan sudah sukses beroperasi selama 500 jam tanpa ada kerusakan yang berarti. Turbojet tersebut memakai kompresor sentrifugal 1 tingkat dengan rasio kompresi 2,66:1, ruang bakar annular, dan turbin aksial 1 tingkat. Data dengan inputan seperti pada penelitian tersebut menjadi input pada boundary condition penelitian ini. Temperatur keluar ruang bakar turbin pada penelitian eksperimental Benini, dkk

tersebut sebesar 950 K di mana terdapat perbedaan sekitar 1% terhadap simulasi yang dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 4. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen

	Simulasi	Eksperimen (Benini, 2007)	Selisih	% selisih
Temperatur outlet (K)	960	950	10	10.5

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa jumlah *fuel* yang habis terbakar dan temperatur rata-rata pada outlet ruang bakar dipengaruhi oleh jumlah tubing *fuel injector* dan ukuran lubang-lubang *dilution*. Jumlah sisa *fuel* yang tidak terbakar semakin sedikit dengan penambahan jumlah tubing *fuel injector* sampai 8 buah *injector*. Di atas 8 tubing *fuel injector*, sisa *fuel* yang tidak terbakar sedikit mengalami kenaikan. Hal ini merupakan pengaruh dari semakin merata dan sempurnanya pembakaran yang terjadi sehingga sisa *fuel* yang tidak terbakar semakin sedikit pada *outlet* ruang bakar. Temperatur rata-rata *outlet* mengalami penurunan dengan penambahan jumlah tubing *fuel injector*. Hal ini disebabkan semakin meratanya pembakaran yang terjadi pada zona primer yang mengakibatkan lebih sempurnanya pembakaran yang terjadi. Kesempurnaan pembakaran pada zona primer berarti sisa *fuel* yang tidak terbakar semakin sedikit. Bila ada sisa *fuel* yang tidak terbakar di zona primer akan ada kemungkinan sisa *fuel* ini terbakar di zona berikutnya hingga mengakibatkan semakin tingginya temperatur di zona berikutnya tersebut. Penambahan diameter lubang-lubang *dilution* jumlah sisa *fuel* yang tidak terbakar semakin meningkat. Hal ini karena semakin banyaknya udara yang mengalir ke lubang-lubang *dilution* mengakibatkan udara yang ke lubang-lubang primer semakin sedikit. Campuran udara-bahan bakar pada daerah primer makin kaya mengakibatkan tidak semua *fuel* dapat terbakar. Sisa *fuel* yang tidak terbakar ini dapat diketahui pada daerah *outlet* ruang bakar. Temperatur rata-rata *outlet* ruang bakar meningkat dengan bertambahnya diameter lubang-lubang *dilution*. Meningkatnya sisa *fuel* yang tidak terbakar pada daerah primer berpotensi menimbulkan pembakaran pada daerah selanjutnya. Temperatur pada daerah outlet terlihat meningkat dengan meningkatnya sisa *fuel* yang tidak terbakar. Terlihat fenomena yang menarik di mana bertambahnya jumlah tubing *fuel injector* akan menurunkan temperatur rata-rata *outlet* sedangkan bertambahnya diameter lubang-lubang *dilution* akan menaikkan temperatur outlet ruang bakar.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Benini, Ernesto., Giacometti, Stefano, 2007, : *Design, Manufacturing and operation of a small turbojet-engine for research purposes*, Applied Energy Volume 84, Issue 11, November 2007, pages 1102-1116
- C. Priyant Marka, n , A. Selwyn , 2016, *Design and analysis of annular combustion chamber of a low bypass turbofan engine in a jet trainer aircraft* , Propulsion and Power Research ;5(2)97-107
- Chaudari, K. V. (2012) : *Design and CFD Simulation of Annular Combustion Chamber with kerosene as Fuel for 20 kW Gas Turbine Engine*, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 2, Issue 6, November- December 2012, pp.1641-1645
- Dinara, Sint Helent., 2020, *Design and CFD Simulation of Centrifugal Compressor for Mini Jet-Turbine Engine 200 N Thrust*, Thermofluid XI
- Hartono, Firman., Arizal (2013) : *Analisis Computational Fluid Dynamic (CFD) Ruang Bakar Mesin Turbojet TJE500FH V.1*, Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 10, No.2
- Oppong F, S.JvanderSpuy a, T.W.vonBackström a, A.LacinaDiabyb, 2015, *An overview on the performance investigation and improvement of micro gas turbine engine*, R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering 2015, 31, 35-41

Studi Eksperimental Pengendalian *Heat Input* Guna Pencegahan *Burn-Through* pada Perbaikan Pipa Dengan Metode *Weld-Deposition*

K. A. Pambudi* dan M. N. Ilman

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: kurniawan4480@gmail.com

Abstrak

Pada industri minyak dan gas bumi, selain digunakan dalam proses penyambungan pipa minyak dan gas bumi, pengelasan juga digunakan untuk perbaikan penguatan dinding pipa ketika terjadi penurunan ketebalan, salah satunya dengan metode perbaikan yang dilakukan adalah *weld-deposition*. Namun demikian, metode ini memiliki risiko kegagalan berupa *burn-through* dan *hydrogen cracking*. Pada penelitian ini, dilakukan pengelasan deposisi pada pipa API 5L X52 dengan nominal diameter 4 inchi (101.6 mm) dan sisa ketebalan dinding pipa 4 mm yang dialiri air dengan kecepatan 15,4 liter per menit (lpm). Dari hasil pengujian ini, akan didapatkan nilai temperatur pada dinding pipa dan waktu yang diperlukan untuk terjadi penurunan suhu dari 800°C ke 500°C ($\Delta t_{8/5}$). Pengujian menggunakan beberapa nilai *heat input* yang merupakan manifestasi dari kuat arus I antara 160 – 200 A, voltase V sekitar 24 – 30 V, dan kecepatan pengelasan v bervariasi dengan interval 2 – 10 mm/s yang menghasilkan *heat input* pada rentang 0,3031 kJ/mm sampai dengan 1,6907 kJ/mm, sedangkan parameter lain diasumsikan tetap. Penelitian ini menghasilkan rekomendasi pengelasan dengan metode *weld-deposition* pada pipa *in-service* dengan mengaplikasikan *heat input* pada rentang 0,5388 kJ/mm sampai dengan 1,3526 kJ/mm untuk debit alir fluida air 15,4 lpm untuk menghindari potensi timbulnya *hydrogen crack* dan *burn-through*. *Burn-through* sendiri terjadi pada *heat input* 1,6907 kJ/mm pada kecepatan pengelasan 2 mm/s.

Kata kunci : API 5L X52, *weld-deposition*, *burn-through*, *hydrogen crack*, *heat input*, *in-service welding*.

Abstract

In the oil and gas industry, welding is widely used for joining welded steel and pipelines. A welding technique is also used for repair damage of the piping system due to a decrease in thickness. One of the repair methods used is *weld-deposition*. However, this method causes a risk of failure in the form of *burn-through* and *hydrogen cracking*. In this study, deposition welding was carried out on API 5L X52 pipe having a nominal diameter of 4 inches (101.6 mm) and the remaining thickness of the pipe wall of 4 mm in which water was flowed at average speed of 15.4 litres per minutes (lpm). The welding process was conducted at current I of 160 - 200 A, the voltage V of around 24 - 30 V whereas the welding speed v was varied in the intervals of 2 - 10 mm/s hence resulting in different weld heat inputs of 0, 3031 kJ/mm to 1,6907 kJ/mm while other parameters are assumed to be constant. During experiments, the pipe wall temperatures were measured using thermocouples from which the cooling time from 800 °C to 500 °C, namely $\Delta t_{8/5}$ for various welding speeds were obtained. This research produces recommendations for welding with the *weld-deposition* method on *in-service* pipes by applying heat input in the range 0.5388 kJ/mm to 1.3526 kJ/mm for a water flow rate of 15,4 lpm to avoid potential *hydrogen crack* and *burn-through*. Results show that increasing heat input hence lowering welding speed tends to decrease the HAZ and *burn through* occurs at the heat input of 1,6907 kJ/mm corresponding to the welding speed of 2 mm/s.

Keywords : API 5L X52, *weld-deposition*, *burn-through*, *hydrogen crack*, *heat input*, *in-service welding*.

1. PENDAHULUAN

Pada industri minyak dan gas bumi, pengelasan sangat erat dengan penggunaan pipa baja yang digunakan sebagai moda transportasi minyak dan/atau gas bumi. Selain digunakan untuk menyambung pipa minyak dan gas bumi, pengelasan juga dilakukan untuk memperbaiki kerusakan yang terjadi pada sistem perpipaan. Kerusakan pada dinding pipa dapat mengakibatkan penurunan ketebalan pipa, sehingga mengakibatkan menurunnya kekuatan pipa dalam menahan tekanan fluida yang mengalir. Pada kondisi ini perkuatan dinding pipa perlu dilakukan salah satunya dengan metode *weld-deposition*. Namun demikian, metode ini memiliki risiko kegagalan berupa *burn-through* dan *hydrogen crack*.

Pada studi ini, akan dilakukan pembahasan mengenai perbaikan pada sistem perpipaan dengan metode *weld-deposition* dengan lebih spesifik menentukan parameter-parameter pengelasan yang digunakan untuk mencegah terjadinya kegagalan *burn-through* pada proses pengelasan pipa yang dialiri fluida (*in-service*) dan mencegah terjadinya *hydrogen crack*. Sehingga, diharapkan ketika perbaikan dilakukan tanpa menghentikan aliran fluida dalam pipa, maka dapat mengurangi *potential commercial lost*.

Metode yang digunakan untuk mengidentifikasi terjadinya *burn-through* adalah mengukur temperatur maksimum pada dinding dalam pipa dan menggunakan distribusi temperatur untuk mengetahui penurunan kekuatan dari pipa. Boring dkk (2008) menyatakan bahwa temperatur di dinding dalam pipa harus dijaga agar tetap berada di bawah suhu 982oC untuk alasan keamanan. Nilai ini sudah mengakomodasi faktor keamanan sebesar 278oC sesuai kajian Bruce dan Amend (2009) yang menyatakan bahwa *burn-through* tidak terjadi pada temperatur di bawah 1260oC. Wade (1978) menggunakan pipa X60 dan elektroda berdiameter 3,2 dan 4,0 mm pada pipa dengan ketebalan sampai dengan 6 mm menggunakan heat input 1,8 kJ/mm menghasilkan kesimpulan bahwa untuk pipa dengan ketebalan 5 mm perlu dilakukan pembatasan tekanan dalam pipa maksimum 3 MPa dan heat input maksimum 1,4 kJ/mm. *Burn-through* juga dapat terjadi pada pipa dengan ketebalan kurang dari 3 mm meskipun pada tekanan dalam pipa yang sangat rendah. Penentuan potensi terjadinya *hydrogen crack* dilakukan dengan mengukur kekerasan pada HAZ dengan siklus termal las yang selanjutnya menentukan nilai besaran waktu yang diperlukan untuk penurunan temperatur dari suhu 800oC menjadi 500oC dan dikenal dengan nama *cooling time* ($\Delta t_{8/5}$). Waktu pendinginan $\Delta t_{8/5}$ ini akan mempengaruhi kekerasan pada HAZ. Tingkat kekerasan pada HAZ ini secara umum digunakan sebagai indikator dalam menentukan potensi akan terjadinya *hydrogen crack*. Nilai kekerasan di bawah 350 VHN dinilai memiliki potensi yang rendah untuk terjadi *crack*. Bailey (1970) menyatakan bahwa pada pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan elektroda rendah hidrogen tidak menimbulkan *crack* pada nilai kekerasan HAZ di bawah 350 VHN sebagai batas atas konservatif pada pengelasan dengan hidrogen rendah. Cola dan Treadgill (1988) menggunakan pipa baja dengan CE 0,3 – 0,5 dan kemudian menyatakan bahwa *crack* akan terjadi apabila $\Delta t_{8/5}$ kurang dari 5 detik dan pada kekerasan >400 VHN.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi literatur pada proses pengelasan untuk menentukan parameter-parameter pengelasan pada pipa apabila akan diperbaiki dengan metode *weld-deposition* untuk mencegah terjadinya *burn-through* dan *hydrogen crack* pada ketebalan dinding yang tersedia. Data akuisisi dilakukan dengan metode eksperimental dalam menentukan parameter-parameter pengelasan untuk dapat beroperasi dalam kondisi aman. Hal ini dapat menjadi aspek pertimbangan dalam industri yang menggunakan sistem perpipaan seperti industri minyak dan gas bumi untuk memilih metode yang tepat dalam pelaksanaan perbaikan apabila terjadi kerusakan atau cacat pada sistem perpipaan yang dimiliki tanpa menghentikan aliran fluida.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi panas pada dinding pipa yang dilas dengan metode *weld-deposition*. Gas Metal Arc Welding (GMAW)/ Metal Inert Gas (MIG) otomatis digunakan untuk melakukan pengelasan pada sampel dengan elektroda yang *consumable*. Dampak dari diketahuinya distribusi panas ini akan menentukan parameter-parameter pengelasan yang kemudian menjadi variabel yang dapat dikendalikan untuk mencegah terjadinya kegagalan pengelasan *burn-through* dan/atau *hydrogen crack*. Analisis diawali dengan melakukan akuisisi data dari eksperimen untuk mendapatkan data pada kondisi tertentu dari dimensi pipa, aliran fluida, dan parameter pengelasan. Selanjutnya, perhitungan pada kondisi spesifik dimensi pipa, aliran gas, dan parameter pengelasan didapatkan dari interpolasi dari database tersebut. Nilai $\Delta t_{8/5}$ diperlukan untuk mendapatkan nilai kekerasan HAZ yang dapat diterima untuk kondisi grade pipa yang spesifik menggunakan hubungan empiris antara nilai $\Delta t_{8/5}$ dan kekerasan menggunakan hubungan sesuai dengan hasil studi dari Yurioka dkk. (1987). Nilai kekerasan ini akan diverifikasi dengan pelaksanaan pengukuran secara aktual pada sampel dengan alat uji kekerasan Vickers.

Untuk mencapai hasil tersebut, mula – mula perlu dilakukan pengujian eksperimental dengan melakukan pengelasan deposisi pada pipa dengan diameter dan ketebalan tertentu. Dari hasil pengujian ini, akan didapatkan

nilai yang diinspeksi, yaitu temperatur pada dinding pipa dan waktu yang diperlukan untuk terjadi penurunan suhu dari 800°C ke 500°C ($\Delta t/5$). Pengujian akan menggunakan beberapa nilai heat input yang merupakan manifestasi dari kuat arus I [A], voltase V [V], dan kecepatan pengelasan v [mm/s] serta kecepatan aliran fluida sebagai variabel kemampuan disipasi panas, sedangkan parameter lain diasumsikan tetap.

2.1. Prosedur Pengelasan

Metode Gas Metal Arc Welding (GMAW)/ Metal Inert Gas (MIG) otomatis digunakan untuk melakukan pengelasan pada sampel dengan elektroda yang consumable. Penggunaan pengelasan secara otomatis akan meminimalisasi terjadinya kesalahan pada parameter-parameter pengelasan yang digunakan untuk mendapatkan nilai heat input yang mungkin dapat terjadi pada pengelasan secara manual. Adapun parameter pengujian yang dilakukan dapat dilihat sesuai dengan Tabel 1.

Spesimen menggunakan material pipa API 5L X52 berdiameter 4 inci yang memiliki spesifikasi material sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2. Spesimen uji diuji dengan melakukan pengelasan dengan metode weld-deposition langsung pada kondisi in-service. Fluida alir yang digunakan merupakan air yang bertekanan untuk mensimulasikan kondisi aktual fluida alir yang bertekanan. Skematik pemasangan spesimen uji dan kontrol atas parameter-parameter aliran fluida dapat dilihat pada Gambar 1.

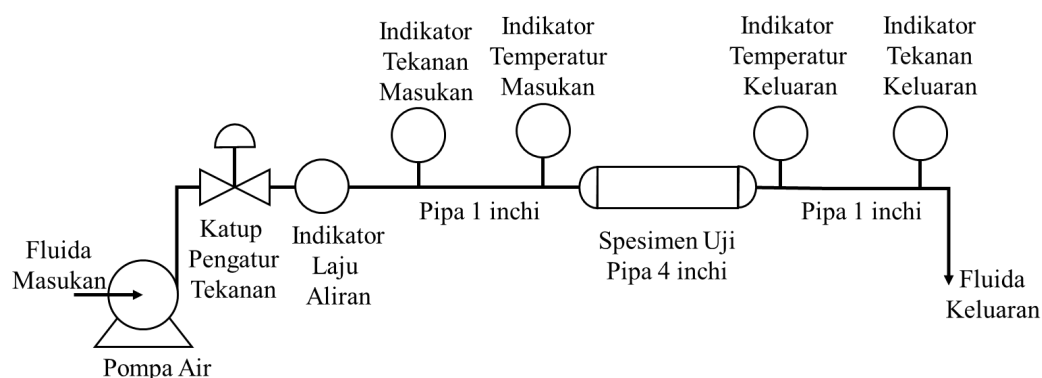
Tabel 1. Parameter Pengujian

Parameter	Nilai
Metode Pengelasan	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (GMAW) Menggunakan mesin las Tenjima model MIG 200S
Tegangan listrik	24 – 30 volt (dihasilkan secara otomatis)
Kuat arus listrik	160 – 200 ampere (dihasilkan secara otomatis)
Material Induk	API 5L X52 Nominal Diameter 4 inci
Elektroda	E70S-6 Diameter 0,8 mm
Kecepatan Pengelasan (mm/s)	10; 8; 6; 4; 3; 2.
Kisaran <i>Heat input</i> (kJ/mm)	0,288 – 0,360; 0,360 – 0,450; 0,480 – 0,600; 0,720 – 0,900; 0,960 – 1,200; 1,440 – 1,800.
Gas pelindung	Gas CO ₂
Debit Alir Fluida/ Kecepatan aliran *	15,4 liter per menit / 0,0317 m/s
Tekanan Fluida *	1 barg (1 x 10 ⁵ Pa)

* Kecepatan aliran fluida dan tekanan fluida didapatkan dari akuisisi pada pelaksanaan pengujian di lapangan

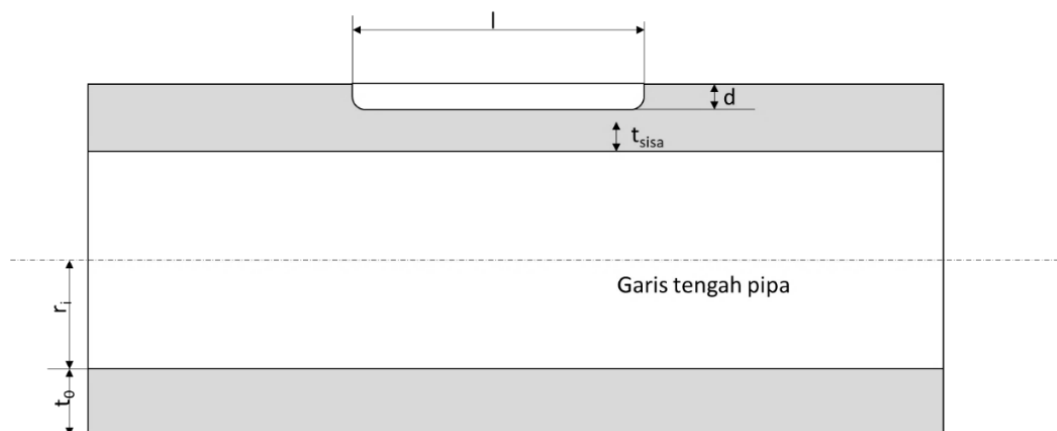
Tabel 2. Komposisi Spesimen Uji (API, 2007)

Komposisi (%)	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	Cr	B	V	Nb	N
API 5L X52	0,14	0,14	0,975	0,006	0,001	0,004	0,022	0,0003	0,005	0,038	0,014



Gambar 1. Diagram skematik kontrol dan spesimen uji

Sampel material induk akan dibuat *bevel* dengan bentuk semi-silindris horisontal dengan arah longitudinal (sejajar panjang pipa) untuk membuat simulasi bahwa telah terjadi penurunan ketebalan dari ketebalan asli material sesuai Gambar 2 dengan dimensi yang ditunjukkan pada Tabel 3 (API, 2007).



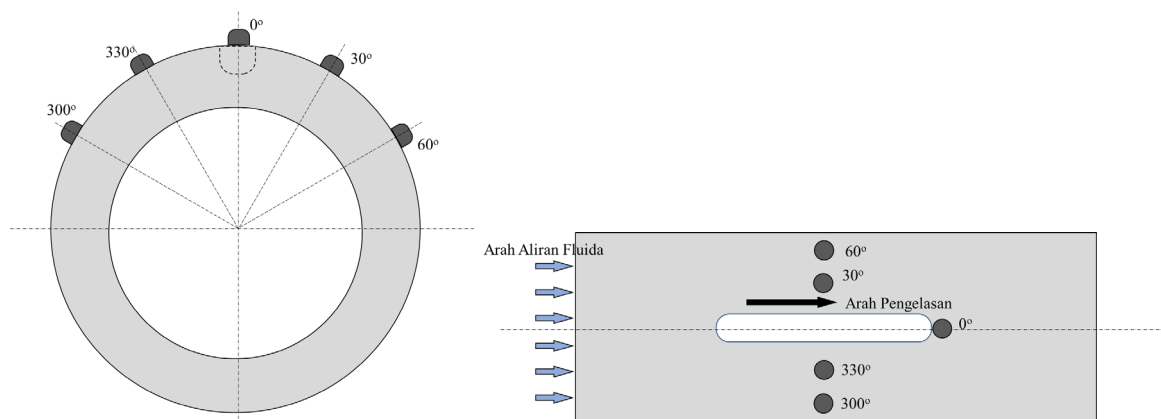
Gambar 2. Bentuk spesimen material induk

Tabel 3. Dimensi Spesimen Uji

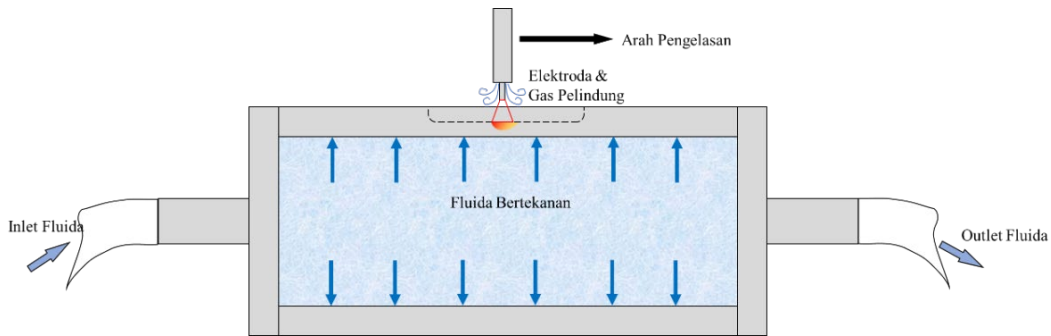
Parameter	Nilai
l	± 70 mm
d	2,02 mm
t_{sisa}	4 mm
t_0	6,02 mm
r_i	51,13 mm

2.2. Akuisisi Data

Dari pengujian yang dilaksanakan, dilakukan akuisisi atas data $\Delta t_{8/5}$ dan temperatur di dinding pipa dengan pemasangan *thermocouple* yang ditempelkan pada beberapa titik dengan cara ditanam di dalam material dengan *blind hole*. Temperatur pada zona pengelasan didapatkan menggunakan *thermocouple* pada ujung akhir *bevel* lasan yang dipasang untuk memantau perubahan suhu di area pengelasan pada jarak 2 mm dari ujung *bevel*. Titik – titik yang diukur untuk mendapatkan nilai temperatur dinding pipa dan skematik proses pengelasan untuk mengukur temperatur pada *weld-zone* dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Temperatur dinding pipa dan temperatur lasan yang diukur akan dijadikan acuan sebagai indikator sampai terjadi *burn-through*. Pengujian dilakukan terhadap beberapa sampel yang kemudian dikomparasi untuk menentukan nilai batas aman terjadinya *burn-through*.



Gambar 3. Lokasi pengukuran temperatur dinding pipa dengan *thermocouple*



Gambar 4. Skematik proses pengelasan spesimen uji

Data temperatur yang didapatkan dari *termocouple* ini kemudian dianalisis dan dihitung untuk mendapatkan nilai $\Delta t_{8/5}$ dari berbagai nilai *heat input* sebagai masukan yang merupakan manifestasi dari variasi nilai kuat arus, voltase, dan kecepatan pengelasan, sedangkan jenis elektroda yang digunakan tetap. Selain mengacu kepada nilai $\Delta t_{8/5}$ dari berbagai nilai *heat input*, nilai kekerasan mikro juga dilakukan secara langsung dengan metode pengukuran nilai kekerasan menggunakan metode Vickers untuk mendapatkan nilai VHN.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

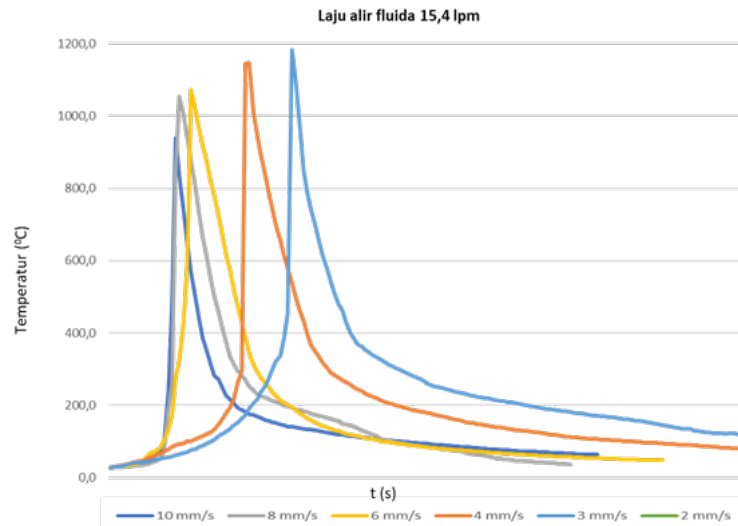
Nilai *heat input* per satuan panjang lasan merupakan fungsi dari kuat arus I , voltase V , efisiensi panas elektroda pengelasan η_e , dan kecepatan pengelasan v . Nilai kuat arus dan voltase yang didapatkan ini kemudian dijadikan basis perhitungan nilai besaran *heat input* per satuan waktu dengan nilai efisiensi panas elektroda sebesar 0,75 pada kondisi *open arc, metal electrode* (Rykalin, 1957). Nilai pengukuran *heat input* dapat dilihat dalam Tabel 4 kolom (4) dan (5).

3.1. Siklus Termal

Pengukuran temperatur dilakukan pada kampuh lasan. Alat ukur temperatur (*termocouple*) yang digunakan diletakkan pada titik akhir lasan, sehingga profil temperatur pada kampuh lasan yang dihasilkan menjadi lebih runcing akibat dari ekspos dan akumulasi panas yang semakin meningkat ketika elektroda lasan semakin mendekati alat ukur sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Sesaat sebelum mengenai alat ukur, pengelasan dihentikan dan alat ukur memantau penurunan temperatur pada kampuh lasan. Laju penurunan temperatur ini kemudian diamati dan diukur spesifik pada waktu yang diperlukan untuk terjadinya penurunan temperatur dari 800°C ke 500°C atau disebut $\Delta t_{8/5}$. Nilai $\Delta t_{8/5}$ ini kemudian akan menentukan nilai kekerasan pada pengelasan yang berpotensi memunculkan *hydrogen crack* sesaat setelah pengelasan selesai atau pada kemudian hari. Nilai $\Delta t_{8/5}$ dituangkan dalam Tabel 4 pada kolom (6).

3.2. Kekerasan Material

Dari perhitungan $\Delta t_{8/5}$ sebagaimana tertulis pada Tabel 4 pada kolom (6), maka akan dihitung nilai kekerasan berdasarkan korelasi yang dikembangkan oleh Yurioka, dkk (1987) sesuai dengan persamaan (1) sampai dengan (12). Komposisi material yang digunakan sebagai basis perhitungan sesuai dengan yang tertulis pada Tabel 2. Hasil perhitungan dikompilasi dan dituliskan pada Tabel 4 pada kolom (7).



Gambar 5. Profil temperatur pada kampuh lasan

$$H_v = \frac{H_M + H_B}{2} - \frac{H_M - H_B}{2,2} \times \arctan(x) \tag{1}$$

$$x = 4 \times \frac{\log(\Delta t_{8/5} / t_M)}{\log(t_B / t_M)} - 2 \tag{2}$$

$$H_M = 884 \times C(1 - 0,3 \cdot C^2) + 294 \tag{3}$$

$$t_M = \exp(10,6 \cdot CE_I - 4,8) \tag{4}$$

$$CE_I = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr(1-0,16\sqrt{Cr})}{8} + f(B) \tag{5}$$

$f(B)$ merupakan peningkatan tingkat kekerasan karena kandungan Boron pada kondisi $C \leq 0,8\%$ dan $N \leq 0,01\%$.

$$f(B) \begin{cases} B \leq 0,0001 & f(B) = 0 \\ 0,0001 < B < Bx & f(B) = 0,09 \cdot f(C) \cdot \frac{B-0,0001}{Bx-0,0001} \\ Bx \leq B & f(B) = 0,09 \cdot f(C) \end{cases} \tag{6}$$

dengan,

$$Bx = 0,0004 + 0,0006 \cdot \frac{N-0,0020}{0,0080} \tag{7}$$

$$f(C) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{C}{0,80}\right) \tag{8}$$

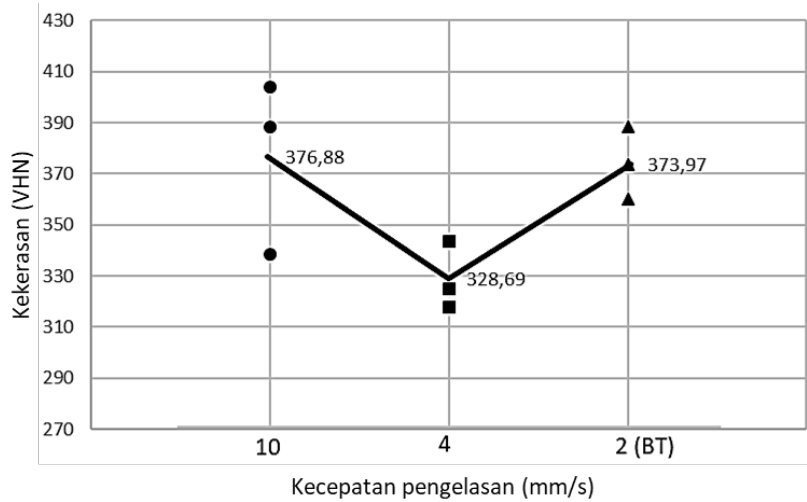
$$H_B = 145 + 130 \cdot \tanh(2,65 \cdot CE_{II} - 0,69) \tag{9}$$

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2,5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3} \tag{10}$$

$$t_B = \exp(6,2 \cdot CE_{III} - 0,74) \tag{11}$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} \tag{12}$$

Selain mendasarkan nilai kekerasan material pada perhitungan melalui metode Yurioka, dkk (1987), nilai kekerasan juga divalidasi dengan pengukuran secara langsung menggunakan alat uji kekerasan Vickers. Namun demikian, pelaksanaan uji nilai kekerasan ini hanya dilakukan pada 3 sampel yang dinilai cukup mewakili keseluruhan spesimen pada variabel pengujian yang dilakukan. Hasil Pengukuran secara langsung ini dapat dilihat pada Gambar 6 dan nilai interpolasi yang diperlukan untuk menentukan batas aman 350 VHN dituangkan dalam Tabel 4 pada kolom (8).

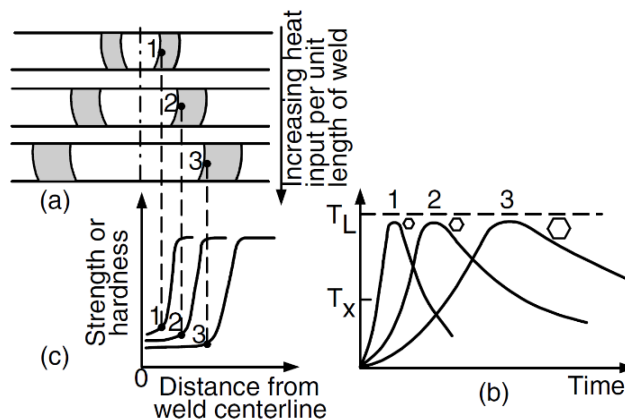


Gambar 6. Hasil Pengukuran Kekerasan Vickers pada HAZ

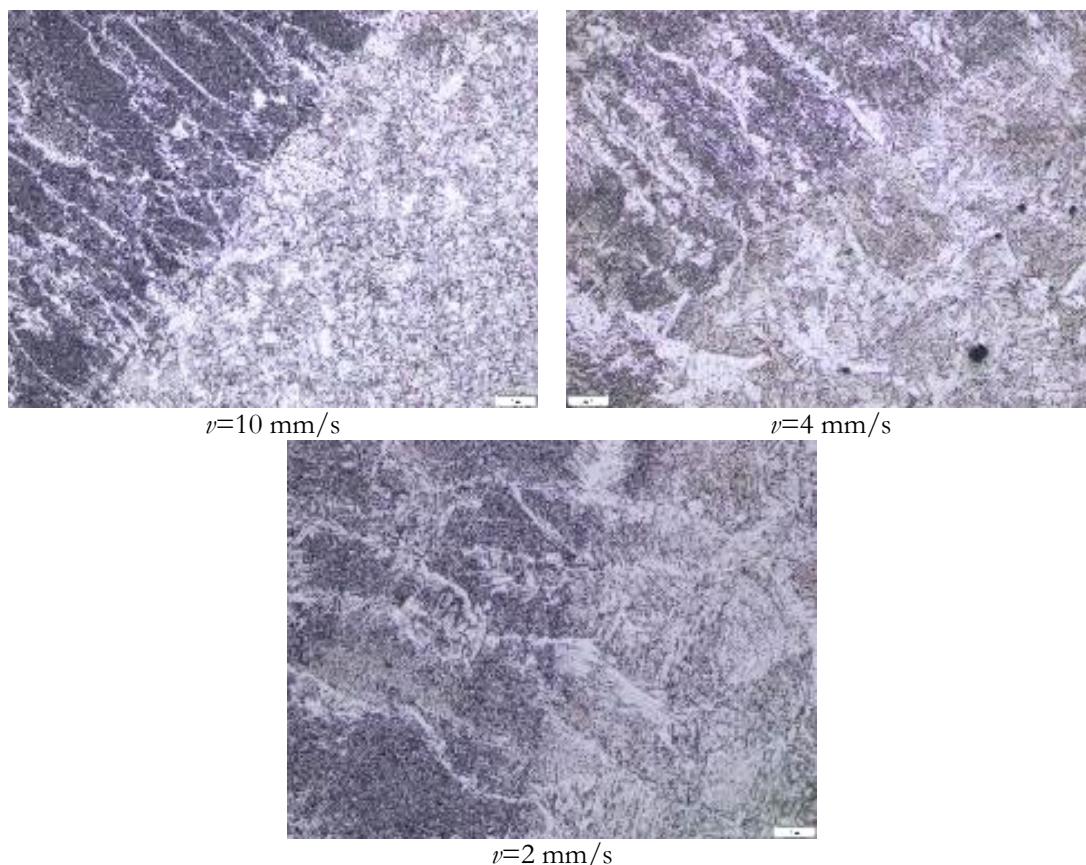
Peningkatan nilai kekerasan pada sampel dengan kecepatan pengelasan 2 mm/s yang mengalami *burn-through* disebabkan karena sesaat setelah *burn-through* terjadi, proses pengelasan langsung dihentikan, sehingga *heat input* berhenti seketika. Sementara itu, penghentian aliran fluida tidak serta merta langsung berhenti mengingat bahwa fluida dalam pipa adalah fluida bertekanan yang mengalami *depressurizing*. Proses penurunan tekanan ini membuat pendinginan masih berlangsung ketika *heat input* telah berhenti. Hal ini menyebabkan spesimen mengalami pendinginan secara tiba-tiba sebagaimana efek pada proses *quenching* yang mengakibatkan nilai kekerasan meningkat jika dibandingkan dengan nilai kekerasan pada parameter kecepatan sebelumnya (4 mm/s).

3.3. Struktur Mikro

Semakin rendah kecepatan pengelasan, maka semakin tinggi *heat input* yang diberikan. Dengan meningkatnya *heat input*, maka laju pendinginan pada material akan menurun. Semakin tinggi *heat input* yang diberikan, maka akan semakin tinggi pula temperatur puncak pada material di HAZ dan semakin banyak waktu bagi material untuk berada pada temperatur tinggi. Dengan demikian, ukuran butir pada HAZ akan semakin besar pula. Efek dari besaran *heat input* terhadap kekuatan HAZ dapat dilihat pada Gambar 7. Hal ini dapat menjelaskan ukuran butir pada HAZ yang ditunjukkan pada Gambar 8 yang semakin besar dengan semakin meningkatnya besaran *heat input* yang merupakan manifestasi dari menurunnya kecepatan pengelasan.



Gambar 7. Efek *heat input* pada (a) lebar HAZ (b) siklus termal dan ukuran butir HAZ (c) profil kekerasan (Kou, 2003)



Gambar 8. Komparasi ukuran grain pada *fusion zone* dan HAZ (perbesaran 200x)

Tabel 4. Hasil Pengukuran dan Perhitungan

No.	Debit Alir Fluida (lpm)	Kecepatan Pengelasan (mm/s)	Heat Input per satuan panjang		$\Delta t_{8/5}$ (detik)	Kekerasan HAZ (VHN)	
			(J/mm)	(kJ/mm)		Yurioka, dkk (1987)	Pengukuran Spesimen Uji
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1		10	303,1379	0,3031	2,1881	1134,1405	376,88
2		8	415,2639	0,4153	2,7877	629,9225	360,30**
3	15,4	6	538,8319	0,5388	3,4207	416,6273	342,03**
4		4	783,8015	0,7838	4,1301	348,4588	328,69
5		3	1117,4986	1,1175	4,5280	327,6413	
6		2	1690,6907	1,6907	N/A	N/A	373,97

** nilai yang didapatkan dari interpolasi dengan basis besaran *heat input*.

3.4. Parameter Rekomendasi

Parameter pengelasan yang direkomendasikan adalah rentang nilai tertentu yang dinilai aman untuk dilakukan pengelasan. Rentang parameter yang aman ini memiliki dua batasan, yaitu batas atas yang merupakan besaran nilai heat input yang diaplikasikan saat proses pengelasan berlangsung sampai dengan terjadinya burn-through dikalikan dengan faktor keamanan (safety factor) 80% dan batas bawah yang merupakan besaran heat input yang memadai untuk melakukan pendinginan dalam jangka waktu tertentu agar meminimalisasi timbulnya hydrogen crack pada kekerasan lebih dari 350 VHN (Fischer dkk., 1981).

Pada Tabel 4 kolom (8), interpolasi dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan pada HAZ pada kecepatan pengelasan 8 mm/s dan 6 mm/s. Interpolasi dilakukan secara linear dengan basis heat input untuk mengetahui letak batas bawah nilai yang dapat diterima, yaitu nilai kekerasan kurang dari 350 VHN. Nilai batas bawah ini didapatkan ketika pengelasan dilakukan pada kecepatan 6 mm/s dengan nilai heat input 0,5388 kJ/mm yang menghasilkan nilai kekerasan 342,03 VHN yang dapat diterima. Sedangkan nilai kekerasan pada kecepatan pengelasan 2 mm/s yang mengalami anomali sebagaimana dijelaskan pada angka 3.2, dinilai tidak relevan dijadikan

acuan dalam menentukan batas penerimaan 350 VHN karena pada nilai ini telah terjadi kegagalan lain yang digunakan sebagai batas atas penerimaan, yaitu terjadi burn-through.

Dari Tabel 5, dapat dituliskan batas bawah, batas atas, dan batas aman rekomendasi heat input berdasarkan nilai tingkat kekerasan material yang dibentuk maksimal sebesar 350 VHN yang terbentuk pada $\Delta t_{8/5}$ selama 4,1055 detik dengan mengambil nilai sebesar 0,7513 kJ/mm yang didapatkan pada kecepatan pengelasan sekitar 4 mm/s. Batas atas yang digunakan adalah nilai saat percobaan mengalami burn-through. Nilai batas atas yang ini dikoreksi dengan safety factor (SF) sebesar 80% dari nilai batas atas atau sebesar 1,3526 kJ/mm.

Nilai rekomendasi *heat input* di atas merupakan nilai yang didapatkan berdasarkan perhitungan menggunakan formula yang dikembangkan oleh Yurioka, dkk (1987). Nilai ini dikomparasi berdasarkan hasil pengukuran spesimen uji dan interpolasi berbasis besaran *heat input* sebagaimana tertuang dalam Tabel 4 kolom (8). Sehingga, pada material pipa API 5L X52 yang dialiri fluida dengan dinding pipa yang memiliki sisa ketebalan 4 mm, direkomendasikan untuk melakukan pengelasan dengan metode *weld-deposition* pada pipa *on-service* dengan mengaplikasikan *heat input* pada rentang 0,5388 kJ/mm sampai dengan 1,3526 kJ/mm untuk debit alir fluida air 15,4 lpm untuk menghindari potensi timbulnya *hydrogen crack* dan *burn-through* sebagaimana tertulis dalam Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Batas yang Direkomendasikan dari Berbagai Besaran Debit Alir Fluida

Debit Alir Fluida (lpm)	Heat Input (kJ/mm)				Keterangan
	Batas Bawah	Batas Bawah (Koreksi)	Rekomendasi Batas Aman (SF 80%)	Batas Atas	
15,4	0,7513	0,5388	1,3526	1,6907	Terjadi burn-through pada nilai batas atas

4. KESIMPULAN

Berdasarkan studi eksperimental pengendalian *heat input* guna pencegahan *burn-through* pada perbaikan pipa dengan metode *weld-deposition* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. *Heat input* yang diaplikasikan pada proses pengelasan dengan metode GMAW dihasilkan secara otomatis oleh mesin las Tenjima model 200S yang secara umum semakin meningkatnya *heat input*, maka semakin tinggi pula temperatur puncak pada grafik profil temperatur pada kampuh lasan.
2. *Burn-through* dapat terjadi apabila *heat input* yang diberikan terlalu tinggi. Terjadinya *Burn-through* dapat diakibatkan oleh penurunan kekuatan dinding pada pipa, yang menyebabkan dinding pipa tidak mampu menahan tekanan fluida yang mengalir.
3. Pada material pipa API 5L X52 yang dialiri fluida dengan dinding pipa yang memiliki sisa ketebalan 4 mm, direkomendasikan untuk melakukan pengelasan dengan metode *weld-deposition* pada pipa *on-service* dengan mengaplikasikan *heat input* pada rentang 0,5388 kJ/mm sampai dengan 1,3526 kJ/mm untuk debit alir fluida air 15,4 liter/menit untuk menghindari potensi timbulnya *hydrogen crack* dan *burn-through*.

Selanjutnya, metode pengelasan dengan *weld-deposition* dapat dilakukan dengan arah pengelasan lain, misalkan dengan arah sirkumferensial (arah melingkar pipa) atau secara *raster* untuk membentuk luasan area untuk memperluas validitas kajian.

5. DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Industry, 2007, *ANSI/API Specification 5L: Specification for Line Pipe* 44th Edition, Washington.
- Bailey, N., 1970, *Welding Procedures for Low Alloy Steels*, The Welding Institute Cambridge, England.
- Boring M.A., Zhang W., Bruce W.A., 2008, *Improve Burnthrough Prediction Model for In-Service Welding*. Proceedings of ICP 2008, 7th International Pipeline Conference, Calgary.
- Bruce, W. A, Amend, W.E., 2009, *Guidelines for Pipeline Repair by Direct Deposition of Weld Metal*, WTIA/APIA Welded Pipeline Symposium, Welding Institute of Australia, Sydney, Australia.
- Cola, M. J., Threadgill, P. L., 1988, *Final Report on Criteria for Hot Tap Welding*, American Gas Association, Edison Welding Institute Project J7038.
- Fischer, R. D., Kiefner, J. F., Whitacre, G. R., 1981, *User Manual for Model 1 & Model 2 Computer Programs for the Predicting Critical Cooling Rates and Temperatures During Repair and Hot Tap Welding on Pressurised Pipelines*, Battelle Memorial Institute Report, Columbus.
- Kou, Sindo, 2003, *Welding Metallurgy 2nd Edition*, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken
- Rykalın, N.N., 1957, *Berechnung der Wärmevergänge beim Schweißen*, VEB Verlag Technik, Berlin, (Original: 1951, *Raschetny Teplotnykh Protsesov Pri Svarke*, Mashgiz, Moscow)

- Wade, J.B., 1978, *Hot Tapping of Pipelines*, Australian Welding Research Association Research Report, Snowy Mountains Corporation, Melbourne.
- Yurioka, N., Okumura, M., Kasuya, T., Cotton, H.J.U., 1987, *Prediction of HAZ Hardness of Transformable Steels*, Metals Construction, Vol 19, pp. 217R - 223R.

Analisis Numerik Dispersi Kebocoran Gas *Pipeline* Dalam Variasi Tekanan dan Tipe Lapisan Timbunan

F. Fikri* dan Fauzun

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: furqanul.fikri@gmail.com

Abstrak

Dalam kegiatan penyaluran gas melalui *pipeline*, upaya untuk menjaga kesinambungan, kehandalan dan keamanan penyaluran gas menuntut strategi pencegahan melalui inspeksi dan pemeliharaan secara rutin. Identifikasi, pengetahuan, pengendalian risiko, dan proses penanganan yang cepat saat terjadi kebocoran gas menjadi upaya yang terus dioptimalkan. Penelitian dispersi kebocoran gas melalui *pipeline* di media berpori perlu dikembangkan agar jangkauan dan pola dispersi kebocoran gas pada permukaan tanah dapat diketahui. Selain itu, saat inspeksi di jalur *pipeline* ditemukan indikasi kebocoran gas, maka posisi kebocoran pada *pipeline* dapat dipredikasi melalui pola konsentrasi gas yang diukur. Model simulasi *pipeline* tiga dimensi menggunakan *software* Ansys Fluent telah dikomparasi dan divalidasi dengan penelitian serupa, sehingga layak untuk disimulasikan dalam beberapa variasi tekanan operasi penyaluran gas alam, dan permeabilitas tanah (variasi lapisan timbunan *pipeline*). Konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* dianalisis menjadi 5 (lima) area yang masing-masing area memiliki perbedaan radius 0,5 meter. Hasil penelitian ini nilai konsentrasi gas di permukaan aspal pada kisaran total 70%Vol untuk radius 2,5 meter dari titik kebocoran *pipeline*. Selanjutnya, titik kebocoran pada *pipeline* dapat diperkirakan melalui pengukuran pusat konsentrasi gas.

Kata kunci : *computational fluid dynamics (CFD), kebocoran gas alam, jaringan pipeline gas.*

Abstract

In pipelines gas distribution, some efforts to maintain the continuity, reliability, and safety of gas distribution require prevention strategies such as routine inspections and maintenance. Identification, knowledge, risk control, and fast recovery when a gas pipeline leakage occurs is an effort that continues to be optimized. Research related to the dispersion of gas pipeline leakage in porous media needs to be developed so that the range and pattern of gas leak dispersion at the ground surface can be known. Besides, when a pipeline leak survey shows an indication of gas leakage, the pipeline leak position can be predicted by measuring the gas concentration pattern. The simulation model utilized with Ansys-Fluent software has been compared and validated with similar research, so it is feasible to simulate several variations in operating pressure, and soil permeability (variations in pipeline backfill layers). The gas concentration on the surface of the pipeline backfill layer was analyzed into 5 (five) areas, each of them has a radius difference of 0.5 meters. This research obtained that the gas concentration on the asphalt surface in the total range of 70% Vol for the radius up to 2.5 meters from the pipeline leakage point. Then, the pipeline leak point position could be estimated by measuring the center of gas concentration.

Keywords : *computational fluid dynamics (CFD), natural gas leakage, gas pipeline.*

1. PENDAHULUAN

Kebocoran gas merupakan kejadian yang sangat dihindari karena berdampak langsung pada bisnis penyaluran gas dan keamanan pihak ketiga atau masyarakat. Berbagai upaya perlu dilakukan untuk meningkatkan kewaspadaan dan memberikan peringatan kepada pihak ketiga atau masyarakat terkait risiko bahaya ketika beraktivitas di sekitar *pipeline*. Penelitian ini dikhususkan pada *pipeline* polyethylene (PE) karena secara geografis *pipeline* PE menjangkau lokasi perumahan masyarakat, kawasan komersial, pinggir jalan raya dan lokasi aktivitas masyarakat lainnya. Selain itu, *Pipeline* PE rawan mengalami kebocoran di sambungan-sambungan seperti pada *tapping saddle, coupler, tee, end cap* dan *elbow* ketika mengalami beban dinamik, maupun proses penyambungan yang tidak baik pada saat konstruksi. Dari segi sifat materialnya, *pipeline* PE mudah tersayat jika terkena benda tajam dan hal ini akan sangat mempengaruhi kekuatannya.

Kontrol dan pengendalian aktivitas masyarakat sangat sulit dilakukan misalnya kepada pedagang kaki lima, penjual makanan, bengkel ban, dan aktivitas lainnya yang berpotensi menimbulkan api dan kebakaran terutama saat terjadi kebocoran gas pada *pipeline* PE tersebut. Dasar analisis keteknikan menjadi suatu acuan yang kuat untuk mensosialisasikan batasan wilayah yang harus dihindari oleh masyarakat di sekitar *pipeline* gas.

Beberapa penelitian terkait analisis kebocoran gas secara teoritis dan matematik telah dilakukan oleh Montiel dkk. (1998), Yuhu dkk. (2003), dan Huang dkk. (2012). Namun dalam penelitian ini masih terbatas pada analisis satu dimensi, dan kondisi *pipeline* tidak tertanam tanah.

Karakteristik pergerakan hidrogen di dalam tanah dan di permukaan tanah dilakukan oleh Okamoto dkk. (2014) dengan membangun suatu model eksperimen pengukuran kebocoran gas hidrogen dan pemodelan simulasi numerik. Model fisik eksperimen dan hasil penelitian Okamoto dkk. (2014) akan digunakan sebagai acuan untuk validasi model simulasi CFD dalam penelitian ini.

Moghadam dkk. (2016) melakukan investigasi kebocoran gas dari *pipeline* yang tertanam di tanah dan di atas tanah. Investigasi tersebut dilakukan melalui simulasi numerik dua dimensi dalam kondisi aliran turbulen dan *steady*. Dalam penelitian-penelitian terkait sebelumnya, panjang pipa setelah titik kebocoran tidak dijadikan sebagai pertimbangan dalam perhitungan atau analisis, hal ini diinvestigasi oleh Moghadam dkk. (2016) karena menjadi penyebab ketidakakurasian dalam perhitungan laju alir kebocoran pada *pipeline*.

Moghadam dkk. (2018) melanjutkan penelitian kebocoran gas pada *pipeline* tertanam tanah dan di atas tanah yang diinvestigasi secara numerik dalam model dua dan tiga dimensi. Simulasi dilakukan dalam beberapa kombinasi variabel yaitu diameter *pipeline*, tekanan gas dan diameter kebocoran untuk kemudian dilakukan analisis untuk memperoleh persamaan laju alir kebocoran gas. Dalam penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa analisis numerik tiga dimensi lebih baik dalam analisis kebocoran *pipeline*.

Dalam penelitian-penelitian sebelumnya belum dilakukan analisis numerik tiga dimensi untuk menganalisis pola dispersi kebocoran gas alam dari *pipeline* dalam tanah dan dikombinasikan dengan pola dispersi gas di permukaan tanah, sehingga dapat diperoleh konsentrasi dan area berbahaya dalam kombinasi beberapa parameter tekanan operasi gas alam 4 barg, 1 barg dan 100 mbarg, serta permeabilitas tanah untuk kondisi instalasi *pipeline* tertanam dalam tanah yang tertanam di lapisan tanah-*crushed stone*-aspal dan *Pipeline* tertanam di lapisan tanah.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan *software* Ansys Fluent untuk simulasi model CFD melalui serangkaian proses komparasi, dan validasi serta dilanjutkan dengan simulasi model yang sama untuk kombinasi parameter terkait kebocoran pada *pipeline* yaitu tekanan operasi gas alam, dan kondisi lapisan timbunan *pipeline*.

2.1. Landasan Teori

Computational Fluid Dynamics (CFD) mampu memprediksi seluruh hal yang berhubungan dengan fluida seperti: aliran fluida, transfer panas, reaksi kimia dan lain-lain melalui penyelesaian secara numerik persamaan matematika yang telah disusun. Pembentukan persamaan matematika aliran fluida berasal dari hukum fisika konservasi massa, momentum dan energi. Dalam pemodelan media berpori, solusi analisis numerik diperoleh melalui penurunan persamaan momentum dan penambahan istilah sumber momentum (*source*, S) ke persamaan standar aliran fluida. *Source* terdiri atas *viscous loss* (Darcy) dan *inertia loss* yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (1)$$

Untuk media berpori yang homogen dimana α merupakan *permeability*, maka persamaan (1) di atas menjadi:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (2)$$

Melalui korelasinya dengan persamaan Ergun, dapat dibentuk persamaan yang secara empirik dapat digunakan pada rentang nilai Reynolds yang lebar dan berbagai jenis media berpori sebagai berikut:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150 \mu (1 - \epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v_\infty + \frac{1.75 \rho (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} v_\infty^2 \quad (3)$$

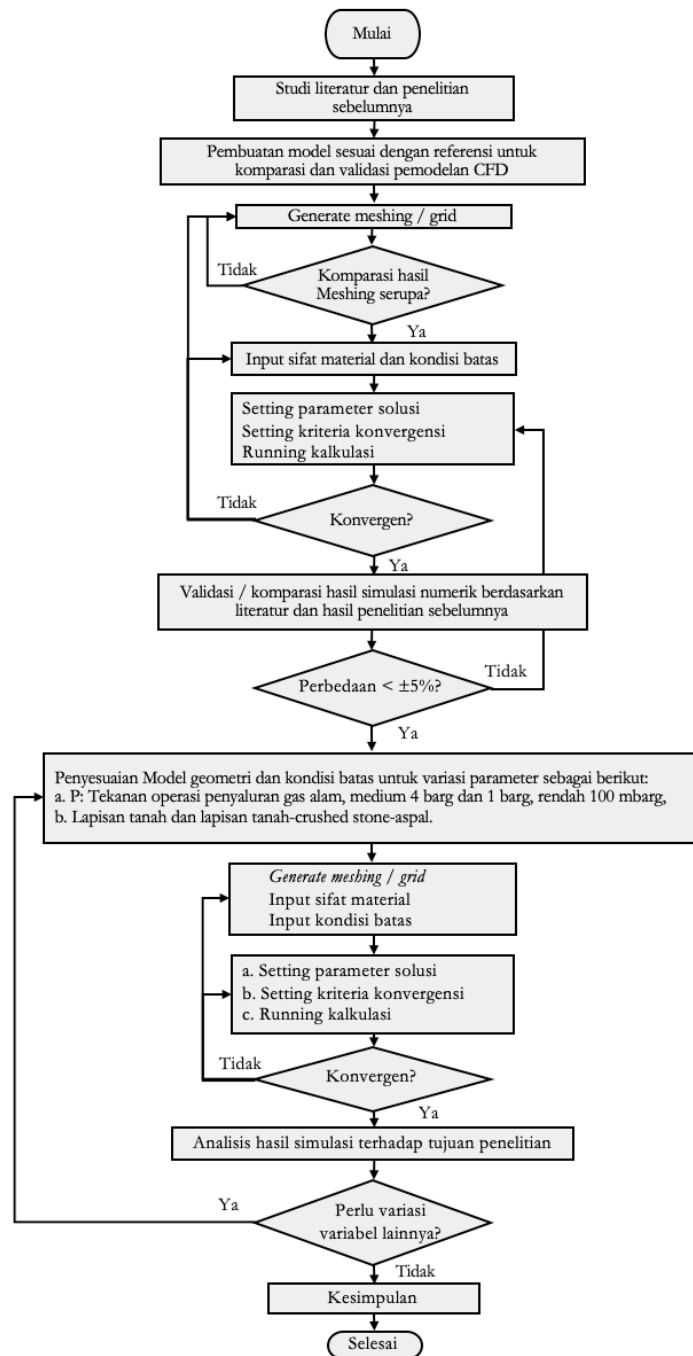
Lalu nilai *permeability* (α) dan koefisien *inertial loss* (C_2) dengan D_p diameter rata-rata partikel dan ϵ porositas ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \tag{4}$$

$$C_2 = \frac{3.5 (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} \tag{5}$$

2.2. Prosedur Penelitian dan Simulasi CFD

Pada Gambar 1 terlihat prosedur penelitian dengan proses utamanya yaitu simulasi CFD.

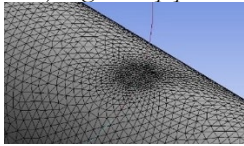


Gambar 1. *Flowchart* prosedur penelitian

2.3. Komparasi Kasus Kebocoran Gas Pada Pipeline Kondisi Tidak Tertanam Media berpori

Simulasi CFD ini bertujuan untuk melakukan Komparasi Kasus (“KK”) penelitian Moghadam dkk. (2018) dalam kasus kebocoran pipeline tidak tertanam media berpori (tanah). Tujuan dari komparasi ini yaitu membandingkan nilai laju alir massa kebocoran gas sesuai dengan variasi jumlah cells model pipeline yang mengalami kebocoran gas seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Komparasi Geometri dan Hasil Meshing

No.	Pembanding	Moghadam dkk. (2018)	Penelitian
1	Geometri	<ul style="list-style-type: none"> Diameter pipeline (D): 163,6 mm Diameter kebocoran (d): 30 mm Tekanan (P): 5 bara Posisi kebocoran: 3000 mm dari ujung inlet pipeline 	<ul style="list-style-type: none"> Diameter pipeline (D): 163,6 mm Diameter kebocoran (d): 30 mm Tekanan (P): 5 bara Posisi kebocoran: 3000 mm dari ujung inlet pipeline
2	Meshing lubang kebocoran pipeline	Tidak dijelaskan	 <p>face sizing 2 mm.</p>
3	Jumlah Cells	<ul style="list-style-type: none"> KK1: 240.642 KK2: 599.493 KK3: 1.601.839 KK4: 1.909.518 	<ul style="list-style-type: none"> KK1: 239.555 KK2: 595.350 KK3: 1.601.043 KK4: 1.907.129

Data-data simulasi penelitian yang dilakukan Moghadam dkk. (2018) akan digunakan untuk proses simulasi CFD yang sama. Untuk data-data yang tidak dijelaskan secara detail oleh Moghadam dkk. (2018), maka peneliti menentukan sendiri sesuai dengan langkah-langkah dalam proses simulasi CFD. Hasil simulasi CFD dan komparasi laju alir massa kebocoran gas dari pipeline ditampilkan dalam Tabel 2 berikut.

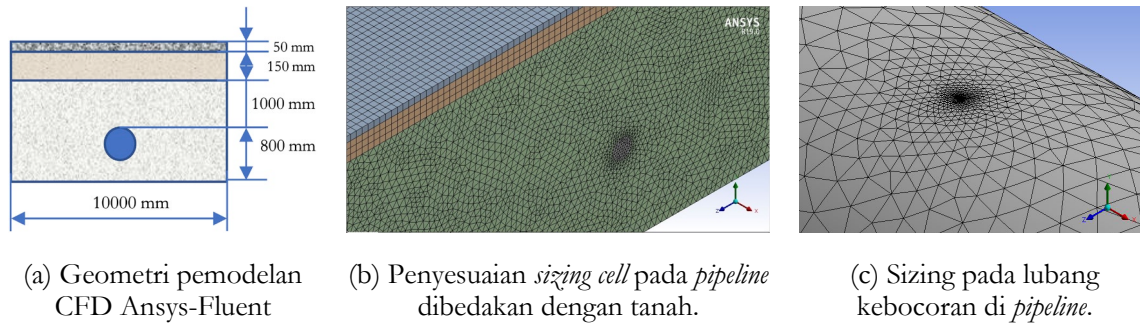
Tabel 2. Hasil Komparasi Laju Alir Massa Kebocoran Gas dari Pipeline

Pembanding	Moghadam dkk. (2018)		Penelitian		
	Mass flow ⁽¹⁾	Deviasi ⁽²⁾	Mass flow ⁽³⁾	Deviasi ⁽⁴⁾	Deviasi ⁽⁵⁾
KK1	0,6413	-	0,5822	9,21%	-
KK2	0,6041	5,80%	0,5872	2,79%	0,86%
KK3	0,585	3,16%	0,5827	0,40%	0,78%
KK4	0,5834	0,27%	0,5825	0,15%	0,02%
		Deviasi ⁽²⁾ : perbedaan relatif mass flow antara KK2 dan KKI, KK3 dan KK2, serta KK4 dan KK3		Deviasi ⁽⁴⁾ : (3)-(1) / (1)	Deviasi ⁽⁵⁾ : perbedaan relatif mass flow antara KK2 dan KKI, KK3 dan KK2, serta KK4 dan KK3

Hasil komparasi simulasi CFD menunjukkan deviasi dengan peneliti sebelumnya yang sangat rendah pada KK4 yaitu 0,15%, sehingga dalam penelitian ini tercapai sesuai target yaitu <5%.

2.4. Validasi Analisa Numerik Kebocoran Gas Pada Pipeline Tertanam Media berpori Mengacu Eksperimen Okamoto dkk. (2014)

Proses validasi simulasi CFD berdasarkan eksperimen Okamoto dkk. (2014) mengenai karakteristik distribusi dan konsentrasi yang berasal dari kebocoran gas hidrogen di dalam dan di permukaan tanah. Beberapa data utama yang digunakan dalam proses validasi ini yaitu gas Hidrogen dengan Specific gravity (SG) 0,07, laju kebocoran 1000 (cc/min), tekanan kebocoran 0,2 (kPa), posisi kebocoran 1,2 meter dari permukaan tanah. Geometri dan hasil meshing pemodelan CFD Ansys-Fluent menyesuaikan dengan kondisi eksperimen yang berukuran 10 m x 10 m seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri dan Hasil Meshing Simulasi *Pipeline* Tertanam Tanah

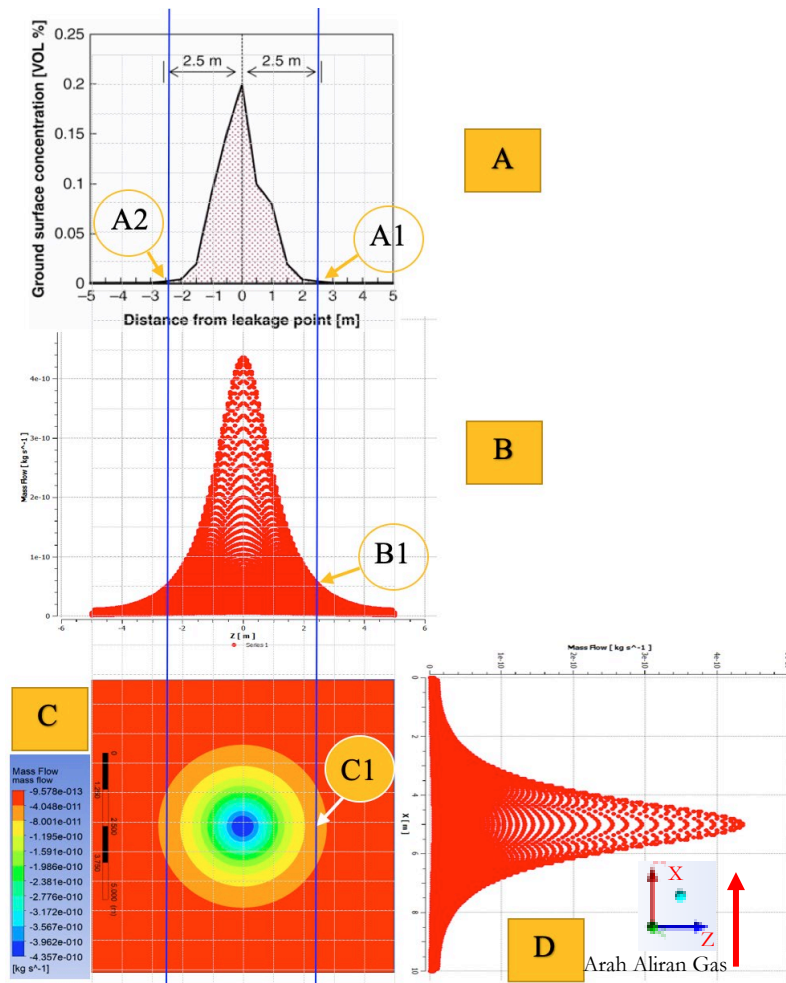
Model ini adalah simplifikasi set-up eksperimen menjadi bentuk geometri kebocoran *pipeline* dalam lapisan timbunan yang terdiri atas tanah 1800 mm, *crushed stone* 150 mm dan aspal 50 mm sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 2 (a). Karena ukuran diameter *pipeline* (D) dan diameter kebocoran (d) sumber gas Hidrogen tidak disebutkan dalam referensi, maka dilakukan simulasi CFD variasi ukuran D dan d untuk mendapatkan nilai laju kebocoran pada sisi *inlet pipeline* yang mendekati nilai pengaturan kebocoran gas Hidrogen melalui *leak rate control* sebesar 1000 cc/min, sehingga diperoleh ukuran D = 55 mm dan d = 10 mm dengan nilai 971,42 cc/min (perbedaan relatif sebesar 2,86%).

Pengaturan zona dalam simulasi CFD kebocoran *pipeline* dalam lapisan tanah-*crushed stone*-aspal yaitu untuk *pipeline* berupa fluida dengan material hidrogen dan lapisan timbunan sebagai zona berpori (*porous media*) dengan resistansi yang sama di segala arah. Perhitungan nilai *viscous* dan *inertial resistance* ditentukan menggunakan persamaan 4 dan persamaan 5 dengan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *Viscous* dan *Inertial Resistance* Lapisan Timbunan *Pipeline*

Lapisan Timbunan <i>Pipeline</i>	Porositas (%), Diameter Partikel Rata-rata	Gas Permeability (m ²)	Viscous resistance (1/m ²)	Inertial resistance (1/m)
Aspal	7,5	3,59 x 10 ⁻¹²	2,786.E ⁺¹¹	7343165,1
<i>Crushed Stone</i>	22,1, D ₅₀ = 6.2 mm	4,07 x 10 ⁻¹¹	2,457.E ⁺¹⁰	40741,498
Tanah	22,6, D ₅₀ = 0.9 mm	1,40 x 10 ⁻¹¹	7,143.E ⁺¹⁰	260760,12

Hasil simulasi model kebocoran *pipeline* hidrogen diameter D=55 mm dan diameter kebocoran d=10 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Acuan proses validasi hasil simulasi CFD terhadap eksperimen Okamoto dkk. (2014)

Gambar 3 bertujuan untuk memvalidasi simulasi CFD terhadap penelitian Okamoto dkk. (2014). Keterangan notasi-notasi yang ditunjukkan dalam Gambar 3 tersebut adalah sebagai berikut:

- A: Hasil pengukuran konsentrasi hidrogen di permukaan tanah yang dapat terukur sekitar $\pm 2,5$ m dari titik pusat kebocoran sesuai dengan kemampuan peralatan gas detektor yang digunakan dalam eksperimen Okamoto dkk. (2014).
- B: Kurva laju alir massa di domain permukaan tanah dalam arah sumbu Z atau arah tegak lurus *pipeline*.
- C: Gambar kontur laju aliran massa di permukaan lapisan aspal
- D: Kurva laju alir massa di domain permukaan tanah dalam arah sumbu X atau sejajar *pipeline*.

2.5. Analisis dan Verifikasi Kebocoran Hidrogen di Permukaan Aspal

Berdasarkan hasil eksperimen Okamoto dkk. (2014) bahwa konsentrasi gas Hidrogen sekitar $\pm 2,5$ m dari titik pusat kebocoran pada nilai sebesar 0,008 vol% yaitu pada titik A1 dan A2 sesuai kemampuan identifikasi gas detektor. Titik A1 yang direfleksikan pada gambar B di titik B1 dan gambar C di titik C1, menunjukkan kesesuaian penurunan konsentrasi gas Hidrogen.

Secara khusus validasi hasil simulasi dengan membandingkan nilai konsentrasi hidrogen berdasarkan pengukuran di titik kebocoran yaitu sebesar 0,2 %vol seperti yang ditunjukkan pada kurva gambar A. Sedangkan untuk hasil simulasi CFD, pada Tabel 4 dari empat titik nilai laju alir massa terbesar dan bernilai sama digunakan sebagai referensi perhitungan konsentrasi hidrogen paling tinggi dan berada di titik kebocoran pipa dengan nilai $\%massa_{cfid} = 0,2730\%Vol$.

Tabel 4. Data Hasil Simulasi CFD Untuk Nilai Laju Alir Massa Tertinggi

Koordinat X (m)	Koordinat Z (m)	Mass Flow (kg/s)	Total Mass Flow (kg/s)	Mass Flow Lubang kebocoran (kg/s)	Konsentrasi
4,96	0,04	4,357.e ⁻¹⁰			
4,96	0,04	4,357.e ⁻¹⁰	1,743.e ⁻⁰⁹	6,38.e ⁻⁰⁷	0,2730%
5,04	-0,04	4,357.e ⁻¹⁰			
5,04	-0,04	4,357.e ⁻¹⁰			

Mengacu pada eksperimen hasil pengukuran konsentrasi hidrogen sebesar 0,2 vol%, maka konsentrasi volume hidrogen simulasi CFD yang dilakukan pada kondisi *steady state*, isothermal dan *density* hidrogen konstan sebesar %massa_{cfid} = %vol_{cfid} = 0,2730% dapat diasumsikan sama. Pelaksanaan pengukuran konsentrasi hidrogen menggunakan gas detektor diposisikan pada jarak sekitar 2 cm dari permukaan aspal dan bergerak dengan kecepatan 4 km/jam. Kondisi ini berbeda dengan hasil simulasi yang menghitung konsentrasi hidrogen tepat pada permukaan aspal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Asumsi Penelitian dan Penentuan Basis Data Simulasi

Beberapa asumsi dan penentuan basis data yang digunakan dalam simulasi CFD yaitu aliran gas *steady state*, tidak ada transfer panas, dan jenis fluida gas *pure methane* dengan nilai *density* yang digunakan yaitu 0,6679 kg/m³ dan *viscosity* 1,087e⁻⁵ kg/m-s sesuai dengan *database* Ansys Fluent. Penurunan tekanan di segmen *pipeline inlet* sampai dengan *outlet* diabaikan. Pengaturan fisik model yaitu *Pressure-based*, *Viscous Model Standard* k-ε, dan *Properties* media berpori mengacu pada Tabel 3. *Boundary* simulasi kebocoran *pipeline* dalam tanah sesuai dengan Tabel 5.

Tabel 5. Pengaturan *Boundary* Simulasi CFD

No.	Boundary	Pengaturan
1.	Sisi inlet <i>pipeline</i>	<i>Pressure Inlet</i>
2.	Lubang kebocoran <i>pipeline</i>	<i>Interior</i>
3.	Sisi ujung <i>pipeline</i>	<i>Pressure Outlet</i>
4.	Permukaan <i>pipeline</i>	<i>Wall</i>
5.	Permukaan media berpori	<i>Pressure outlet</i>
6.	Permukaan bawah media berpori	<i>Wall</i> , sebagai permukaan lapisan air di kondisi riil lapangan

3.2. Analisis Hasil Simulasi CFD Kebocoran *Pipeline* Pada Posisi Pukul 12

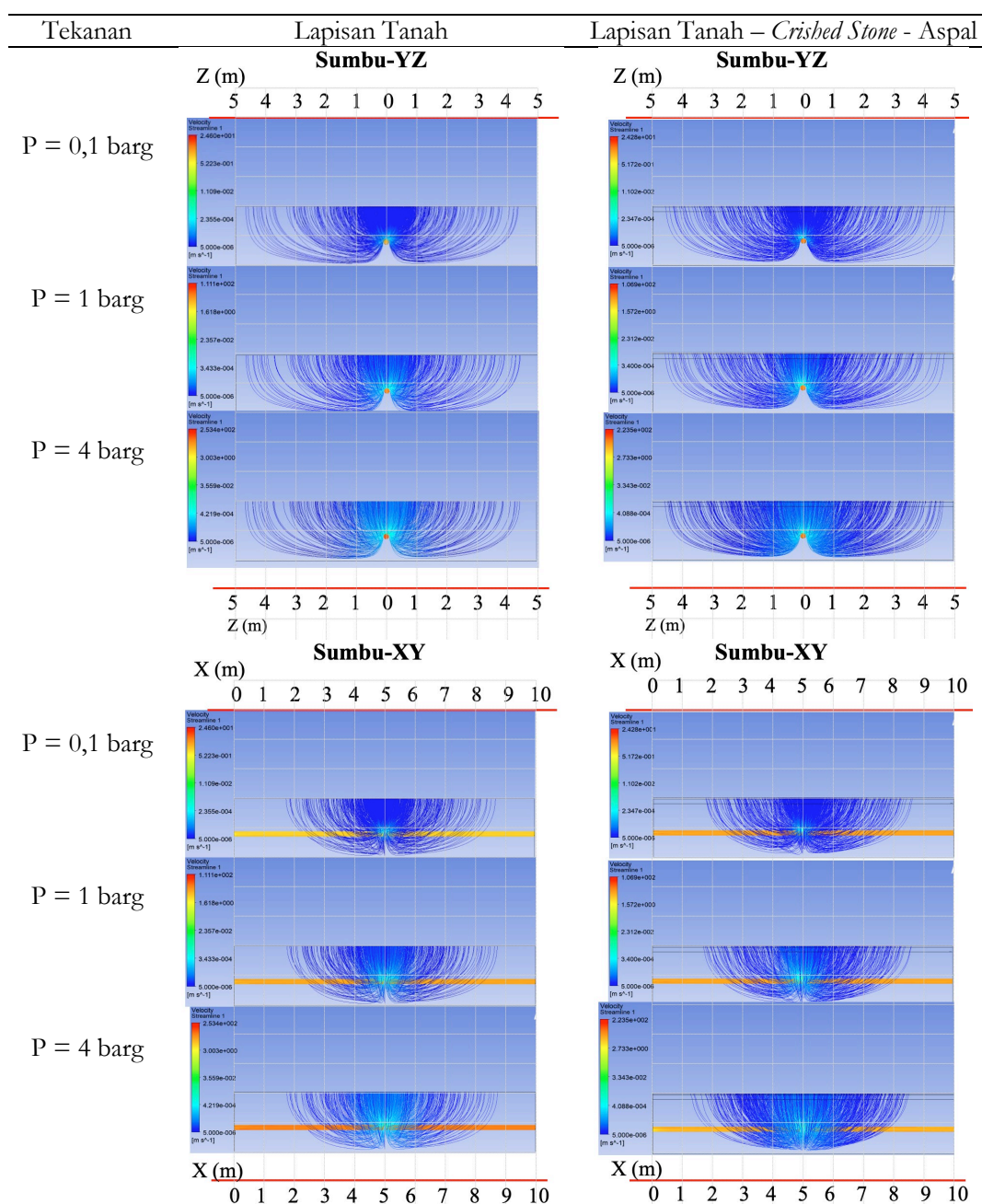
Berdasarkan data bentuk *streamline* dan kontur laju alir massa hasil simulasi CFD kebocoran gas *pipeline* dari lubang posisi pukul 12, analisis yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

- Dari kurva *streamline* Tabel 6 dan Gambar 4 melalui pandangan sumbu-YZ, sumbu-XY dan isometrik terlihat bahwa semakin besar tekanan gas dalam *pipeline* akan menyebabkan dispersi kebocoran gas (terlihat dari kerapatan *streamline*) baik untuk model tanah maupun model lapisan tanah-*crushed stone*-aspal akan semakin luas.
- Dari Gambar 5, pusat konsentrasi gas di permukaan timbunan berada pada titik yang sama dengan titik lubang kebocoran *pipeline* yaitu pada koordinat (X,Z) = (5,0) meter.
- Tekanan aliran gas dalam *pipeline* yang semakin besar akan menghasilkan laju aliran massa kebocoran gas pada lubang di *pipeline* semakin besar, dimana dari hasil simulasi CFD nilainya adalah sebagai berikut:
 - Model lapisan tanah secara berurutan pada tekanan 0,1 barg; 1 barg; dan 4 barg yaitu 2.2684.e⁻⁵ kg/s; 1,0317.e⁻⁴ kg/s; dan 2,2544.e⁻⁴ kg/s.
 - Model lapisan tanah-*crushed stone*-aspal secara berurutan pada tekanan 0,1 barg; 1 barg; dan 4 barg yaitu 2,2563.e⁻⁵ kg/s; 1,0257.e⁻⁴ kg/s; dan 2,2408.e⁻⁴ kg/s.
- Berdasarkan Gambar 5 kontur laju alir massa kebocoran gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* untuk setiap variasi tekanan dapat dievaluasi dan diperoleh hasil analisis antara lain:
 - Bentuk kontur dan kurva hasil simulasi lapisan tanah-*crushed stone*-aspal terlihat beraturan, sedangkan untuk lapisan tanah tidak beraturan, pembahasan akan dilanjutkan pada point 3.3.

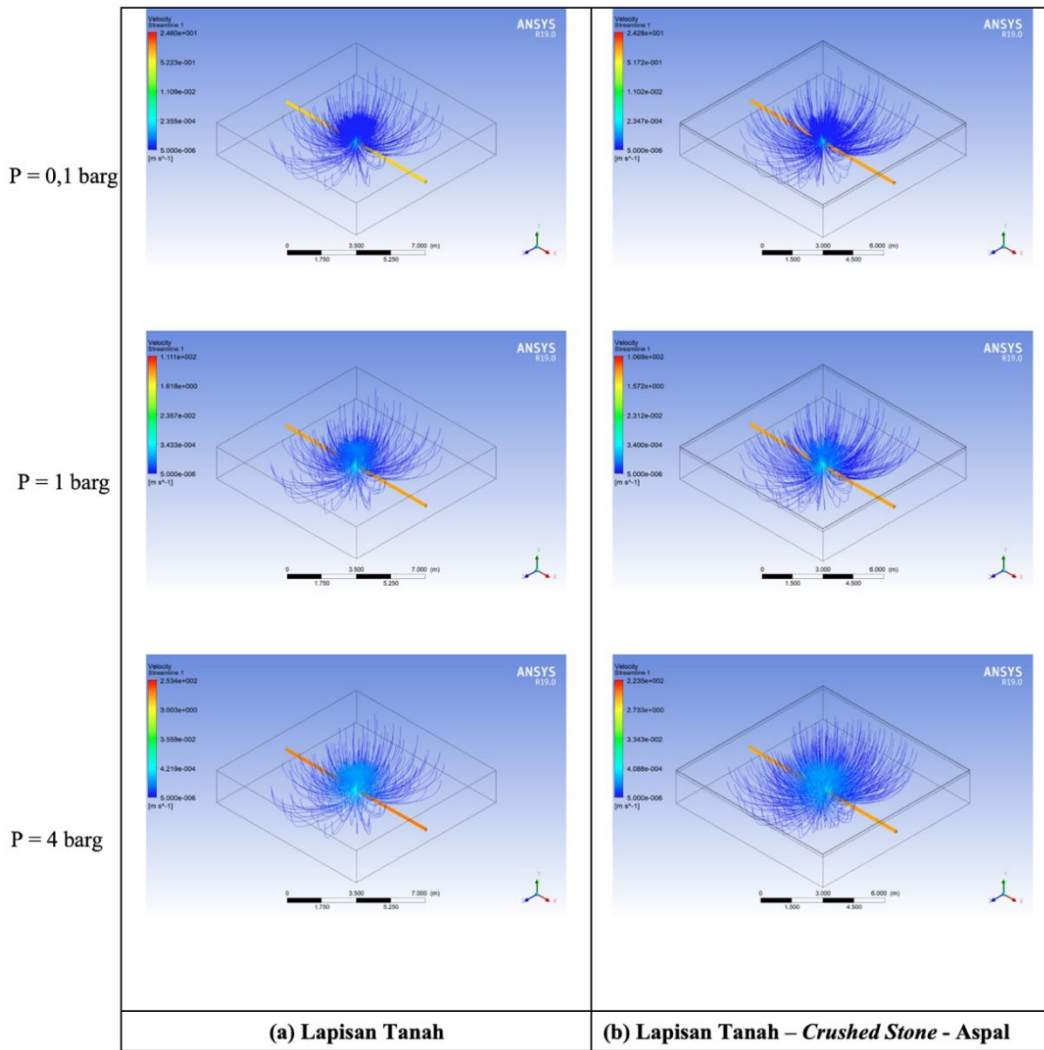
- Terdapat perbedaan laju aliran massa terbesar di permukaan timbunan antara lapisan tanah dan lapisan tanah-*crushed stone*-aspal, dimana untuk lapisan tanah memiliki nilai yang lebih kecil. Hal ini terjadi karena gas yang terdispersi tidak beraturan dalam lapisan tanah akan menyebar di media berpori. Kondisi ini ditunjukkan dengan beberapa puncak yang muncul pada kurva sumbu-X dan sumbu-Z. Perbedaan nilai laju alir maksimal di permukaan lapisan timbunan dapat terjadi karena peningkatan laju alir massa saat gas melalui *crushed stone* yang memiliki resistansi yang lebih rendah dibandingkan lapisan tanah. Meskipun di lapisan berikutnya gas akan melalui aspal yang memiliki resistansi tinggi, namun dengan ketebalan hanya 50 mm dibandingkan dengan *crushed stone* dengan ketebalan 150 mm, maka pada akhirnya berdasarkan hasil simulasi CFD nilai laju alir massa di permukaan model lapisan tanah-*crushed stone*-aspal lebih tinggi dibandingkan dengan model lapisan tanah.

Pada Tabel 6 di bawah ini dapat dilihat kurva streamline 3D pandangan tegak lurus pipeline (sumbu-YZ) dan sejajar pipeline (sumbu-XY) hasil simulasi lubang kebocoran posisi pukul 12.

Tabel 6. Kurva *Streamline* 3D Variasi Tekanan dan Tipe Lapisan Timbunan *Pipeline*

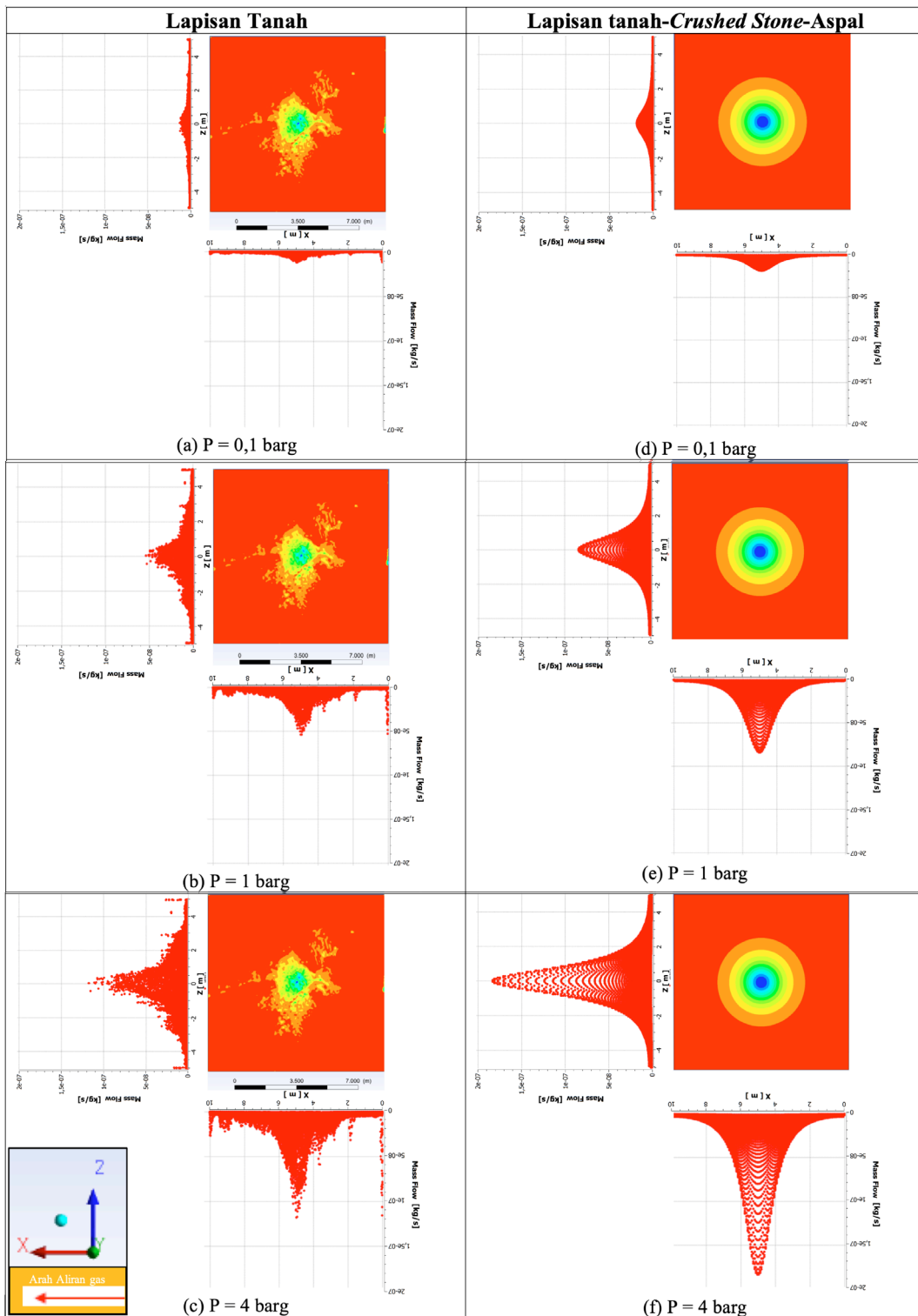


Untuk mendapatkan gambaran dispersi gas dalam tanah, tampilan 3D *streamline* pandangan secara isometrik untuk simulasi titik kebocoran pukul 12 adalah sebagai berikut.



Gambar 4. *Streamline* 3D Isometrik Kebocoran Pipeline Pukul 12

Pada Gambar 5 berikut ini terlihat kontur laju alir massa di permukaan masing-masing tipe lapisan timbunan *pipeline* pada variasi tekanan. Di sisi kiri gambar kontur adalah kurva nilai laju alir massa dalam arah sumbu-X dan di sisi bawah adalah kurva nilai laju alir massa dalam arah sumbu-Z.



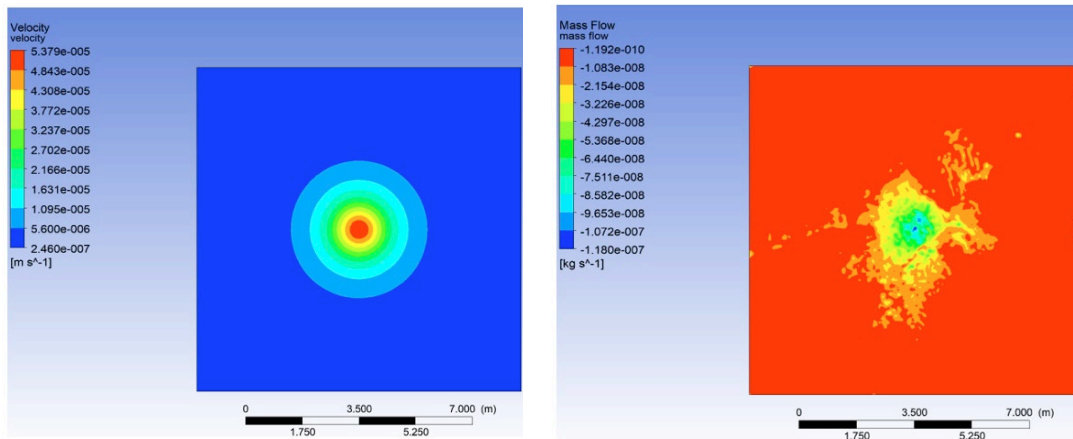
Gambar 5. Kontur Laju Alir Massa di Permukaan Timbunan *Pipeline* Untuk Setiap Variasi Tekanan dan Posisi Lubang Kebocoran Pukul 12

3.3. Analisis Dispersi Konsentrasi Kebocoran Gas di Permukaan Timbunan *Pipeline*

Dispersi gas di permukaan timbunan *pipeline* akan dianalisis pada jarak 2 – 3 meter dari posisi segaris dengan titik lubang kebocoran gas, karena pada gambar kontur laju aliran massa di permukaan tanah terlihat bahwa laju aliran massa gas yang terlepas ke udara semakin mengecil pada radius 3 meter dari titik kebocoran pada *pipeline*.

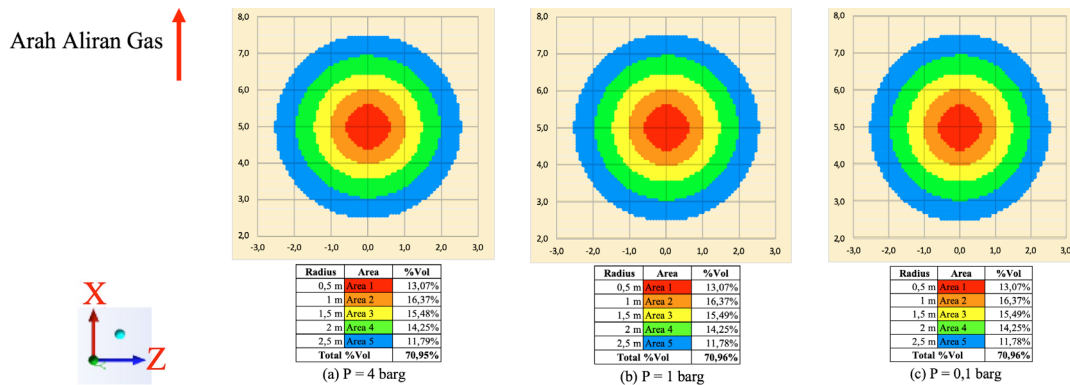
Analisis dispersi konsentrasi gas di permukaan tanah akan menggunakan data laju aliran massa pada model Lapisan Tanah–*Crushed Stone*–Aspal, karena berdasarkan data hasil simulasi CFD, kontur laju aliran massa gas dan nilainya pada sumbu-X dan sumbu-Z menunjukkan pola yang beraturan. Hal ini berbeda dengan data laju aliran

massa gas di permukaan untuk model lapisan tanah yang memiliki nilai yang tidak beraturan. Terkait hal ini, peneliti melakukan pengecekan dengan data kecepatan di permukaan untuk memastikan apakah kondisi ini terjadi karena bentuk grid dalam proses *meshing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Kontur Kecepatan (kiri) dan Laju Alir Massa Kebocoran Gas (kanan) di Permukaan Timbunan *Pipeline* Lapisan Tanah pada P = 4 barg

Konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* merupakan nilai yang diperoleh dari kondisi *steady state* laju aliran massa kebocoran gas. Area yang dianalisis terbagi menjadi 5 (lima) area dalam radius setiap 0,5 meter dari pusat nilai tertinggi laju aliran massa sampai dengan radius 2,5 meter. Persentase konsentrasi gas diperoleh dari nilai perbandingan antara total laju aliran massa tiap area dibandingkan dengan nilai laju aliran massa kebocoran gas yang diperoleh dari lubang pada *pipeline*. Data nilai laju alir gas di permukaan timbunan tersebut diperoleh melalui *post processing* Ansys Fluent. Pada Gambar 7 berikut ini terlihat pola konsentrasi untuk setiap tekanan aliran gas.



Gambar 7. Konsentrasi Gas di Permukaan Timbunan *Pipeline* Lapisan Tanah–*Crushed Stone*–Aspal

Beberapa analisis yang diperoleh dari Gambar 6 dan data konsentrasi gas pada pembagian 5 (lima) area tersebut antara lain:

- Perubahan tekanan aliran gas tidak mempengaruhi konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* baik secara total sebesar 70,96% maupun pada masing-masing area yang dianalisis.
- Pusat konsentrasi gas berada pada titik yang sama dengan titik kebocoran pada *pipeline*. Pola ini akan membantu dalam menentukan titik kebocoran saat ditemukan indikasi dalam kegiatan survei kebocoran di lapangan.

4. KESIMPULAN

- Analisis jangkauan dan pola dispersi gas alam yang berasal dari kebocoran *pipeline* untuk beberapa variasi tekanan tipe lapisan timbunan adalah sebagai berikut:
 - Penelitian ini memberikan gambaran pola dispersi dalam tanah dan konsentrasi gas di permukaan tanah pada rentang tekanan 0,1 barg – 4 barg, tipe tanah porositas 22,6% dan permeabilitas gas $1,40 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ serta tipe lapisan timbunan jalan aspal.

- b. Jangkauan dispersi kebocoran gas di permukaan tanah atau aspal pada kisaran total konsentrasi 70%Vol untuk radius dari titik kebocoran *pipeline* sampai dengan 2,5 meter. Kondisi ini memberikan acuan kepada pelaksana inspeksi dan survei kebocoran *pipeline* untuk fokus dalam identifikasi awal kebocoran *pipeline* pada jarak di sisi kiri dan kanan *pipeline* sejauh 2,5 meter.
 - c. Simulasi CFD dengan parameter tekanan maksimal 4 barg diperoleh laju aliran massa sebesar $2,2544 \cdot 10^4$ kg/s. Seperti halnya dalam eksperimen Okamoto (2014), pada laju aliran massa yang tinggi simulasi tidak akan valid karena pada kenyataannya dorongan gas yang bocor dari *pipeline* akan menimbulkan perubahan porositas tanah di sekitarnya, sehingga menyebabkan perubahan resistansi tanah.
2. Pola konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* memberikan acuan pelaksanaan survei kebocoran di jalur *pipeline* dan dapat memperkirakan posisi *pipeline* maupun titik kebocoran dengan melakukan pengukuran konsentrasi gas secara tegak lurus *pipeline*. Kondisi kebocoran dengan diameter ekivalen sebesar 2 mm sudah menunjukkan karakteristik pola dispersi dan konsentrasi gas di permukaan timbunan *pipeline*, sehingga kejadian kebocoran pada *pipeline* dapat diidentifikasi secara dini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS, 2013, *Ansys Fluent User's Guide*, ANSYS Inc : Canonsburg
- ANSYS, 2013, *Ansys Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc : Canonsburg
- Huang, X., Liu, S., Liu, J., dan Zang, Z., 2012, Theoretical Analysis of the Dispersion and Hazardous Range of Natural Gas Pipeline Leakage. *Icptt 2012*. doi:10.1061/9780784412619.041
- Moghadam, A. E., Gord, M. F., & Dashtebayaz, M. D., 2016, Correlations for estimating natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 185–196. doi: 10.1016/j.jngse.2016.06.062
- Moghadam, A. E., Gord, M. F., Arabkoohsar, A., & Moghadam, A. J., 2018, CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: Correlation development for leakage estimation. *Journal of Cleaner Production*, 199, 257–271. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.127
- Montiel, H., Vilchez, J. A., Casal, J., Arnaldos, J., 1998, Mathematical modelling of accidental gas releases. *Journal of Hazardous Materials* 59 (1998) 211–233.
- Okamoto, H., Gomi, Y., Akagi, H., 2014, Movement Characteristics of Hydrogen Gas Within the Ground and Its Detection at Ground Surface. *Journal of Civil Engineering and Science*. Vol. 3 Iss. 1 PP. 49-66
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Pearson Education Limited, Edinburg Gate.
- Yuhu D., Huilin G., Jing'en Z., dan Yaorong F., 2003, Mathematical modeling of gas release through holes in pipelines. *Chemical Engineering Journal* 92 (2003) 237–241.