

Firman

Ramadhan_3334190037_Fulltext

t

by Turnitin Cek

Submission date: 23-Jun-2024 09:36PM (UTC-0700)

Submission ID: 2407631640

File name: Firman_Ramadhan_3334190037_Fulltext.pdf (3.78M)

Word count: 16700

Character count: 108921

**SIMULASI PELAPISAN *DIAMOND-LIKE CARBON* (DLC)
MELALUI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* ANSYS
FLUENT DENGAN MENGAMATI PENGARUH VARIASI
TEMPERATUR DAN JENIS GAS HIDROKARBON
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN GAS**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Firman Ramadhan
3334190037

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON – BANTEN**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

**SIMULASI PELAPISAN *DIAMOND-LIKE CARBON* (DLC)
MELALUI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* ANSYS
FLUENT DENGAN MENGAMATI PENGARUH VARIASI
TEMPERATUR DAN JENIS GAS HIDROKARBON
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN GAS**

**1
SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh :

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Alfirano. S.T., M.T., Ph.D. **Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.**
NIP. 196006232003122001 NIP. 199012142019032022




LEMBAR PERSETUJUAN

**SIMULASI PELAPISAN *DIAMOND-LIKE CARBON* (DLC)
MELALUI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* ANSYS
FLUENT DENGAN MENGAMATI PENGARUH VARIASI
TEMPERATUR DAN JENIS GAS HIDROKARBON
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN GAS**

⁶
Disusun dan diajukan oleh :

Firman Ramadhan
3334190037

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal
14 Mei 2024

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	: Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D.	
Penguji II	: Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.	
Penguji III	: Anistasia Milandia, S.T., M.T.	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Metalurgi

Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19800030720050111002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Simulasi Pelapisan *Diamond-Like Carbon* (DLC) melalui *Computational Fluid Dynamics* ANSYS *Fluent* dengan Mengamati Pengaruh Variasi Temperatur dan Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Karakteristik Aliran Gas

Nama : Firman Ramadhan

NIM : 3334190037

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 14 Mei 2024

Firman Ramadhan
NIM. 3334190037

ABSTRAK

Diamond-like carbon (DLC) merupakan material karbon yang dapat dideposisikan sebagai bahan pelapis pada substrat logam. Deposisi material DLC ini dapat dilakukan pada proses *plasma-enhanced chemical vapour deposition* (PECVD) dengan menggunakan *plasma chamber*. Metode ini tentunya memiliki beberapa risiko mengingat adanya penggunaan plasma yang terbentuk dari gas yang dipanaskan hingga temperatur tinggi, serta biaya bahan baku yang cukup mahal sehingga simulasi menjadi salah satu metode untuk melakukan uji eksperimen. Perangkat lunak ANSYS 2023 R2 menyediakan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) untuk mempelajari sifat fluida berupa gas dan karakteristik aliran gas di dalam reaktor. Simulasi ini bekerja melalui salah satu metode yang tersedia di ANSYS, yaitu *fluid flow fluent*. Pada simulasi kali ini, diambil variabel berupa temperatur pemanasan gas dan penggunaan gas hidrokarbon yang berbeda. Temperatur yang digunakan untuk memanaskan gas diatur dengan temperatur 400°C dan 450°C sebagai variabel. Sedangkan jenis gas hidrokarbon yang digunakan sebagai gas prekursor adalah gas propana (C₃H₈) dan gas asetilena (C₂H₂). Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur pemanasan gas pada 450°C akan membuat temperatur gas saat mencapai substrat menjadi lebih tinggi dibandingkan pemanasan gas pada temperatur 400°C. Temperatur tinggi ini mempengaruhi karakteristik aliran gas seperti nilai densitas dan tekanan gas yang menurun, serta kecepatan alir gas yang meningkat. *Post-processing* CFD pada simulasi ANSYS juga menunjukkan hasil bahwa pada temperatur yang tepat, jumlah *data count* akan lebih tinggi. *Data count* merupakan nilai yang menggambarkan banyaknya sel pada suatu titik yang berarti suatu reaksi lebih banyak terkonsentrasi pada titik tersebut. Perbandingan penggunaan gas hidrokarbon yang berbeda juga menunjukkan hasil bahwa jumlah reaksi terkonsentrasi tertinggi dihasilkan simulasi dengan gas propana dengan temperatur operasional 450°C pada ketinggian reaktor di sekitar 260 mm – 280 mm, di mana substrat berada pada ketinggian 260 mm.

Kata Kunci : *Diamond-like carbon*, PECVD, ANSYS *Fluent*, Simulasi CFD

ABSTRACT

Diamond-like carbon (DLC) is a carbon material that can be deposited as a coating material on metal substrates. Deposition of DLC material can be done in plasma-enhanced chemical vapour deposition (PECVD) process using a plasma chamber. This method certainly has some risks considering the use of plasma formed from gas heated to high temperatures, and the cost of raw materials is quite expensive so simulation is one method to conduct experimental tests. ANSYS 2023 R2 software provides computational fluid dynamics (CFD) simulations to study the fluid properties of gas and gas flow characteristics in the reactor. This simulation works through one of the methods available in ANSYS, namely fluid flow fluent. In this simulation, variables such as gas heating temperature and the use of different hydrocarbon gases were taken. The temperature used to heat the gas is set with temperatures of 400°C and 450°C as variables. The hydrocarbon gases used as precursor gases are propane (C₃H₈) and acetylene (C₂H₂). The simulation results show that the gas heating temperature at 450°C will make the gas temperature when it reaches the substrate higher than gas heating at 400°C. This high temperature affects the gas flow characteristics such as decreasing gas density and pressure values, and increasing gas flow velocity. CFD post-processing in the ANSYS simulation also shows that at the right temperature, the number of data counts will be higher. Data count is a value that describes the number of cells at a point, which means that a reaction is more concentrated at that point. Comparison of the use of different hydrocarbon gases also shows that the highest number of concentrated reactions is produced by simulations with propane gas with an operating temperature of 450°C at a reactor height around 260 mm - 280 mm, where the substrate is at a height of 260 mm.

Keywords: Diamond-like carbon, PECVD, ANSYS Fluent, CFD simulation

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala limpahan berkat dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Skripsi yang berjudul “Simulasi Pelapisan *Diamond-Like Carbon* (DLC) melalui *Computational Fluid Dynamics ANSYS Fluent* dengan Mengamati Pengaruh Variasi Temperatur dan Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Karakteristik Aliran Gas” dengan baik sebagai salah satu syarat menjadi sarjana Teknik Metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
2. Bapak Prof. Alfirano. S.T., M.T., Ph.D. selaku Pembimbing I
3. Ibu Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T. selaku Pembimbing II
4. Orang tua dan keluarga penulis yang senantiasa memberikan dukungan agar penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik.
5. Rekan-rekan mahasiswa seperjuangan yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang turut memberikan saran dalam penulisan dan pengambilan data.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan skripsi ini, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak sebagai perbaikan. Penulis berharap agar skripsi ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya yang memerlukannya sebagai bahan kajian ataupun sumber referensi. Atas segala perhatiannya, penulis mengucapkan terima kasih.

Cilegon, 14 Mei 2024

Firman Ramadhan

1 DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	1
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Diamond-Like Carbon (DLC)</i>	8
2.2 <i>Chemical Vapour Deposition (CVD)</i>	10

2.2.1	Sistem Pengiriman Gas	11
2.2.2	Ruang Reaksi.....	11
2.2.3	Sistem Vakum	13
2.2.4	Sistem Energi	14
2.2.5	Sistem Pengolahan Gas Buang	15
2.3	Jenis dan Metode CVD	15
2.4	Tipe Reaksi CVD	19
13	2.5 <i>Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)</i>	20
2.6	Gas Hidrokarbon	23
2.6.1	Asetilena	23
2.6.2	Propana	24
2.7	Simulasi Proses	25
2.8	ANSYS 2023 R2.....	27
19	2.9 Pemodelan Matematika	29

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir.....	32
3.2	Prosedur Percobaan	33
3.2.1	Desain Geometri.....	33
3.2.2	Parameter Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	34
3.2.3	Model Matematika Simulasi	36
3.2.4	Pengolahan Data Hasil Simulasi	37
3.3	Algoritma Simulasi CFD.....	38

3

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian.....	39
4.2 Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Gas.....	41
4.3 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Alir Gas.....	43
25 4.4 Pengaruh Temperatur terhadap Densitas Gas.....	45
4.5 Pengaruh Temperatur terhadap Tekanan Gas.....	46
4.6 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Distribusi Temperatur	47
4.7 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Laju Alir Gas	49
4.8 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Perubahan Densitas Gas ...	50
4.9 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Perubahan Tekanan Gas ...	51
4.10 Profil Temperatur Hubungan Jenis Gas Hidrokarbon.....	53
4.11 Perbandingan Variabel Utama pada Tekanan Berbeda	56

15

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	60
5.2 Saran.....	61

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Nomor	Judul Tabel	Halaman
2.1	Sifat Kimia Asetilena	24
2.2	Sifat Kimia Propana.....	25
3.1	Dimensi Geometri Model <i>Plasma Chamber</i>	34
3.2	Data Parameter Simulasi CFD	35
3.3	Data Parameter Model Gas Propana.....	35
3.4	Data Parameter Model Gas Asetilena	36

14
DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul Gambar	Halaman
2.1	Sudut orbital sp^3	8
2.2	<i>Liquid precursor bubbler</i>	11
2.3	Konfigurasi Horizontal CVD	12
2.4	Konfigurasi Vertikal CVD	13
2.5	Pengukur Bourdon	13
2.6	Manometer Kapasitansi	14
2.7	Profil Temperatur terhadap Arah Radial Pada Lokasi Vertikal	22
2.8	Distribusi Gas dalam Reaktor pada 7200s	28
2.9	Domain Komputasi Dua Dimensi	29
2.10	Vektor Kecepatan Distribusi Gas di Sekitar Substrat	29
3.1	Diagram Alir Penelitian	31
3.2	PECVD <i>Bell-jar Reactor</i>	33
3.3	Desain 2D <i>Plasma Chamber</i> a) Bagian Dalam Reaktor, dan b) Dimensi Geometri	34
3.4	Diagram Alir Algoritma SIMPLE Keadaan Tunak (<i>Steady-State</i>)	38
4.1	Model Geometri <i>Plasma Chamber</i>	39
4.2	Hasil <i>Meshing</i> Model <i>Plasma Chamber</i>	40
4.3	Hasil Distribusi Temperatur <i>Plasma Chamber</i> pada Variabel Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C	42
4.4	Kontur Kecepatan Alir Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C	44

4.5	Kontur Perubahan Densitas Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C	45
4.6	Kontur Perubahan Tekanan Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C	46
4.7	Hasil Distribusi Temperatur dengan Parameter Gas Prekursor (a) Propana 450°C, dan (b) Asetilena 450°C	48
4.8	Kontur Laju Alir Gas dengan Parameter Gas Prekursor (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C	50
4.9	Kontur Densitas Gas dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C	51
4.10	Kontur Distribusi Tekanan Gas dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C	52
4.11	Profil Temperatur Sepanjang <i>Inlet</i> ke Substrat	54
4.12	<i>Data Count</i> Simulasi dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C	55
4.13	Koordinat Nilai Optimal pada Reaktor	56
4.14	Pengaruh Perbedaan Tekanan terhadap <i>Data Count</i>	57
4.15	Profil Kecepatan Alir Gas Perbandingan Tekanan pada Parameter Gas Propana 450°C	58
4.16	Profil Temperatur Perbandingan Tekanan pada Parameter Gas Propana 450°C	59
A.1	Dimensi pada Sektor Atas <i>Chamber</i>	69
A.2	Keterangan Angka pada Dimensi Sektor Atas <i>Chamber</i>	69
A.3	Dimensi pada Sektor Bawah <i>Chamber</i>	70
A.4	Keterangan Angka pada Dimensi Sektor Bawah <i>Chamber</i>	70
A.5	Proses <i>Meshing Inflation</i> pada Model	70
A.6	Pengaturan Ukuran dan Kualitas <i>Mesh</i>	71
A.7	Pengaturan Standar Gravitasi dan Tipe Penyelesaian	71

A.8	Standar Sifat Fisik Gas Propana pada ANSYS	72
A.9	Standar Sifat Fisik Gas Asetilena pada ANSYS	72
A.10	Standar Sifat Fisik Baja D2 pada ANSYS	73
A.11	Standar Sifat Fisik <i>Stainless Steel 304</i> pada ANSYS.....	73
A.12	<i>Input Data Inlet</i>	74
A.13	<i>Input Data Outlet</i>	74
A.14	<i>Input Data Dinding Reaktor</i>	75
A.15	Pengaturan Kondisi Pengoperasian Temperatur 400°C	75
A.16	Pengaturan Kondisi Pengoperasian Temperatur 450°C	76
A.17	Pengaturan Nilai Referensi.....	76
A.18	Pengaturan Metode Penyelesaian Simulasi.....	77
A.19	Pengaturan Metode Inisialiasi	77
A.20	Pengaturan Jumlah Iterasi dan Interval.....	78
A.21	Penyelesaian Komputasi pada Gas Propana 400°C	79
A.22	Penyelesaian Komputasi pada Gas Propana 450°C	79
A.23	Penyelesaian Komputasi pada Gas Asetilena 400°C	80
A.24	Penyelesaian Komputasi pada Gas Asetilena 450°C	80
A.25	<i>Streamline</i> Gas Propana 400°C	81
A.26	<i>Streamline</i> Gas Propana 450°C	81
A.27	<i>Streamline</i> Gas Asetilena 400°C	81
A.28	<i>Streamline</i> Gas Asetilena 450°C	82

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul Lampiran	Halaman
A	<i>Input Data</i> dan Langkah Simulasi	68

28
BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara penghasil gas alam terbesar ke-8 dalam lingkup Asia Pasifik karena menghasilkan gas alam hingga 1.419.090 TeraJoule berdasarkan data yang dihimpun dari *International Energy Agency* pada tahun 2021. Jaringan pipa menjalankan fungsi vital untuk menyalurkan gas alam. Pipa-pipa tersebut terbuat dari baja karbon yang dapat mengalami korosi, di mana laju korosi pada setiap baja karbon berbeda. Mengatasi resiko korosi tersebut, maka perlu dilakukan rekayasa material berupa pelapisan (*coating*) karena material pelapis yang digunakan memiliki sifat yang baik seperti koefisien gesekan yang rendah, daya tahan yang tinggi, dan sifat penghalang gas baik untuk oksigen maupun uap air. Lingkup dari pelapisan tidak hanya terbatas pada pipa saja, melainkan seluruh komponen yang terbuat dari logam [1]. Pelapisan permukaan logam perlu dilakukan karena tingkat penggunaannya yang tinggi. Saat ini, pipa sebagai bagian dan alat telah banyak digunakan. Misalnya, dalam industri kimia perminyakan, teknik kelautan, industri otomotif, perawatan kesehatan makanan, pasokan air, pengolahan limbah, dan industri lainnya seperti pengolahan gas alam [2]. Salah satu jenis pelapisan yang dikembangkan yaitu pelapisan dengan *diamond-like carbon* (DLC).

Diamond-Like Carbon (DLC) adalah jenis material lapisan tipis karbon amorf (a-C) atau karbon amorf terhidrogenasi (a-C:H) yang memiliki tingkat pengikatan yang tinggi pada ikatan sp^3 yang metastabil. Sifat metastabil DLC memungkinkannya menyesuaikan diri dengan permukaan yang dilapisinya sehingga memungkinkan untuk memodifikasi permukaan tanpa mengubah sifat substrat. Kekurangan dari ikatan sp^3 pada material DLC yaitu berkurangnya kekerasan material pada temperatur tinggi. Pengurangan ini biasanya berada pada rentang 50-100 pada skala kekerasan Vickers, tetapi masih layak dipertimbangkan untuk tetap digunakan sebagai bahan pelapis. Material DLC memiliki sifat

kekerasan, modulus elastisitas, afinitas elektron negatif dan inert baik secara fisik maupun kimiawi seperti berlian. Terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik permukaan material, salah satunya adalah dengan menggunakan teknik perlakuan permukaan. Perlakuan permukaan merupakan suatu perlakuan untuk meningkatkan kualitas atau mutu suatu material sesuai dengan yang diinginkan [3]. Salah satu metode untuk membuat lapisan DLC yaitu dengan menggunakan metode *Chemical Vapour Deposition* (CVD) atau deposisi uap kimia dikarenakan menggunakan gas sebagai prekursornya. Prekursor merupakan bahan yang digunakan untuk mendeposisikan lapisan tipis ke substrat dengan memasukkannya ke dalam ruang reaksi. *Chemical Vapour Deposition* (CVD) adalah teknologi pemrosesan material yang banyak digunakan di mana lapisan tipis dibentuk pada substrat yang dipanaskan melalui reaksi kimia dengan prekursor dalam fase gas. Substrat merupakan bahan yang menjadi subyek untuk dimodifikasi, di mana dalam metode ini logam yang akan dilapisi dengan lapisan DLC berperan sebagai substrat. Metode CVD mengandalkan reaksi kimia yang memungkinkan laju deposisi yang dapat diatur serta produk berkualitas tinggi dengan kesesuaian yang sangat baik [4].

Pada sisi lain metode CVD dengan kelebihanannya, terdapat kekurangan di antaranya kebutuhan temperatur yang tinggi untuk memanaskan gas prekursor. Temperatur yang tinggi dikhawatirkan akan merusak substrat yang akan dilapisi. Berdasarkan hal tersebut, dikembangkan metode CVD dengan penggunaan plasma yang disebut sebagai *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD). Plasma merupakan gas yang dipanaskan pada temperatur tinggi. Pada proses *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD) terbentuk plasma, tetapi keseluruhan proses masih beroperasi pada temperatur yang lebih rendah pada rentang 200°C hingga 400°C dibandingkan dengan *Chemical Vapor Deposition* (CVD) konvensional yang material pelapisnya terdeposisi saat temperatur mencapai 1000°C [5].

Metode PECVD memiliki kemiripan dengan metode karburisasi. Keduanya menggunakan karbon sebagai bahan dasar pelapisan. Perbedaan mendasar di antara keduanya di mana PECVD mendeposisikan pelapis ke substrat logam. Deposisi

menciptakan ikatan yang lebih kuat karena melibatkan penempatan material pelapis hingga ke atom dan molekulnya pada substrat. Sedangkan itu, pada karburisasi terjadi proses difusi yang hanya mempengaruhi distribusi material pelapis tetapi tidak menciptakan ikatan yang kuat dengan substrat. Metode PECVD juga berbeda dengan pengerasan pada umumnya di mana proses pengerasan membutuhkan temperatur tinggi karena melibatkan transformasi cairan ataupun lelehan material. Dalam metode PECVD, plasma dibuat dengan menerapkan medan listrik ke gas prekursor dalam ruang vakum. Medan listrik memberi energi pada molekul gas, menyebabkan molekul gas tersebut terionisasi dan membentuk plasma [6].

Pelapisan *Diamond-Like Carbon* (DLC) dengan metode PECVD menggunakan gas prekursor untuk membuat lapisan DLC terdeposisi ke permukaan. Gas prekursor ini biasanya berupa hidrokarbon, seperti asetilena (C_2H_2), dan propana (C_3H_8). Gas prekursor dimasukkan ke dalam ruang vakum di mana gas tersebut terionisasi dan diendapkan ke permukaan substrat untuk membentuk lapisan DLC. Kedua gas tersebut digunakan sebagai gas prekursor karena dapat mempengaruhi komposisi dan struktur lapisan DLC yang dihasilkan. Inti dari modifikasi gas prekursor untuk proses pelapisan DLC adalah bagaimana gas tersebut terdistribusi di dalam reaktor dengan menggunakan teknik *plasma-enhanced chemical vapour deposition* (PECVD) [3].

Metode PECVD di dalam reaktor plasma memiliki beberapa rintangan di antaranya terdapat gas yang beracun dan mudah meledak dalam aliran plasma, serta peralatan dengan biaya tinggi sehingga penelitian ini mengedepankan untuk melakukan simulasi proses. Reaksi yang terjadi di dalam *plasma chamber* pada proses PECVD dapat divisualisasikan dengan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD). Simulasi ini dapat mengoptimalkan parameter proses untuk menghasilkan visualisasi laju kecepatan alir gas, densitas, dan distribusi gas prekursor hingga distribusi temperatur. Selain itu, dengan mensimulasikan proses PECVD, potensi bahaya dapat dihindari sebelum fabrikasi atau eksperimen yang sebenarnya. Simulasi juga menjadi pilihan mengenai penelitian ini karena dapat mengurangi biaya, mengurangi kebutuhan untuk mencoba di laboratorium, dan menghemat waktu [7].

Computational fluid dynamics (CFD) merupakan alat untuk memodelkan dan mensimulasikan proses yang biasa digunakan dalam industri. CFD mengintegrasikan disiplin ilmu mekanika fluida, matematika, dan ilmu komputer. CFD didedikasikan untuk fluida yang bergerak, yang karakteristik fisiknya dapat dijelaskan melalui persamaan matematika. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut, persamaan tersebut diubah menjadi program komputer atau paket perangkat lunak menggunakan bahasa pemrograman komputer. Simulasi CFD memiliki keunggulan dibandingkan eksperimen konvensional yang memungkinkan analisis data hanya dari sejumlah tempat dalam sistem seperti tempat di mana sensor dan meteran berada. Di sisi lain, simulasi CFD memungkinkan peneliti untuk mengeksplorasi lokasi mana pun di wilayah yang diminati dan menginterpretasikan kinerjanya menggunakan parameter termal dan aliran fluida. Banyak proses aliran dan perpindahan panas yang tidak dapat dengan mudah diuji di laboratorium. Simulasi CFD memberi kemampuan untuk mensimulasikan secara teoritis keadaan fisik apa pun. Keuntungan tambahannya adalah fakta bahwa banyak simulasi dapat dilakukan dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan dengan melakukan uji laboratorium [8].

Simulasi CFD untuk menggambarkan kondisi aliran gas di dalam reaktor telah dilakukan pada beberapa penelitian terdahulu. Penggunaan laju alir masuk gas ke dalam reaktor dengan dua variabel yang berbeda menunjukkan distribusi pada laju yang lebih tinggi mencapai seluruh bagian reaktor dibandingkan laju alir yang lebih rendah. Hasil tersebut berbanding lurus dengan distribusi temperatur gas pada laju alir yang lebih tinggi [9]. Simulasi lainnya memvariasikan penggunaan gas prekursor berupa gas asetilena (C_2H_2), metana (CH_4), dan metil (CH_3) untuk membandingkan karakteristik aliran gas berupa fraksi mol di mana distribusi gas asetilena di dalam reaktor memiliki fraksi mol lebih tinggi dibandingkan dengan kedua gas lainnya [10].

Simulasi CFD menggunakan ANSYS menjadi pilihan untuk penelitian ini karena *solver* atau penyelesaian secara komputasi pada ANSYS didasarkan pada metode volume hingga. Metode volume hingga adalah metode numerik yang digunakan dalam simulasi CFD untuk menyelesaikan persamaan yang mengatur

aliran fluida dan perpindahan panas. ANSYS *Fluent* yang menghadirkan simulasi CFD memiliki dua metode numerik, yaitu *pressure-based solver* dan *density-based solver*. Metode numerik berdasarkan pada nilai tekanan atau *pressure-based solver* dikembangkan dan digunakan untuk kondisi model dengan aliran tak termampatkan (*incompressible flow*) yang berkecepatan rendah. Aliran tak termampatkan merupakan aliran fluida yang cenderung menjaga nilai densitas gas agar tetap konstan atau tidak mengalami perubahan yang signifikan. Sedangkan metode *Density-based solver* digunakan untuk aliran kompresibel berkecepatan tinggi, seperti aliran supersonik atau hipersonik, di mana perubahan densitasnya signifikan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, maka identifikasi masalah yang dijadikan sebagai bahan dalam penelitian ini antara lain, sebagai berikut:

1. Laju alir masuk gas yang bervariasi telah dibuktikan mempengaruhi distribusi gas prekursor dengan temperatur pemanasan gas yang sama, sehingga dilakukan pemodelan mengenai pengaruh variasi penggunaan temperatur pemanasan gas terhadap karakteristik gas seperti laju alir, densitas, tekanan, dan distribusi gas dengan pendekatan simulasi CFD.
2. Simulasi CFD yang memodelkan aliran gas pada metode PECVD untuk proses pelapisan DLC bergantung pada gas prekursor berupa gas hidrokarbon yang memiliki perbedaan sifat gas.
3. Eksperimen laboratorium berbasis plasma memiliki risiko yang tinggi jika dilakukan tanpa simulasi sehingga simulasi pemodelan distribusi gas di dalam reaktor perlu dibuat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini yaitu untuk membuat suatu desain simulasi yang dapat menjadi referensi dan panduan sebelum dilakukannya eksperimen laboratorium. Sedangkan tujuan lainnya yaitu sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi temperatur selama proses pelapisan DLC pada metode PECVD terhadap densitas, laju alir, tekanan dan distribusi gas melalui pendekatan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD).
2. Mengetahui pengaruh penggunaan jenis gas hidrokarbon yang berbeda antara gas propana dan asetilena terhadap karakteristik gas seperti densitas, laju alir, tekanan serta distribusi gas selama proses PECVD di dalam *chamber* dengan simulasi CFD.
3. Mendapatkan simulasi pemodelan yang sesuai dengan literatur yang tersedia agar mendapatkan hasil simulasi yang menggambarkan perbedaan temperatur dan gas prekursor terhadap karakteristik aliran gas seperti densitas, kecepatan alir, tekanan serta distribusi gas.

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah, simulasi yang dilakukan pada penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut agar pengambilan data dan analisis lebih terfokus dan tidak meluas.

1. Simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) menggunakan *software ANSYS Fluent* 2023 R2.
2. Simulasi CFD berfokus pada karakteristik aliran gas yang terbatas pada densitas, laju alir, tekanan, dan distribusi temperatur gas.
3. Simulasi dilakukan pada tekanan 1,2 milibar, 1,4 milibar, dan 1,6 milibar dengan laju alir gas yang masuk ke dalam reaktor 5 m/dtk sebagai variabel tetap.
4. Gas hidrokarbon asetilena (C_2H_2) dan propana (C_3H_8) dipilih sebagai gas prekursor yang akan digunakan dalam simulasi CFD, serta variasi temperatur yang diterapkan adalah $400^\circ C$ dan $450^\circ C$.
5. Model *plasma chamber* untuk simulasi CFD mengambil referensi bentuk *bell-jar reactor* dengan dimensi 2D sebagai tempat terdistribusinya gas hidrokarbon.
6. Substrat logam pada simulasi menggunakan baja AISI D2.

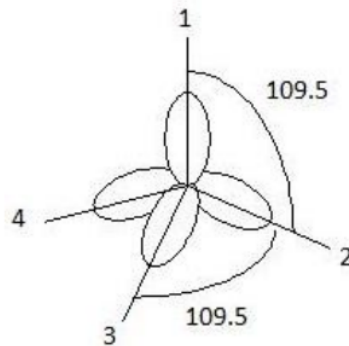
1.5 Sistematika Penulisan

Penyusunan skripsi ini terdiri dari bab-bab yang saling memiliki keterkaitan sehingga menghasilkan suatu pembahasan yang runtut. Bab pertama merupakan pendahuluan, identifikasi masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan. Latar belakang pada bab pertama menjelaskan mengenai penggunaan pipa sebagai penyalur gas alam, korosi pada logam terutama pipa, pelapisan permukaan, metode pelapisan PECVD, material DLC sebagai bahan pelapis, simulasi CFD sebagai alat untuk mempelajari karakteristik gas dalam proses PECVD, dan penelitian terdahulu terkait simulasi CFD. Bab kedua merupakan bagian tinjauan pustaka yang menguraikan teori-teori mengenai *diamond-like carbon*, jenis dan metode serta tipe reaksi *chemical vapour deposition* (CVD), metode PECVD, gas hidrokarbon yang terbagi menjadi gas asetilena dan gas propana, simulasi proses beserta penggunaannya dengan perangkat lunak ANSYS hingga penelitian terdahulu mengenai simulasi CFD. Bab ketiga berisi mengenai diagram alir, prosedur percobaan, desain geometri, parameter simulasi CFD, model matematika simulasi, pengolahan data simulasi, serta tempat dan waktu pelaksanaan. Bab keempat merupakan penjabaran dari hasil simulasi beserta pembahasan mengenai pengaruh antara variabel temperatur dan gas hidrokarbon terhadap karakteristik aliran gas di dalam reaktor. Bab kelima merupakan kesimpulan dari pembahasan yang menjawab masalah serta tujuan dari penelitian, dan ditutup dengan saran yang diberikan oleh penulis. Kemudian kelima bab tersebut dilengkapi dan diakhiri dengan daftar pustaka dan lampiran.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 ³ *Diamond-Like Carbon (DLC)*

Diamond-Like Carbon (DLC) adalah bahan karbon amorf yang mengandung sekitar 50% hidrogen untuk DLC terhidrogenisasi (a-C:H), dan karbon amorf yang mengandung kurang dari 1% hidrogen (a-C). Lapisan DLC terdiri dari ikatan sp^3 tipe C atau karbon sehingga memberikan DLC sifat fisik dan mekanik yang mirip dengan berlian. Istilah DLC biasanya digunakan untuk menunjukkan bentuk DLC yang terhidrogenasi (a-C:H) [11]. Ikatan sp^3 merupakan jenis ikatan kovalen yang terjadi ketika atom orbital s bercampur dengan tiga orbital p untuk membentuk empat orbital hibrida baru di mana orbital-orbital baru ini dikenal sebagai orbital hibrida sp^3 . Jenis hibridisasi ini diperlukan setiap kali sebuah atom dikelilingi oleh empat kelompok elektron. Setiap orbital hibrida sp^3 dapat menampung 2 elektron. Keempat orbital hibrida sp^3 terbentuk dalam geometri tetrahedral di sekitar atom pusat dengan sudut ikatan sekitar 109,5 derajat [12].



Gambar 2.1 Sudut orbital sp^3 [12]

Ikatan sp^3 DLC dapat mempengaruhi densitas, distribusi gas, dan laju aliran dalam ruang *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)*. Rasio sp^3/sp^2 lapisan DLC dapat dipengaruhi oleh kondisi fabrikasi dalam proses PECVD, termasuk laju aliran dan tekanan gas. Ketika gas karbon dioksida meningkat dalam

proses PECVD, kandungan hidrogen dalam lapisan menurun tetapi rasio sp^3/sp^2 meningkat. Pada gas nitrogen, kandungan hidrogen mengalami penurunan namun rasio sp^3/sp^2 dan laju aliran gas nitrogen tidak menunjukkan kecenderungan tertentu. Perubahan struktur ikatan ini dapat mempengaruhi kepadatan lapisan yang diendapkan. Meningkatnya rasio sp^3 akan meningkatkan kepadatan lapisan DLC sehingga parameter proses dan rasio sp^3/sp^2 perlu dikontrol [13].

Diamond-like carbon biasanya diendapkan menggunakan gas prekursor hidrokarbon seperti etana (C_2H_6), metana (CH_4), asetilena (C_2H_2), iso-butana (C_4H_{10}), propana (C_3H_8), benzena (C_6H_6), dan n-butana (C_4H_{10}). Lapisan DLC pada umumnya memiliki potensi untuk digunakan pada lapisan permukaan kendaraan bermobil karena memiliki gesekan yang sangat rendah [14]. Lapisan DLC memiliki ⁴⁶kekerasan tinggi, ketahanan aus yang tinggi, koefisien gesekan rendah, insulasi tinggi, stabilitas kimia yang tinggi, sifat penghalang gas yang tinggi, sifat anti-pembakaran yang tinggi, biokompatibilitas yang tinggi, dan permeabilitas inframerah yang tinggi. Lapisan DLC dengan permukaan datar dapat disintesis pada temperatur rendah hingga $200^\circ C$. Sifat mekanik tersebut yang menjadikan DLC cocok digunakan sebagai pelapisan pada material logam. Pelapisan DLC memiliki banyak karakteristik yang membuatnya dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan biomedis. Karakteristik ini salah satunya dapat melindungi substrat logam dari korosi dan oksidasi dengan bertindak sebagai penghalang terhadap bahan kimia dan korosi lingkungan [15].

Lapisan DLC dapat diaplikasikan pada berbagai industri salah satunya pada bidang otomotif, di mana DLC digunakan untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi komponen mesin, seperti piston, katup, camshafts, injektor bahan bakar, dan bantalan. Pada industri dirgantara, DLC digunakan untuk meningkatkan keandalan dan keamanan komponen pesawat terbang, seperti roda gigi, turbin, kompresor, dan sensor. Selain itu, DLC dapat meningkatkan konduktivitas listrik dan stabilitas perangkat elektronik seperti transistor, dioda, dan sel surya. Selain dari fungsi-fungsi sebelumnya, material karbon ini bermanfaat juga dalam bidang biomedis karena dapat meningkatkan fungsionalitas implan serta perangkat medis seperti stent jantung, sendi buatan, kateter, dan sensor [16].

Lapisan DLC pada umumnya dibuat dari atom karbon yang diekstraksi atau berasal dari sumber yang mengandung karbon, seperti karbon padat dan bentuk cair atau gas seperti senyawa hidrokarbon. Jenis ikatan seperti sp^1 , sp^2 , dan sp^3 yang menyatukan atom-atom karbon dalam DLC dapat bervariasi dan memengaruhi sifat mekanik, listrik, dan optik bergantung pada jenis sumber karbon yang digunakan selama proses deposisi. Lapisan karbon amorf yang mengandung DLC dapat disintesis dengan berbagai metode seperti *physical vapour deposition* (PVD), *chemical vapour deposition* (CVD), *ion beam deposition* (IBD), dan *plasma-enhanced chemical vapour deposition* (PECVD). Metode tersebut dipilih berdasarkan pada sifat yang diinginkan, bahan substrat, dan ketebalan lapisan. Metode PVD menggunakan pemanasan termal di mana material yang akan diendapkan akan dipanaskan pada temperatur tinggi hingga menguap yang kemudian mengembun pada substrat. Metode CVD menggunakan campuran gas yang mengandung hidrokarbon atau prekursor yang mengandung karbon lainnya untuk mendepositkan atom karbon pada substrat. Metode IBD menggunakan sinar ion untuk secara langsung menanamkan ion karbon ke permukaan substrat. Metode PECVD merupakan cabang dari metode CVD yang menggunakan plasma untuk menghasilkan spesies reaktif yang mendepositkan atom karbon pada substrat [17].

2.2 Chemical Vapour Deposition (CVD)

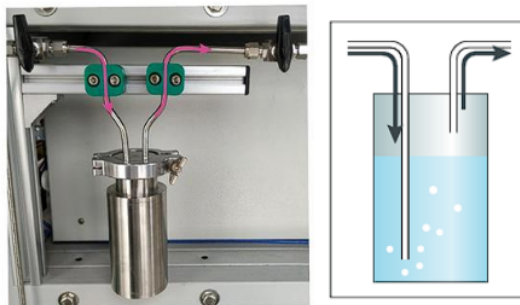
Chemical vapour deposition (CVD) merupakan teknologi yang efisien untuk memproduksi lapisan tipis padat berkualitas tinggi. Meskipun banyak digunakan dalam industri modern, teknologi CVD semakin dikembangkan karena disesuaikan dengan material baru. Pada industri terkini sintesis CVD didorong ke tingkat yang lebih tinggi dengan pembuatan lapisan tipis anorganik yang tepat dari lapisan tipis polimer dengan kemurnian tinggi yang dapat diendapkan pada berbagai substrat dengan ketebalan lapisan yang konsisten.

Chemical vapour deposition (CVD) memiliki metode tingkat lanjut seperti proses secara plasma dengan metode *plasma-enhanced chemical vapour deposition* (PECVD) yang dipilih karena memiliki temperatur pemanasan gas yang rendah sehingga mencegah adanya kerusakan permukaan substrat yang sensitif pada

temperatur tinggi serta memiliki cakupan bertahap pada permukaan yang tidak rata sehingga meningkatkan kualitas dan keseragaman ketebalan lapisan serta tingkat deposisi tinggi yang meningkatkan produktivitas dan efisiensi proses. Sistem CVD harus memenuhi persyaratan dasar yaitu pengiriman reaktan fase gas dengan cara kontrol cara yang dapat dikontrol, penyediaan ruang reaksi tertutup, evakuasi gas dan kontrol reaksi tekanan, pasokan sumber energi untuk bahan kimia reaksi, perawatan gas buang untuk tingkat yang aman dan tidak berbahaya, serta kontrol proses otomatis untuk meningkatkan stabilitas proses pengendapan. Sistem CVD terdiri dari sistem pengiriman gas, ruang reaksi, sistem vakum, sistem sistem energi, dan sistem pengolahan gas buang [4].

2.2.1 Sistem Pengiriman Gas

Prekursor dalam bentuk gas pada umumnya disimpan dalam wadah gas bertekanan tinggi yang ditempatkan di luar ruangan. Sedangkan prekursor cair dikirim dengan menggelembungkan gas pembawa yang dikendalikan oleh pengontrol aliran massa seperti pada Gambar 2.2. Pengontrol aliran massa sangat penting untuk suplai gas, di mana laju aliran gas diatur secara otomatis melalui kontrol umpan balik sesuai dengan massa gas yang mengalir. Di sisi lain, prekursor padat sulit menguap sehingga dimasukkan ke dalam ruang reaksi dengan sublimasi ke dalam fase gas.



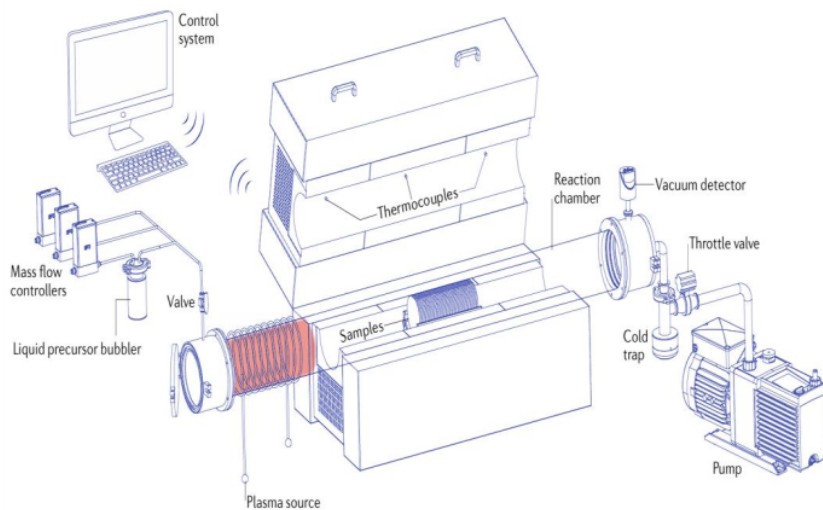
Gambar 2.2 *Liquid precursor bubbler*[4]

2.2.2 Ruang Reaksi

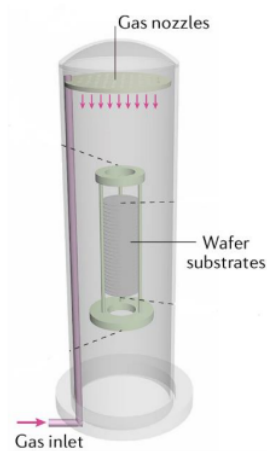
Konfigurasi horizontal yang ditunjukkan Gambar 2.3 dan vertikal pada Gambar 2.4 merupakan dua konfigurasi utama ruang reaksi. Ruang

reaksi tersebut pada umumnya berupa tabung kuarsa yang banyak digunakan dalam pembuatan semikonduktor karena toleransinya terhadap temperatur tinggi dan pemanasan serta pendinginan yang cepat. Injektor saluran masuk gas dihubungkan ke dalam ruang menggunakan flensa logam yang dilengkapi dengan komponen pendingin. Untuk menjaga aliran gas bersifat laminar, digunakan distributor gas dengan lubang tembus.

Substrat biasanya ditempatkan pada dudukan substrat yang terdiri dari kuarsa atau grafit karena stabilitas kimiawi yang baik dan tahan terhadap temperatur tinggi [18]. Untuk memenuhi karakteristik deposisi target seperti ketebalan dan komposisinya, konfigurasi penahan substrat dan kondisi deposisi berupa total aliran gas, komposisi gas, temperatur, dan tekanan harus dioptimalkan melalui studi rekayasa proses eksperimental dan numerik. Dalam aplikasi manufaktur, ruang pendingin dengan subsistem bongkar muat diperlukan untuk meningkatkan produktivitas [19].



Gambar 2.3 Konfigurasi Horizontal CVD [4]



Gambar 2.4 Konfigurasi Vertikal CVD [20]

2.2.3 Sistem Vakum

Pembersihan ruang deposisi untuk memulai proses deposisi dan memperoleh tekanan yang diperlukan dalam pengangkutan reaktan bergantung pada sistem vakum, di mana pengukuran dan kontrol vakum sangat penting serta saling melengkapi. Untuk mengukur tekanan sistem vakum, berbagai alat pengukur digunakan secara bergantian. Alat pengukur Bourdon, sensor piezo, manometer kapasitansi, dan manometer diafragma merupakan alat pengukur mekanis utama yang dapat mengukur vakum dengan mendeteksi perubahan fisik pada regangan atau kapasitansi listrik. Pengukur Bourdon tidaklah mahal dan memiliki masa pakai yang lama. Akan tetapi, pengukur Bourdon yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 di bawah ini tidak memiliki *output* elektronik, sehingga tidak cocok untuk kontrol umpan balik.



Gambar 2.5 Pengukur Bourdon [20]



Gambar 2.6 Manometer Kapasitansi [20]

Dengan menggunakan manometer kapasitansi, rentang pengukuran hingga empat kali lipat dapat dicapai untuk hampir semua gas, serta sinyalnya dapat dikirim ke tampilan elektronik atau pengontrol umpan balik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 di atas. Manometer diafragma beroperasi dengan cara yang sama seperti manometer kapasitansi walaupun dengan rentang pengukuran yang lebih kecil. Selain itu, pengukur properti gas seperti pengukur termokopel dan pengukur Pirani pada dasarnya tidak akurat karena nilainya ditentukan oleh jenis gas dan temperatur. Namun, ketika dikalibrasi alat ini dapat digunakan untuk mengukur kondisi tertentu. Selain itu, terdapat pengukur ionisasi yang pada umumnya digunakan dalam kondisi vakum tinggi atau sangat tinggi.

2.2.4 Sistem Energi

Pada proses CVD termal, faktor seperti tingginya temperatur komponen, struktur insulasi termal, dan temperatur elemen pengukur temperatur tergolong penting. Gambar 2.3 menunjukkan termokopel yang merupakan alat pengukur temperatur yang paling umum. Termokopel ditempatkan antara tabung kuarsa dan komponen pemanas. Ada beberapa jenis termokopel di antaranya tipe B, K, R, dan S untuk pengaplikasian dalam kondisi yang berbeda [21]. Dalam suatu tabung reaksi yang besar dengan diameter lebih dari 25 cm, penyertaan termokopel di dalam ruang diperlukan untuk mengkalibrasi temperatur. Plasma juga digunakan untuk

menyediakan energi dengan pelepasan listrik dari media gas. Dalam hal ini, temperatur elektron secara signifikan lebih tinggi daripada temperatur netral dan temperatur ion [4]. Sebagai contohnya yaitu sumber plasma yang digabungkan secara induktif diilustrasikan pada Gambar 2.2, di mana sumber plasma ini dapat ditempatkan pada bagian dari ruang reaksi untuk integrasi yang mudah ke dalam reaktor tabung.

2.2.5 Sistem Pengolahan Gas Buang

Produk sampingan dan zat kimia yang tidak bereaksi dari CVD cenderung mudah terbakar, beracun bahkan berbahaya bagi pompa sehingga harus ditangani dengan aman. Penanggulangan dilakukan dengan salah satu atau kombinasi komponen seperti perangkap dingin, perangkap kimia, dan perangkap partikel [22]. Perangkap dingin digunakan untuk mengembungkan gas yang mudah menguap dan mendinginkan gas buang untuk menghentikan temperatur minyak pompa vakum agar tidak meningkat. Selain itu, berbagai gas korosif dapat direaksikan atau diserap dengan melewatinya melalui perangkap kimia, serta perangkap partikel dapat memberikan perlindungan terhadap keausan pompa.

2.3 Jenis dan Metode CVD

Chemical Vapour Deposition memiliki beberapa metode yang dapat dibedakan berdasarkan reaksi dan prosesnya. Kategori dan variasi metode pada CVD antara lain sebagai berikut [4].

1. Berdasarkan ciri-ciri fisik dari uap air
 - a) *Direct liquid injection CVD*, di mana pada metode CVD ini terjadi penyisipan zat cair. Pada ruang penguapan, dilakukan penyuntikan larutan sehingga uap air dapat didistribusikan ke substrat.
 - b) *Aerosol assisted CVD*, di mana pada metode ini distribusi prekursor menuju substrat dibantu dengan gas atau larutan aerosol. Metode ini memiliki beberapa kelebihan seperti jangkauan jenis prekursor yang lebih luas, kontrol morfologi lapisan terhadap ukuran, memiliki

biaya produksi yang rendah, dan skalabilitas produksi lapisan dengan area yang luas sehingga cocok untuk aplikasi industri dan produksi massal.

- c) *Oxidative CVD*, menggunakan uap oksidan dan monomer yang mengalami reaksi spontan setelah adsorpsi ke substrat. CVD oksidatif menghasilkan polimerisasi pertumbuhan bertahap dan biasanya menghasilkan lapisan polimer konduksi dan semikonduktor.
2. Berdasarkan pemanasan substrat
 - a) *Hot-wall CVD*, pada metode ini seluruh ruang reaksi dipanaskan oleh tungku eksternal dengan temperatur yang seragam.
 - b) *Cold-wall CVD*, dalam metode dinding dingin ini hanya substrat dan sekitarnya yang dipanaskan. Sedangkan itu, dinding reaktornya tetap dibiarkan dingin pada temperatur kamar sehingga memungkinkan pemanasan dan pendinginan secara cepat.
 3. Berdasarkan tekanan operasi
 - a) *Atmospheric-pressure CVD*, proses CVD yang dilakukan pada tekanan atmosfer. Proses ini tidak memerlukan pompa vakum dan menghasilkan laju aliran gas reaktif yang lambat.
 - b) *Low-pressure CVD* merupakan proses CVD dengan tekanan rendah. Pengurangan tekanan ini dilakukan dengan tujuan untuk memperbaiki distribusi lapisan pada target substrat dan mengurangi reaksi fasa gas yang tak diinginkan. Metode ini menggunakan pompa vakum untuk menggerakkan aliran gas.
 - a) *Ultra-high vacuum CVD*, merupakan metode CVD yang dilakukan pada tekanan yang sangat rendah di bawah 10^{-6} Pa, sehingga transportasi gas dicapai dengan aliran molekuler dan tidak memiliki efek hidrodinamika seperti lapisan batas.
 4. Metode dengan penggunaan plasma
 - a) *Microwave plasma CVD*, adalah metode untuk memproduksi lapisan tipis dengan menggunakan gelombang mikro untuk

menghasilkan plasma dari gas prekursor. Beberapa keuntungan dari metode ini yaitu memiliki reaktivitas tinggi, pemanasan cepat, dan kontrol terhadap variabel yang baik.

- b) *Plasma-enhanced CVD*, adalah proses deposisi uap kimia yang digunakan untuk mendeposisikan lapisan tipis dari bentuk gas ke bentuk padat di atas substrat. Salah satu keuntungan utama PECVD dibandingkan CVD konvensional adalah temperatur deposisi yang lebih rendah sehingga menciptakan lebih sedikit tekanan di antara lapisan tipis yang memiliki koefisien ekspansi atau kontraksi termal yang berbeda.
 - c) *Remote plasma-enhanced CVD*, metode ini serupa dengan PECVD terkecuali pada pembentukan plasma, di mana dalam RPECVD plasma dihasilkan di ruang terpisah yang dikenal sebagai sumber plasma dan kemudian diangkut ke ruang pengendapan.
5. Berdasarkan konfigurasi reaktor CVD
- a) *Horizontal CVD*, merupakan konfigurasi CVD dengan reaktor horizontal. Konfigurasi ini memungkinkan aliran gas sejajar dengan substrat. Reaktor horizontal mudah dibuat dan dimodifikasi untuk tujuan eksperimental, bersih dari sudut pandang kemurnian semikonduktor, dan pengoperasiannya cukup efisien.
 - b) *Vertical CVD*, reaktor dengan desain vertikal di mana aliran gas biasanya tegak lurus dengan substrat. Keuntungan sebenarnya dari desain aliran gas vertikal adalah gas reaktan yang dapat dipasok secara terus-menerus sehingga menghilangkan masalah penipisan hilir. Karena kemampuan beban wafernya, desain ini sering digunakan di laboratorium atau jalur fabrikasi kecil
6. *Metal-organic CVD (MOCVD)*, menggunakan prekursor logam-organik berupa cairan beracun yang diuapkan untuk membentuk lapisan tipis. MOCVD banyak digunakan untuk melakukan sintesis semikonduktor senyawa III – V yang terbuat dari unsur-unsur dari golongan III dan V dalam tabel periodik.

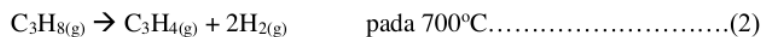
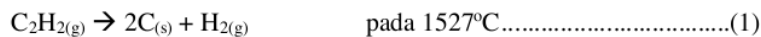
7. *Hot filament/wire CVD*, menggunakan filamen atau kabel yang dipanaskan secara resistif yang digantung di atas substrat yang ditahan pada temperatur lebih rendah. Filamen menyebabkan dekomposisi termal, menghasilkan prekursor yang kemudian teradsorpsi ke substrat yang lebih dingin.
8. *Atomic layer CVD*, merupakan proses deposisi lapisan atom di mana prekursor dimasukkan secara berurutan. Metode ini memungkinkan terjadinya deposisi secara lapis demi lapis atomik yang memberikan kontrol sangat baik terhadap ketebalan, keseragaman, dan komposisi lapisan material.
9. *Initiative CVD*, adalah bentuk metode CVD yang menggunakan inisiator dan monomer sebagai reaktan fase uap yang menyerap dan mengalami polimerisasi pertumbuhan rantai pada substrat yang didinginkan.
10. *Oxidative CVD*, metode yang menggunakan uap oksidan dan monomer, yang mengalami reaksi spontan pada saat adsorpsi ke substrat. CVD oksidatif menghasilkan polimerisasi pertumbuhan bertahap dan biasanya menghasilkan lapisan polimer konduksi dan semikonduktor.
11. *Combustion CVD*, di mana pada metode ini senyawa prekursor seperti senyawa logam-organik atau garam logam ditambahkan ke dalam gas pembakaran. Nyala api digerakkan mendekati permukaan substrat yang akan dilapisi. Energi tinggi di dalam nyala api mengubah prekursor menjadi zat antara yang sangat reaktif sehingga mudah bereaksi dengan substrat lalu membentuk deposit yang melekat kuat.
12. *Hybrid Physical CVD*, adalah metode yang menggabungkan proses deposisi uap fisik (PVD) dan deposisi uap kimia (CVD). Metode ini memberikan kualitas yang lebih baik daripada PVD atau CVD saja, namun memiliki beberapa kelemahan seperti membutuhkan temperatur yang lebih tinggi dari CVD biasa, dan sulit untuk melapisi seluruh permukaan substrat.
13. *Rapid Thermal CVD (RTCVD)*, adalah jenis metode CVD yang menggunakan lampu pemanas atau metode lain untuk memanaskan

substrat wafer dengan cepat. Metode ini memiliki laju deposisi yang lebih cepat, dan kualitas lapisan yang lebih baik. Namun, RTCVD yang melibatkan pemanasan dan pendinginan substrat dengan kecepatan tinggi dapat menyebabkan tekanan termal yang merusak substrat atau lapisan pada substrat. Selain itu, RTCVD dapat menghasilkan deposisi yang tidak seragam di seluruh substrat, terutama untuk substrat dengan area yang luas

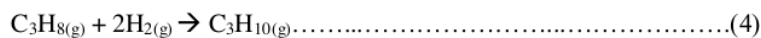
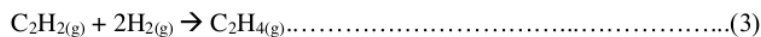
2.4 Tipe Reaksi CVD

Dalam proses CVD. Terdapat 3 tipe reaksi yang terjadi, di mana pada tipe I terjadi proses pirolisis dan reduksi. Pada tipe II, terjadi oksidasi dan proses pembentukan senyawa. Sedangkan itu, pada reaksi CVD tipe III, terjadi reaksi disproporsionasi dan perpindahan reversibel (*reversible transfer*).

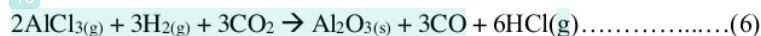
- a) Pirolisis, merupakan proses dekomposisi atau penguraian senyawa dalam fase gas dengan pemanasan pada temperatur tinggi. Proses ini dapat mendepositkan juga Al, Ti, Pb, Mo, Fe, B, Zr, C, Si, SiO₂, Al₂O₃, MnO₂ [23][24].



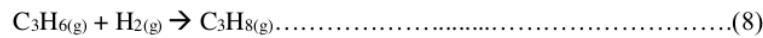
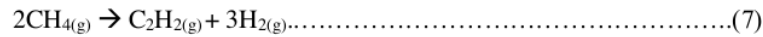
- b) Reduksi, proses ini menggunakan gas hidrogen yang berfungsi untuk mengurangi halida, oksihalida, dan karbonil halida. Pada propana dan asetilena, proses ini dapat membentuk senyawa hidrokarbon lain. Selain itu, proses ini dapat mendepositkan juga Al₂O₃, TiO₂, SnO₂, dan ZnO.



- c) Oksidasi, oksida dihasilkan dengan menggunakan gas oksigen. Proses ini dapat mendepositkan juga TiO₂, Ta₂O₅, SnO₂, dan ZnO. Proses ini tidak terlibat dalam pembentukan C₃H₈ dan C₂H₂.



- d) Pembentukan senyawa, proses ini melibatkan reaksi kimia untuk pembentukan senyawa baru. Dalam proses CVD, pembentukan senyawa berpotensi mengarah pada pembentukan C₃H₈ atau C₂H₂.



- e) Disproporsionasi, salah satu jenis reaksi redoks, di mana logam padat dapat terdeposit jika terdapat dua valensi atom untuk logam dengan temperatur stabil yang berbeda. Proses ini tidak terlibat dalam pembentukan C₃H₈ dan C₂H₂.



- f) Perpindahan reversibel, dapat terjadi proses deposisi bergantung pada temperatur dan arah aliran gas. Meskipun reaksi ini dapat terjadi pada metode CVD, proses ini tidak terlibat secara langsung dalam pembentukan C₃H₈ dan C₂H₂.



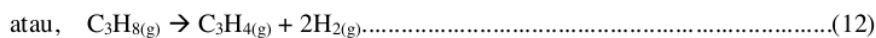
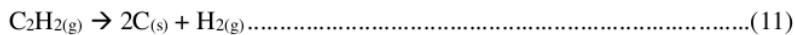
13

2.5 Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)

Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) adalah salah satu metode CVD yang paling luas pengaplikasiannya di industri dalam memproduksi DLC menggunakan teknologi plasma. Dalam PECVD, molekul gas prekursor untuk deposisi lapisan yang tipis dapat dengan mudah distimulasi, dipisahkan, dan diionisasi pada temperatur gas yang sangat rendah [25]. Dalam metode ini, plasma ditambahkan ke dalam ruang deposisi dengan gas reaktif untuk menciptakan permukaan padat yang diinginkan pada substrat. Plasma yang digunakan merupakan gas terionisasi sebagian dengan kandungan elektron bebas yang tinggi sekitar 50%. Plasma dibagi menjadi dua kelompok yaitu plasma termal dan non-termal (dingin). Pada plasma termal, elektron dan partikel dalam gas berada pada temperatur yang sama sedangkan pada plasma dingin, elektron memiliki temperatur yang jauh lebih tinggi daripada partikel dan ion. Oleh karena itu, plasma dingin dapat memanfaatkan energi elektron hanya dengan mengubah tekanan. Hal ini

memungkinkan sistem PECVD untuk beroperasi pada temperatur rendah di antara 100°C hingga 400°C [26].

Energi dari elektron dalam plasma termal dingin berguna dalam PECVD. Ketika jalur aliran gas rata-rata berukuran besar dan ukuran sistem kecil, elektron bebas tidak akan bertukar energi dengan ion sebelum bertabrakan dengan objek luar lainnya. Energi dari elektron kemudian digunakan untuk memisahkan gas reaktif untuk membentuk lapisan padat pada substrat. Sistem PECVD harus mengandung dua elektroda, gas plasma, dan gas reaktif dalam sebuah ruangan. Untuk memulai proses PECVD, *wafers* yang merupakan irisan tipis berbahan semikonduktor ditempatkan di elektroda bawah dan gas reaktif dengan elemen pengendapan dimasukkan ke dalam ruang. Plasma kemudian dimasukkan ke dalam ruang antara dua elektroda dan tegangan diterapkan untuk memicu plasma. Plasma yang digunakan dalam teknik PECVD memungkinkan penggunaan berbagai macam prekursor. Ketika prekursor gas atau cair dengan tekanan uap tinggi dimasukkan ke dalam ruang reaksi PECVD, maka akan terjadi aktivasi dan disosiasi prekursor. Dengan adanya plasma, memungkinkan pengendapan terjadi pada temperatur yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan CVD [7]. Secara sederhana, reaksi yang terjadi di dalam reaktor selama proses PECVD dengan gas prekursor hidrokarbon asetilena atau propana, yaitu:

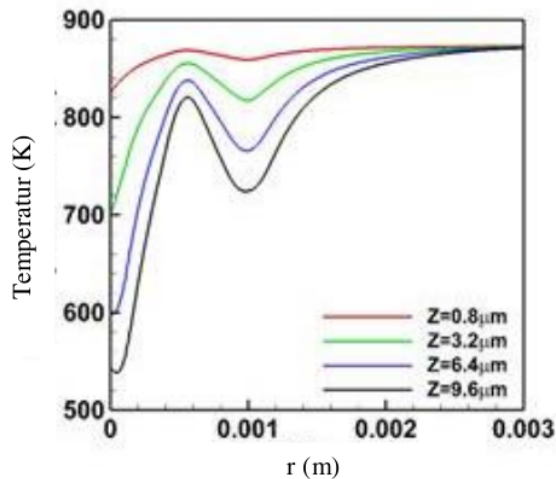


Keuntungan penting dari proses PECVD yaitu kemampuan untuk memasukkan bahan prekursor yang berbeda selama proses pelapisan, di mana kemampuan tersebut dapat mengubah komposisi lapisan atau memasukkan beberapa lapisan material selama pertumbuhan. Hal ini memungkinkan pembentukan lapisan adhesi pada antarmuka pelapisan untuk meningkatkan ikatan yang kuat pada lapisan atau struktur beberapa lapisan untuk meningkatkan sifat spesifik lapisan pada substrat [27].

Gas hidrokarbon seperti asetilena (C_2H_2) dan propana (C_3H_8) dapat digunakan sebagai gas prekursor dalam PECVD untuk mendepositkan lapisan karbon amorf terhidrogenasi (a-C:H). Pemilihan gas hidrokarbon dapat

mempengaruhi sifat-sifat lapisan yang dideposisikan seperti densitas, kekerasan, dan sifat mekanik. Hal ini dikarenakan gas ini mengalami disintegrasi dan polimerisasi radikal saat terkena aliran plasma berenergi tinggi, diikuti dengan deposisi lapisan tipis. Reaksi-reaksi ini pertama kali terjadi dalam plasma sebagai akibat dari molekul gas prekursor yang bertabrakan dengan elektron berenergi tinggi yang kemudian melalui aliran gas, bergerak ke substrat di mana mereka bereaksi dan diserap pada permukaan substrat untuk menumbuhkan lapisan. Sebuah studi menunjukkan bahwa penambahan argon yang diperlukan untuk menstabilkan pelepasan asetilena (C_2H_2) dapat meningkatkan proses fase gas seperti disosiasi, pembentukan hidrogen atom dan spesies CH [28].

Temperatur yang digunakan selama proses pelapisan DLC menjadi faktor lainnya terhadap sifat mekanik produk. Penggunaan temperatur yang berbeda tidak hanya mempengaruhi sifat mekanik pada substrat, melainkan selama proses PECVD di dalam reaktor terjadi perbedaan laju alir dan distribusi gas seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 di bawah di mana seiring meningkatnya temperatur maka laju alir dan distribusi gas juga semakin meningkat. Sedangkan, peningkatan temperatur akan berbanding terbalik dengan nilai densitas gas di dalam reaktor selama proses PECVD [29].



Gambar 2.7 Profil Temperatur terhadap Arah Radial Radius Pada Lokasi Vertikal [29]

2.6 Gas Hidrokarbon

Gas hidrokarbon secara definisi merupakan gas yang mengandung unsur karbon dan hidrogen secara eksklusif. Hidrokarbon dibagi menjadi tiga kelas senyawa utama, yaitu hidrokarbon jenuh, hidrokarbon tak jenuh, dan hidrokarbon aromatik. Hidrokarbon jenuh adalah hidrokarbon yang hanya mengandung ikatan tunggal di antara atom-atom karbon, sedangkan hidrokarbon tak jenuh mengandung setidaknya satu ikatan rangkap dua atau rangkap tiga di antara atom-atom karbon. Di sisi lain, hidrokarbon aromatik adalah jenis hidrokarbon tak jenuh yang mengandung cincin atom dengan ikatan rangkap dua dan rangkap tiga secara bergantian [30]. Gas hidrokarbon digunakan sebagai gas prekursor pada proses PECVD, di mana gas ini mempengaruhi laju deposisi. Laju deposisi pada proses PECVD dapat disimulasikan dengan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) dengan memodelkan aliran gas prekursor pada alat *plasma chamber*. Aliran gas prekursor dapat dikontrol untuk mengoptimalkan proses deposisi. Gas asetilena (C_2H_2) dan propana (C_3H_8) termasuk gas hidrokarbon yang dapat digunakan sebagai gas prekursor.

2.6.1 Asetilena

Asetilena atau etilena yang memiliki rumus molekul C_2H_2 adalah alkuna yang paling sederhana. Karena kesederhanaan struktur dan reaktivitasnya yang tinggi, asetilena tergolong serbaguna untuk sintesis organik dan telah berkembang dengan cepat. Asetilena umumnya diperoleh dari batu bara dan gas alam. Sumber daya tersebut akan bertahan lebih lama daripada sumber minyak saat ini. Oleh karena itu, proses kimia untuk asetilena sangat penting dalam berbagai aspek. Asetilena dapat diproduksi dengan beberapa metode yang sudah mutakhir. Salah satunya didasarkan pada reaksi kalsium karbida yang diperoleh dari batu bara dan kapur dengan air. Metode lainnya termasuk pembakaran parsial hidrokarbon dan elektrotermal dalam tungku busur listrik [31].

Asetilena murni adalah gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Gas ini ringan dan mudah terbakar dengan suhu pembakaran yang tinggi, sehingga asetilena banyak digunakan dalam pengelasan. Sifat kimia dari

asetilena dapat dilihat pada Tabel 2.1. Sifat nyala api asetilena yang sangat terang berkontribusi pada penggunaan lampu karbida. Istilah lampu karbida mencerminkan interaksi kalsium karbida dengan air, diikuti dengan pembakaran asetilena yang dilepaskan di kompartemen lain dari perangkat. Aplikasi kimiawi asetilena sangat beragam salah satunya memiliki praktis yang besar, misalnya reaksi vinilasi yang merupakan reaksi umum untuk monomer yang mengandung vinil untuk produksi bahan polimer. Turunan polivinil ini menjadi komponen yang sangat diperlukan untuk banyak produk seperti pernis, cat, perekat, dan bahan pengemas [32].

Tabel 2.1 Sifat Kimia Asetilena

Sifat	Nilai
Massa Molekul	26,0379 g/mol
Massa Jenis (Gas)	1,095 kg/m ³
Titik Leleh	-82,2 °C
Temperatur Kritis	36,2°C
Tekanan Kritis	6,25 MPa
Konduktivitas Termal	0,024 W/m.°C

2.6.2 Propana

Propana merupakan jenis hidrokarbon dengan rumus molekul C₃H₈ yang berupa gas pada temperatur dan tekanan standar, tetapi dapat dimampatkan menjadi cairan yang dapat dialirkan. Propana merupakan produk sampingan dari pemrosesan gas alam dan penyulingan minyak bumi yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar. Propana termasuk salah satu dari sekelompok *liquefied petroleum gas* (LPG), dari jenis lainnya seperti butana, propilena, butadiena, butilena, isobutilena, dan campurannya.

Propana diproduksi dengan dua cara, penyulingan minyak dan pengolahan gas. Kedua proses ini dimulai dengan mengebor sumur minyak bawah tanah. Propana diperoleh dari minyak mentah yang dipanaskan melalui menara penyulingan. Kemudian diberi tekanan dan disimpan dalam

bentuk cair dalam tangki dan silinder. Namun, jumlah propana yang diekstraksi sangat sedikit dari gas alam dikarenakan gas alam mentah yang keluar dari sumur minyak mengandung beberapa gas lainnya. Selain itu, gas ini dipisahkan dari gas lain melalui pabrik yang secara efektif menghilangkan propana dari campuran gas. Karena peningkatan ekstraksi gas serpih ini, produksi propana telah berkurang secara drastis. Gas propana yang dihasilkan ini tidak berwarna dan tidak berbau. *Ethyl merkaptan* ditambahkan sebagai tindakan pencegahan keselamatan yang berfungsi menambah bau seperti telur busuk [33]. Sifat kimia propana dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Sifat Kimia Propana

Sifat	Nilai
Berat Molekul	44,097 g/mol
Massa Jenis (Gas)	1,808 kg/m ³
Titik Leleh	-189,9 °C
Temperatur Kritis	96,68°C
Tekanan Kritis	4,26 MPa
Konduktivitas Termal	0,017 W/m.°C

2.7 Simulasi Proses

Simulasi adalah proses merancang model operasional suatu sistem dan melakukan eksperimen dengan model yang bertujuan untuk memahami perilaku sistem atau mengevaluasi strategi alternatif untuk pengembangan atau pengoperasian sistem. Simulasi harus dapat mereproduksi aspek-aspek tertentu dari perilaku sistem yang dimodelkan dengan tingkat akurasi yang dapat diterima. Simulasi proses dapat memandu dan meminimalkan penelitian eksperimental, tetapi tidak dapat menghilangkannya. Kalibrasi model membutuhkan data eksperimen yang akurat dikarenakan eksperimen yang membuktikan model, dan bukan sebaliknya. Simulasi proses dapat memberikan kontribusi yang signifikan, seperti:

- a. Pengembangan teknologi baru berkelanjutan yang bertujuan untuk

meminimalkan kebutuhan energi dan material, serta mengurangi limbah dan polutan.

- b. Memastikan operasi yang benar-benar aman dan tangguh dengan mengintegrasikan kemampuan kontrol dalam desain konseptual pada tingkat awal.
- c. Perbaiki permanen dari teknologi yang ada dengan melakukan pembenahan, dan penguatan.

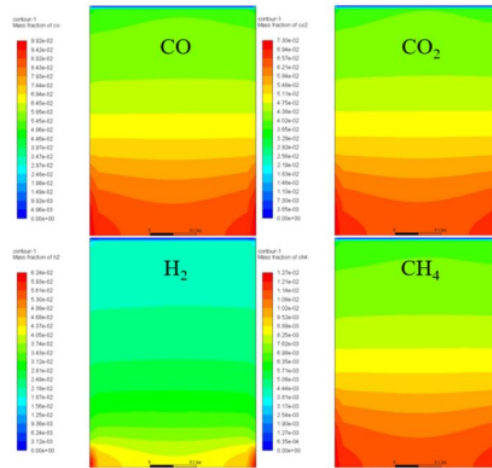
Simulasi proses yang didasarkan pada model ini harus mencerminkan realitas pada tingkat akurasi yang dibutuhkan oleh aplikasi. Memiliki pengetahuan yang baik tentang latar belakang pemodelan sangat penting untuk mendapatkan hasil yang dapat diandalkan dan menggunakan perangkat lunak secara efektif. Perbedaan antara proyek dengan bantuan komputer yang berhasil dan gagal lebih disebabkan oleh kapasitas pengguna yang kurang memadai untuk mendapatkan manfaat dari lingkungan pemodelan daripada kinerja simulator yang tidak memadai. Hal tersebut yang menjadi sebab mengapa simulasi untuk suatu masalah harus dipersiapkan dengan hati-hati [34].

Penggunaan struktur *mesh* yang tepat pada model membuat metode numerik pada simulasi proses mampu menyelesaikan persamaan dinamika fluida komputasi yang kompleks dengan resolusi tinggi. Pada setiap langkah dalam hitungan waktu, persamaan yang mengatur didiskritisasi sesuai dengan distribusi sel yang memungkinkan *solver* simulasi proses seperti *software ANSYS Fluent* untuk mengimplementasikan *finite volume method (FVM)* yang merupakan metode untuk mengevaluasi persamaan diferensial parsial dalam bentuk persamaan aljabar [35]. Sebuah penelitian membandingkan akurasi fisik dari perhitungan dalam kode CFD pada *software ANSYS Fluent* dengan menggunakan metode penyelesaian gradien kuantitas transportasi pada permukaan sel dan pengaruh tipe *mesh* sehingga didapatkan hasil bahwa *mesh* kasar jelas lebih akurat. Simulasi tersebut terdapat kesalahan numerik, maka tersedia opsi dengan mengatur kombinasi parameter perhitungan yang benar [36].

2.8 ANSYS 2023 R2

ANSYS adalah paket pemodelan elemen terbatas untuk tujuan umum yaitu menyelesaikan berbagai masalah mekanis secara numerik. Masalah-masalah ini dapat tergolong sebagai statis atau dinamis, analisis struktural baik linier maupun nonlinier, perpindahan panas, dan masalah fluida, serta masalah akustik dan elektromagnetik. ANSYS mengembangkan dan memasarkan perangkat lunak simulasi teknik untuk digunakan di seluruh siklus hidup produk. ANSYS digunakan untuk menentukan bagaimana sebuah produk akan berfungsi dengan spesifikasi yang berbeda, tanpa membuat produk uji coba. Sebagian besar simulasi ANSYS dilakukan dengan menggunakan sistem ANSYS *Workbench* yang merupakan salah satu produk utama dari perusahaan.

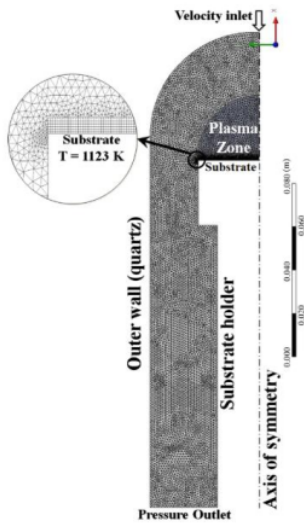
Penggunaan *software* ANSYS *Fluent* dapat menjadi pendekatan terbaik yang menampilkan prediksi yang jelas. Dengan menggunakan teknik *computational fluid dynamics* (CFD), aliran fluida dan fenomena yang terkait seperti perilaku momentum perpindahan panas dan massa dapat diprediksi dengan menggunakan metode penyelesaian numerik. Model matematis tersebut meliputi konservasi massa, momentum, energi, spesies, dan efek gaya internal dan eksternal. Simulasi CFD terbukti menjadi alat yang cukup berpengaruh untuk penelitian dan pengembangan saat ini untuk simulasi perpindahan panas dan pemodelan penukar panas, khususnya pada sistem yang melibatkan aliran multifase. ANSYS *Fluent* dikenal sebagai perangkat lunak yang canggih untuk menganalisis pengaruh sifat fluida dan aliran gas yang melalui sistem. Kelebihan lain dari ANSYS *Fluent* adalah gambar yang dikembangkan untuk perilaku aliran di dalam benda seperti pipa dapat dengan mudah divisualisasikan dengan gambar penuh warna sehingga dapat dianalisis dengan baik [37]. ANSYS *Fluent* mampu menyelesaikan persamaan diferensial parsial nonlinier yang menggambarkan kekekalan massa, momentum, dan energi. Sebagai contohnya pada Gambar 2.12 menampilkan komposisi syngas dan distribusi dari masing-masing gas sintesis di dalam reaktor yang terdiri dari CO, CO₂, H₂, dan CH₄. Distribusi gas dalam reaktor sangat terkonsentrasi di bagian bawah dan tengah reaktor.



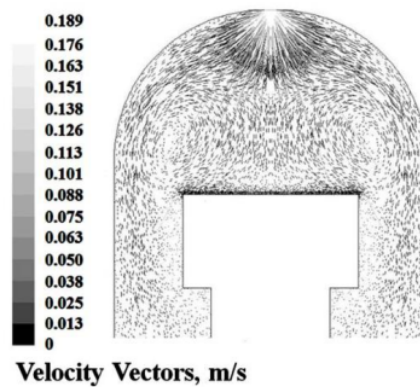
Gambar 2.8 Distribusi Gas dalam Reaktor pada 7200s [38]

Simulasi CFD lainnya mengenai metode PECVD telah dilakukan dengan pemodelan 2D yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 termasuk bagian dalam reaktor PECVD yang terdiri penahan substrat dan zona plasma. Geometri reaktor dibuat dengan menggunakan ANSYS *Design Modeler* yang kemudian dijalankan dengan batasan kondisi seperti plasma yang dimodelkan dengan menggunakan formulasi waktu tunak (*steady-state*) yang berarti sistem telah mencapai kondisi kesetimbangan di mana sifat-sifat fluida seperti kecepatan, tekanan, dan temperatur konstan dari waktu ke waktu.

Simulasi menggunakan gas hidrokarbon berupa gas asetilena yang masuk ke dalam reaktor dari sisi atas reaktor. Gas terbagi menjadi dua komponen, di mana salah satu mengalir ke saluran keluar dan yang lainnya mengalir ke substrat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Aliran dan lintasan spesies gas divisualisasikan dengan menggunakan garis-garis lintasan. Pada permukaan atas substrat, gas mengalir dari pusat ke tepi substrat sehingga temperatur pada bagian tengah substrat cenderung lebih tinggi. Selain itu, besarnya aliran gas di sekitar substrat relatif lebih kecil dibandingkan daerah lainnya [10].



Gambar 2.9 Domain Komputasi Dua Dimensi [10]



Gambar 2.10 Vektor Kecepatan Distribusi Gas di Sekitar Substrat [10]

2.9 Pemodelan Matematika

Pemodelan matematika merupakan deskripsi matematis dari model dalam bentuk sistem persamaan yang terdiri dari persamaan kontinuitas, hukum kekekalan momentum, dan hukum kekekalan energi. Untuk memodelkan dinamika aliran gas digunakan persamaan Navier-Stokes yang ditambahkan dengan model $k-\epsilon$ standar pada persamaan (13) mengenai kontinuitas. Setelah itu, dilanjutkan persamaan (14)

dan (15) tentang kinetik dan laju disipasi ϵ atau laju energi yang hilang dalam fluida akibat gaya viskos [39].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla k = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + P_k - \rho \epsilon \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots\dots(15)$$

di mana x_i mewakili koordinat spasial dalam arah (i) atau koordinat x dalam kartesius, ρ merupakan densitas fluida, u_i mewakili kecepatan fluida dalam arah (i), k adalah laju perubahan energi kinetik, t mewakili waktu di mana pada kondisi tunak (*steady-state*) nilainya adalah nol, \vec{u} melambangkan vektor kecepatan fluida, μ_t adalah nilai viskositas turbulen, ∇ merupakan lambang gradien dari energi kinetik (k) ataupun energi disipasi (ϵ), P_k adalah besaran energi kinetik yang dihasilkan dan disebabkan oleh gradien kecepatan rata-rata, ϵ merupakan laju disipasi energi kinetik, $C_{\epsilon 1}$ serta $C_{\epsilon 2}$ merupakan konstanta, σ_k adalah bilangan Prandtl untuk energi, dan σ_ϵ adalah bilangan Prandtl untuk disipasi. Prandtl merupakan bilangan tak berdimensi atau tidak memiliki satuan, antara hubungan laju perpindahan energi secara konduksi dengan laju perpindahan energi secara konveksi.

Metode PECVD pada umumnya menggunakan pemodelan deposisi yang melibatkan proses fisik berupa deposisi material terhadap substrat sebagai objek. Pemodelan ini berbeda dengan pemodelan difusi yang melibatkan proses matematis untuk mentransformasi distribusi data mengenai pergerakan molekul dari konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah. Model deposisi digunakan untuk proses manufaktur, sedangkan model difusi digunakan untuk analisis data. Persamaan dasar pada model deposisi ditunjukkan pada persamaan (16) dan model difusi ditunjukkan pada persamaan (17) yang berdasar pada hukum Fick kedua berikut.

$$\frac{\partial(\phi c)}{\partial t} = -\rho_s j \dots\dots\dots(16)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c \dots\dots\dots(17)$$

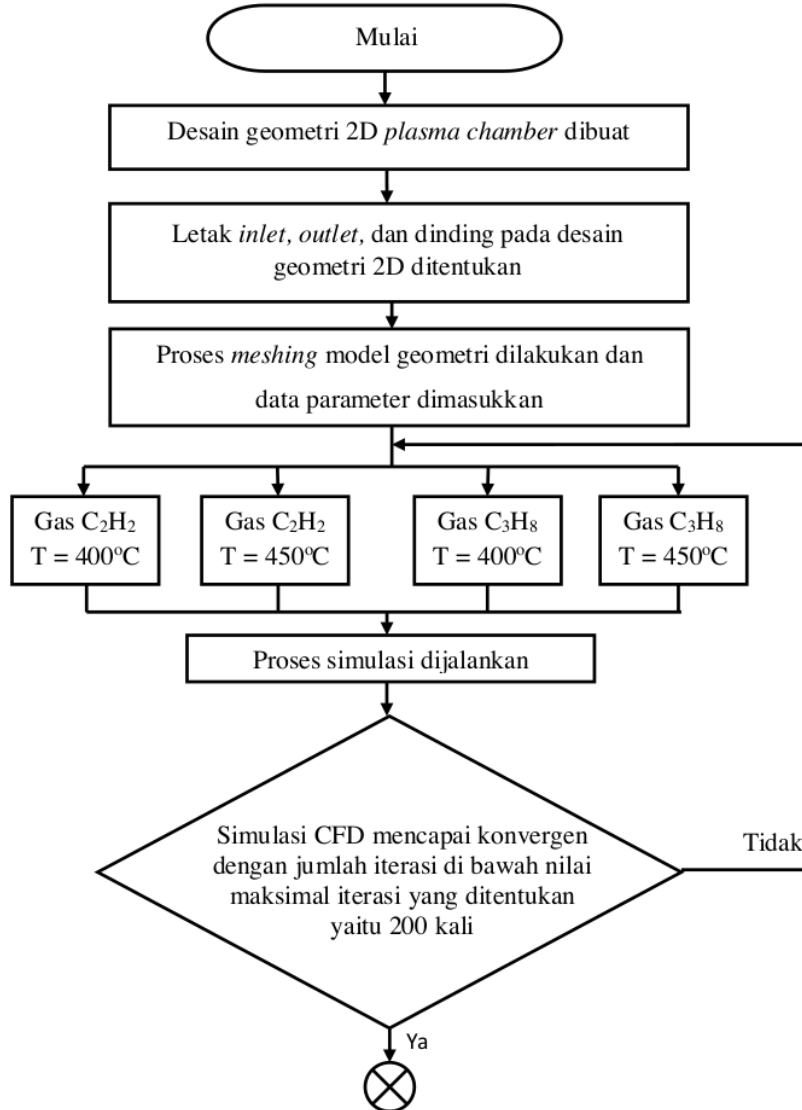
di mana ϕ adalah fraksi mol material terdeposit, c adalah konsentrasi material terdeposit, t melambangkan waktu, ρ_s adalah densitas dari material terdeposit, j adalah besaran fluks material terdeposit, D mewakili nilai koefisien difusi, ∇^2 mewakili turunan spasial kedua yang mengukur laju ketika molekul material bergerak.

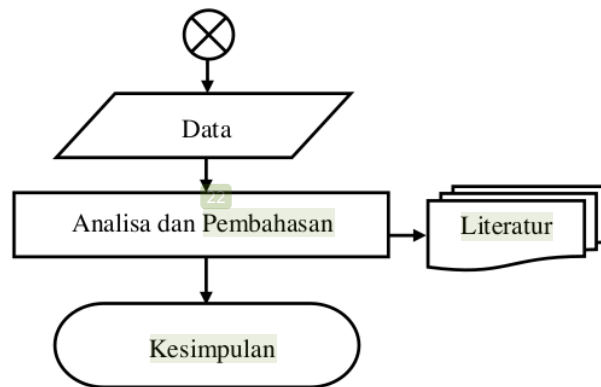
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Penelitian ini terdiri dari beberapa langkah yang dapat diringkas dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.1 berikut.



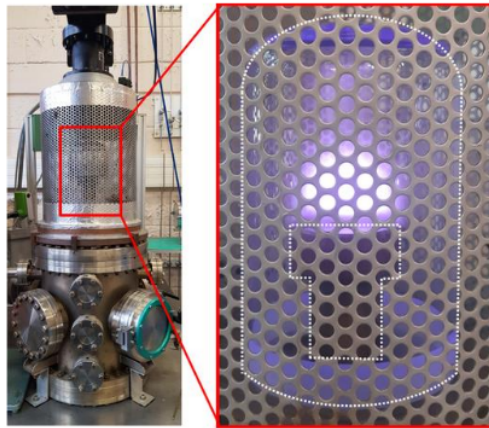


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 **Prosedur Percobaan**

Prosedur percobaan yang digunakan pada penelitian ini dijabarkan sebagai berikut.

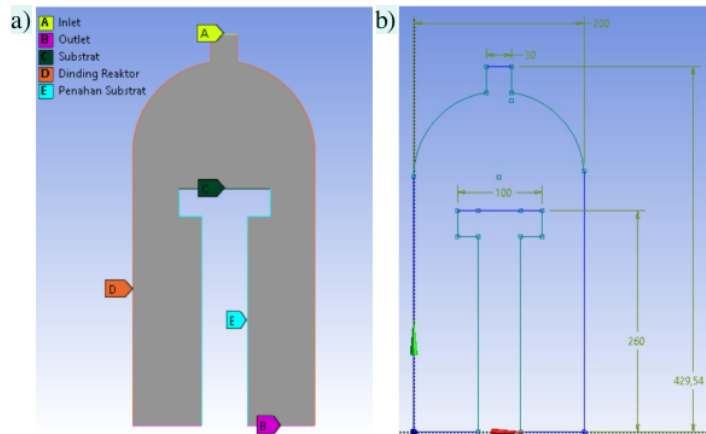
3.2.1 **Desain Geometri**



Gambar 3.2 PECVD Bell-jar Reactor [40]

Tahapan awal yaitu membuat desain geometri 2D dari *plasma chamber* dengan menggunakan metode *fluid flow (fluent)* pada ANSYS *fluent* versi 2023 R2. Setelah dilakukan pembuatan desain 2D *plasma chamber*, kemudian menentukan sisi geometri yang akan menjadi bagian *inlet* untuk gas prekursor, *outlet*, dinding reaktor dan dinding substrat.

Setelah itu, proses *meshing* dilakukan untuk membagi geometri menjadi elemen yang dapat digunakan. Desain geometri dan dimensi geometri dari model *plasma chamber* beserta substrat logam diilustrasikan pada Gambar 3.3 dan Tabel 3.4 di bawah ini dengan pemodelan reaktor menyerupai *bell-jar reactor* seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.3 Desain 2D *Plasma Chamber* a) Bagian Dalam Reaktor, dan b) Dimensi Geometri

Tabel 3.1 Dimensi Geometri Model *Plasma Chamber*

Spesifikasi	Keterangan
Tinggi Reaktor	429,54 mm
Diameter Reaktor	200 mm
Tinggi Penahan Substrat	260 mm
Diameter <i>Inlet</i>	30 mm
Material Dinding Reaktor	AISI 304 <i>Stainless Steel</i>
Material Substrat	Baja AISI D2
Panjang Substrat	100 mm
Ketebalan Substrat	1 mm

3.2.2 Parameter Simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Proses *meshing* yang telah dijalankan dilanjutkan dengan memasukkan parameter dan variabel simulasi seperti jenis gas prekursor,

temperatur pemanasan gas, kecepatan alir gas, dan tekanan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2, Tabel 3.3, dan Tabel 3.4. Apabila data parameter telah dimasukkan, maka simulasi CFD dapat dilakukan dengan metode numerik *pressure-based solver* di mana metode ini digunakan karena kecepatan alir gas yang rendah sehingga aliran fluida cenderung menjaga nilai densitas gas agar tetap konstan atau tidak mengalami perubahan yang signifikan. Maksimal iterasi 200 kali dengan penentuannya berdasarkan uji coba awal (*trial and error*) simulasi yang menunjukkan bahwa simulasi telah mencapai konvergen di bawah 200 iterasi, di mana solusi penyelesaian secara komputasi telah mencapai kondisi stabil.

Tabel 3.2 Data Parameter Simulasi CFD

Parameter	Keterangan
Temperatur Pemanasan Gas	400°C dan 450°C
Tekanan Gas	1,2 mbar, 1,4 mbar, 1,6 mbar
Kecepatan Aliran Masuk Gas	5 m/dtk
Jenis Gas Prekursor	C ₃ H ₈ (propana) dan C ₂ H ₂ (asetilena)
Gravitasi	9,8 m/dtk ²
Kondisi Gas	<i>Real Gas</i> (Redlich-Kwong)
Tingkat Mesh	<i>Fine, adaptive mesh</i>
<i>Energy Equation</i>	<i>On</i>
Inisialisasi (<i>initialization</i>)	<i>Hybrid initialization</i>
Iterasi Maksimal	200 kali

Tabel 3.3 Data Parameter Model Gas Propana

Parameter	Nilai
Densitas (<i>real gas</i>)	4,35×10 ³ kg/m ³
Konduktivitas Termal	0.0177 W/m.°C
Kapasitas Panas	1680 J/Kg.°C
Berat Molekul	44,09 g/mol
Temperatur Kritis	96,68°C

Tabel 3.4 Data Parameter Model Gas Asetilena

Sifat	Nilai
Densitas (<i>real gas</i>)	$2,57 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Konduktivitas Termal	$0,024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Kapasitas Panas	$1674 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$
Berat Molekul	$26,0379 \text{ g/mol}$
Temperatur Kritis	$36,2^\circ\text{C}$

3.2.3 Model Matematika Simulasi

Proses PECVD yang menjadi dasar simulasi CFD ini memerlukan pemodelan dinamika gas, perpindahan panas, perpindahan massa, elektromagnetisme, dan kinetika kimia sehingga pada persamaan (18) dan persamaan (19) berikut mengenai hukum kekekalan massa dan persamaan Navier-Stokes untuk aliran laminar kondisi waktu *steady-state* yang menggambarkan dinamika aliran gas di dalam ruang proses [41].

$$\Delta(\rho V) = 0 \dots\dots\dots(18)$$

$$\nabla(\rho V u_i) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \nabla(\mu \nabla u_i) \dots\dots\dots(19)$$

di mana ρ adalah densitas, V adalah vektor kecepatan, u_i adalah proyeksi vektor kecepatan pada sumbu i atau sumbu x pada koordinat kartesius, μ adalah viskositas kinetik. Persamaan perpindahan panas dapat dituliskan sebagai

$$\nabla(\rho V h_0) = \nabla(k_{eff} \nabla T) + S_h \dots\dots\dots(20)$$

di mana h_0 adalah entalpi, k_{eff} adalah konduktivitas termal, T adalah temperatur, S_h adalah sumber panas disebabkan reaksi kimia. Model plasma yang digabungkan secara kapasitif didasarkan pada fungsi persamaan distribusi energi elektron Maxwellian. Keseimbangan elektron tersebut dapat dituliskan sebagai

$$\nabla \Gamma_e = S \dots\dots\dots(21)$$

di mana Γ_e adalah fluks elektron dan S adalah sumber elektron berdasarkan reaksi kimia. Keseimbangan energi di dalam plasma dapat dituliskan sebagai

$$\nabla \left(\frac{5}{2} T_e \cdot \Gamma_e - \chi \nabla T_e \right) = P - P_c \dots \dots \dots (22)$$

di mana T_e adalah temperatur elektron, χ adalah konstanta termodifusi elektron, P adalah daya yang teradsorpsi dalam plasma, dan P_c adalah besaran energi yang hilang karena reaksi tumbukan elektron. Distribusi spasial potensial elektrostatik dijelaskan dengan persamaan Poisson yang dapat dituliskan sebagai

$$-\nabla \cdot \epsilon_r \nabla \varphi = e(\sum_i q_i n_i - n_e) \dots \dots \dots (23)$$

di mana ϵ_r adalah permitivitas listrik relatif, q_i adalah muatan ion, φ adalah fluks elektrik, n_i adalah densitas ion, e adalah muatan listrik partikel, n_e adalah densitas elektron. Model persamaan perpindahan massa untuk spesies atau partikel pada sumbu i dapat dituliskan sebagai

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} J_{ij} + M_i \omega_i \dots \dots \dots (24)$$

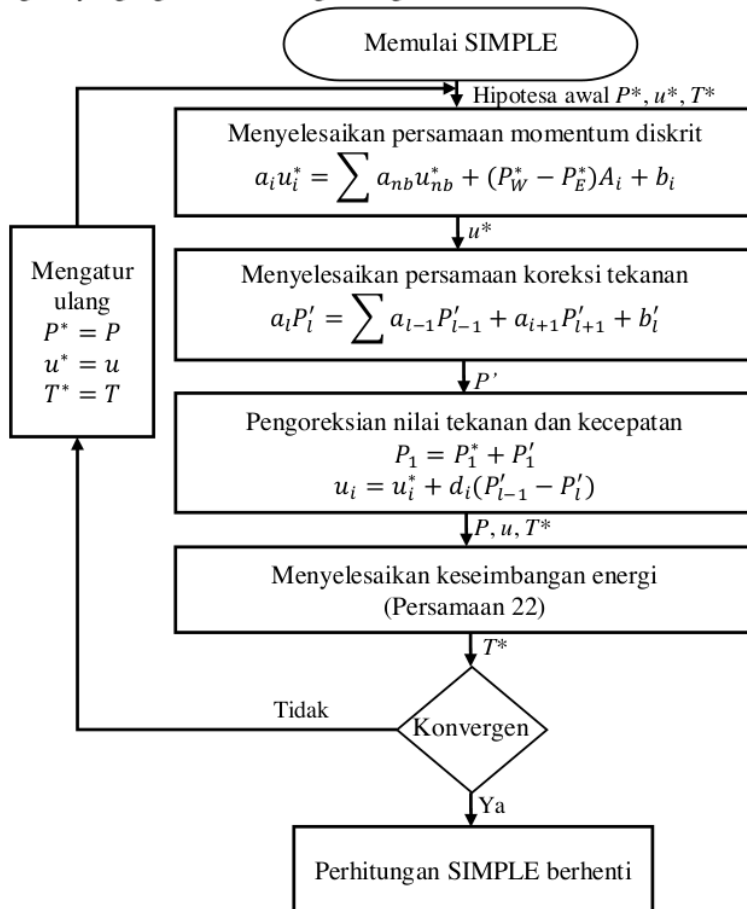
di mana u_j adalah proyeksi vektor kecepatan pada sumbu j atau sumbu y pada koordinat kartesius, Y_i adalah fraksi massa spesies atau partikel pada sumbu i , J_{ij} adalah proyeksi vektor fluks difusi pada sumbu j , M_i adalah massa molar spesies atau partikel di sumbu i , dan ω_i adalah besaran laju reaksi.

3.2.4 Pengolahan Data Hasil Simulasi

Simulasi CFD pada ANSYS *Fluent* dikatakan berhasil apabila hasil simulasi telah mencapai konvergen. Hasil simulasi berupa ilustrasi distribusi gas prekursor dan temperatur pada model geometri *plasma chamber*. Dengan literatur sebagai acuannya, hasil simulasi kemudian dianalisis mengenai pengaruh perbedaan temperatur dan jenis gas hidrokarbon yang digunakan terhadap karakteristik aliran gas yang terbatas pada densitas, laju alir gas, dan distribusi tekanan gas proses PECVD pada substrat.

3.3 Algoritma Simulasi CFD

Simulasi CFD ini menggunakan algoritma *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* (SIMPLE) sebagai metode penyelesaian yang tepat untuk simulasi aliran fluida pada model dua dimensi. Algoritma SIMPLE merupakan solusi iteratif atau berulang dari persamaan momentum dan persamaan kontinuitas. Algoritma SIMPLE pada simulasi CFD bekerja dengan beberapa langkah yang digambarkan dengan diagram alir berikut.



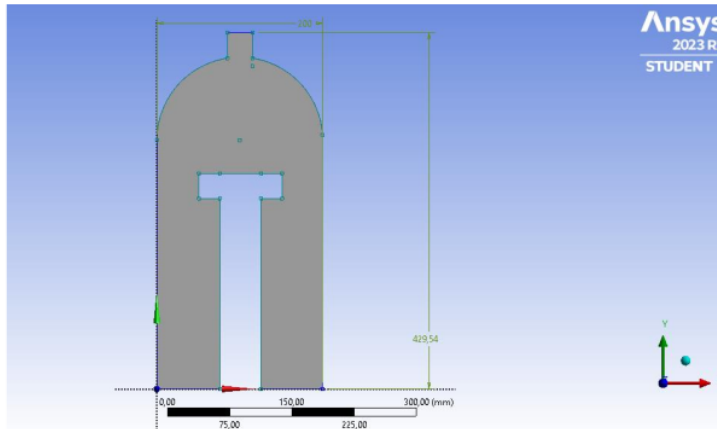
Gambar 3.4 Diagram Alir Algoritma SIMPLE Keadaan Tunak (*Steady-State*)

5
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Bagian ini menjabarkan hasil akhir simulasi yang telah melewati *trial and error*. Sebelum dijalankannya simulasi, model geometri 2D dari *plasma chamber* dibuat dengan *Design Modeler*. *Plasma chamber* yang dimodelkan memiliki dimensi panjang atau lebar diameter 200 mm dan tinggi 429,54 mm. Model kemudian ditentukan bagian *inlet*, *outlet*, dinding reaktor, dan substrat. Substrat yang digunakan berupa plat bermaterial baja D2 dengan panjang substrat 100 mm. Sedangkan itu, dinding reaktor pada *plasma chamber* menggunakan material *stainless steel 304*. Hasil desain geometri 2D dari *plasma chamber* diilustrasikan pada Gambar 4.1 berikut.

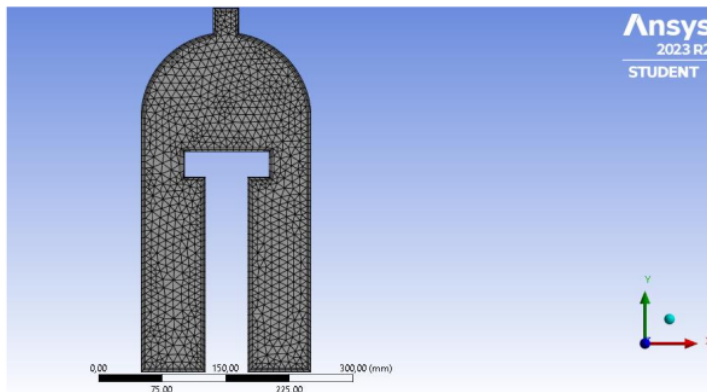


Gambar 4.1 Model Geometri *Plasma Chamber*

Geometri 2D yang sudah didesain, dilanjutkan dengan proses *meshing* yang bertujuan untuk membantu mendapatkan hasil yang akurat. *Meshing* di ANSYS *Fluent* merupakan langkah penting dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Langkah ini melibatkan pembagian model geometri menjadi subdomain kecil yang tidak saling tumpang tindih, yang dikenal sebagai sel atau elemen. Sel-

sel ini membentuk *grid* atau *mesh* yang mencakup seluruh area pada model. Kualitas *mesh* secara signifikan mempengaruhi akurasi hasil simulasi. Pada simulasi ini, digunakan proses *meshing* dengan *adaptive meshing* yang menyempurnakan *mesh* berdasarkan kalkulasi *solution* yang dijalankan. Skema ini memungkinkan untuk memulai dari *mesh* yang sangat kasar dan secara dinamis memperhalus daerah bergradien tinggi.

Tingkat kehalusan *mesh* juga diatur, di mana tingkat kehalusan ini terbagi menjadi tiga jenis. Struktur *mesh* dibagi ke dalam area lengkung sampai masing-masing elemen *mesh* menjangkau sudut kelengkungan ini. *Mesh* dalam simulasi ini diatur pada tingkat halus (*fine*) di mana sekitar 36 hingga 12 derajat sudut akan direntangkan dalam struktur jaring. Proses *meshing* yang telah dilakukan ini menunjukkan bahwa model memiliki jumlah *nodes* sebanyak 3322 dan jumlah *elements* yaitu 2344. Angka tersebut jauh di bawah standar aplikasi ANSYS 2023 R2 *Student* yang memiliki batas jumlah *nodes* 152.000 dikarenakan model berdimensi 2D. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, proses *meshing* ini mencakup seluruh bagian pada model seperti dinding luar reaktor hingga area fluida yang berada di dalam reaktor sebagai tempat aliran gas.



Gambar 4.2 Hasil *Meshing* Model *Plasma Chamber*

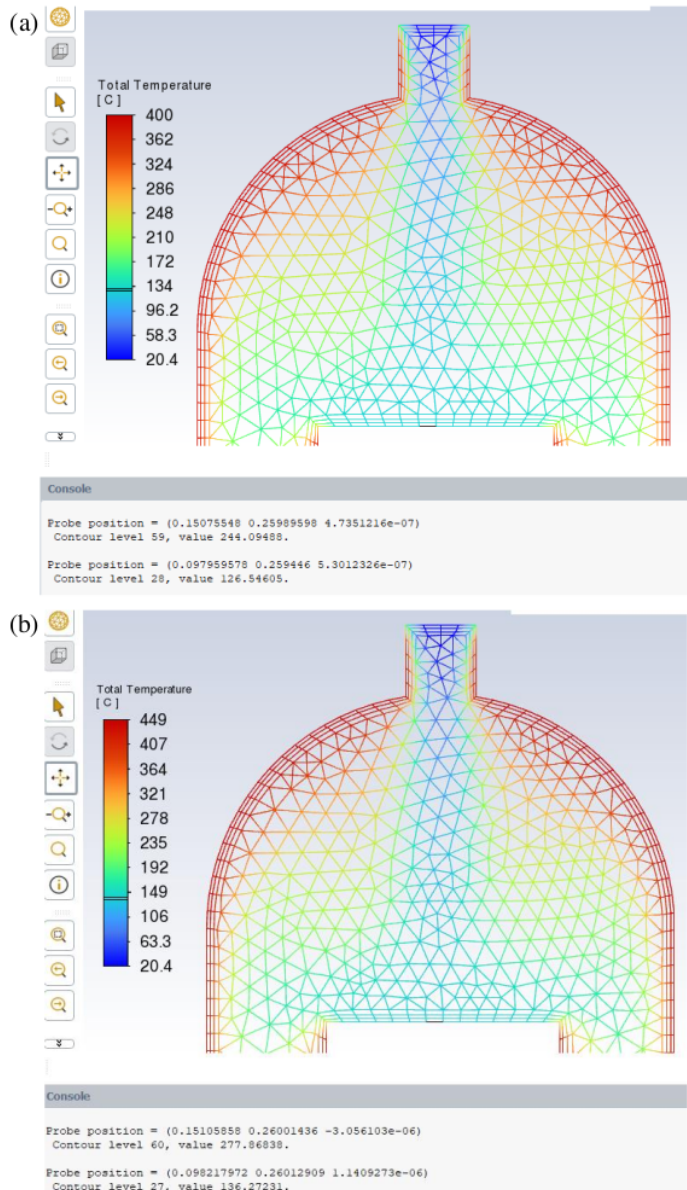
Model yang telah melalui proses *meshing* kemudian dimasukkan parameter simulasinya. Parameter ini bekerja di setiap bagian pada model yang telah ditentukan sebelumnya, seperti area fluida, *inlet*, *outlet*, dinding reaktor, dan

substrat. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada perangkat lunak ANSYS *Fluent* dengan metode *computational fluid dynamics* (CFD), didapatkan hasil data simulasi yang menunjukkan pergerakan fluida. Data ini berupa titik optimal gas prekursor hidrokarbon, laju alir gas, perubahan densitas, dan perpindahan panas temperatur di dalam reaktor.

4.2 Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Gas

Simulasi pada model geometri 2D dari *plasma chamber* ini akan diberi beberapa data parameter tetap serta variabel terikat. Simulasi bagian pertama ini menganalisis penggunaan dua nilai temperatur selama proses PECVD berlangsung, yaitu temperatur 400°C dan 450°C pada jenis gas hidrokarbon yang sama yaitu gas propana. Temperatur pada tabung reaktor diatur pada titik 20°C. Gravitasi berlaku dengan nilai standar 9,8 m/dtk². Masing-masing gas prekursor propana dan asetilena akan diinjeksikan ke dalam reaktor dengan kecepatan 5 m/dtk. Tekanan gas di dalam reaktor akan disimulasikan sebesar 1,2 mbar (120 Pa). Simulasi berlangsung dengan menggunakan *energy equation* sehingga memungkinkan untuk mengatur parameter yang berhubungan dengan energi atau perpindahan panas di dalam model. Simulasi pada kedua variabel temperatur melalui proses *hybrid initialization*, yaitu proses inisialisasi yang dilakukan secara komputasi dengan menghitung medan variabel seperti tekanan, temperatur, dan kecepatan dengan persamaan tertentu.

Proses *hybrid initialization* sering kali tidak dapat mencapai konvergen, yaitu ketika terjadinya perubahan berbagai variabel ketika *solver* menjalankan banyak iterasi solusi. Kondisi konvergen terjadi apabila simulasi berhenti sebelum mencapai maksimal iterasi. Hal ini dipengaruhi oleh proses *meshing*, sehingga pada simulasi ini dilakukan *adaptive meshing* sebelumnya agar konvergen dapat tercapai. Simulasi dijalankan dengan iterasi maksimal sebanyak 200 kali, artinya persamaan yang sama akan dilakukan pada nilai batas yang berbeda sebanyak maksimal 200 kali sehingga akan memberikan hasil berupa solusi penyelesaian yang lebih baik dari sebelumnya.



Gambar 4.3 Hasil Distribusi Gas Propana pada Variabel Temperatur Pemanasan Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C

Hasil simulasi pertama dengan temperatur pemanasan 400°C dan 450°C ditunjukkan pada Gambar 4.3. Berdasarkan ilustrasi tersebut, tampak terlihat bahwa

distribusi temperatur pada kedua variabel temperatur yang digunakan terlihat sama, namun berbeda jika melihat keterangan atas warna yang disajikan. Kedua model di atas memiliki temperatur minimum yang sama yaitu pada temperatur 20°C dikarenakan gas yang diinjeksikan ke dalam reaktor tidak dipanaskan terlebih dahulu, melainkan dipanaskan di dalam reaktor selama proses PECVD berlangsung. Terjadinya perubahan warna pada setiap titik di dalam reaktor disebabkan karena konduktivitas termal gas di setiap bagian reaktor bergantung pada gas yang terkonsentrasi. Gas yang tidak terkonsentrasi pada suatu area akan lebih mudah temperaturnya untuk naik sehingga perubahan warna pada setiap titik di bagian dalam reaktor berbeda-beda. Distribusi temperatur yang terjadi di dalam reaktor ditunjukkan pada persamaan (20) mengenai perpindahan panas pada kondisi waktu tunak (*steady-state*).

Gas yang mengalir di dalam reaktor akan mengalami kenaikan temperatur sehingga panas juga akan terdistribusi dari *inlet* menuju substrat seperti yang diilustrasikan pada gambar. Pada area di sekitar substrat, gas prekursor pada kedua variabel temperatur pemanasan gas mengalami kenaikan temperatur dari temperatur awal 20°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3a, dan 4.3b. Pada model pemanasan gas temperatur 400°C, temperatur gas pada area substrat berada pada rentang 126,55 – 244,09°C sedangkan pada simulasi temperatur 450°C substrat memiliki temperatur yang berada pada rentang 136,27 – 277,87°C. Perbedaan temperatur gas yang terdistribusi pada area substrat menunjukkan hasil bahwa temperatur pemanasan gas yang tinggi akan membuat gas terdistribusi memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan temperatur rendah.

4.3 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Alir Gas

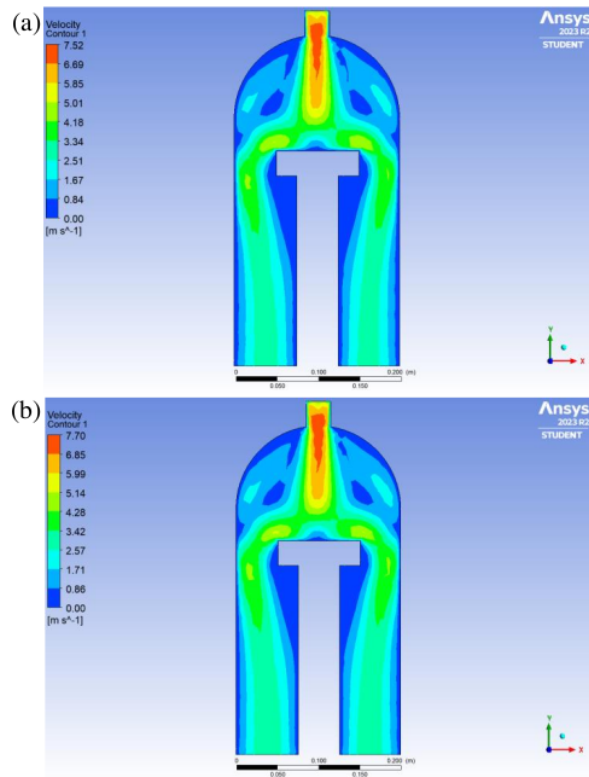
Perbedaan penggunaan temperatur di dalam reaktor ini tidak hanya mempengaruhi temperatur substrat, melainkan beberapa aspek lainnya. Gas yang diinjeksikan dengan kecepatan 5 m/dtk akan mengalami perubahan laju alir selama di dalam reaktor karena adanya perubahan temperatur gas prekursor. Gas prekursor mengalami kenaikan laju alir pada bagian sambungan *inlet* dengan reaktor karena luas area yang mengecil. Hal ini berlaku prinsip persamaan Bernoulli yang

merupakan konsep utama dalam dinamika fluida yang menghubungkan tekanan, kecepatan, dan ketinggian. Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa peningkatan kecepatan fluida terjadi secara bersamaan dengan penurunan tekanan statis atau energi potensial fluida. Prinsip Bernoulli dalam simulasi ini berjalan beriringan dengan persamaan kontinuitas yang dituliskan pada persamaan (25) dan (26) berikut.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho(v_1)^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho(v_2)^2 + \rho gh_2 \dots \dots \dots (25)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots \dots \dots (26)$$

di mana P adalah tekanan gas, ρ adalah densitas fluida, v adalah kecepatan alir gas, g adalah nilai percepatan gravitasi, h_1 adalah ketinggian pada titik pertama, h_2 adalah ketinggian pada titik kedua, A_1 adalah lebar atau diameter pipa pada titik pertama, dan A_2 adalah lebar atau diameter pipa pada titik kedua.

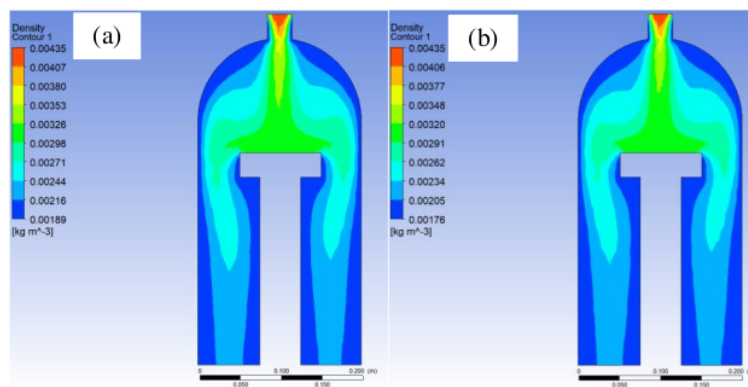


Gambar 4.4 Kontur Kecepatan Alir Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C

Kondisi kenaikan laju alir pada saluran masuk gas berlaku sesaat karena gas yang terdistribusi langsung menuju ruang reaktor yang memiliki area lebih luas. Hal ini terlihat di mana laju alir gas yang naik, mulai menurun secara perlahan. Titik kecepatan laju alir pada kedua model berbeda, hal ini disebabkan oleh gas prekursor yang dipanaskan dalam reaktor. Pada Gambar 4.4 menunjukkan temperatur 400°C memiliki kecepatan maksimal distribusi gas prekursor yang berada pada titik 7,52 m/dtk sedangkan pada temperatur 450°C titik maksimal kecepatan distribusi gas yaitu 7,70 m/dtk. Temperatur yang lebih tinggi akan menghasilkan laju alir gas yang lebih tinggi pula atau berbanding lurus. Hal ini sesuai dengan literatur yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 di mana peningkatan laju alir dan radius distribusi gas yang terjauh dapat tercapai pada temperatur gas lebih tinggi [29].

4.4 Pengaruh Temperatur terhadap Densitas Gas

Pengaruh temperatur dapat menyebabkan perubahan densitas. Pemanasan suatu zat di mana pada simulasi ini yaitu gas, umumnya menyebabkan molekul-molekulnya melaju lebih cepat dan menyebar sedikit lebih jauh, menempati volume yang lebih besar sehingga mengakibatkan penurunan densitas. Faktor perbedaan temperatur mengakibatkan densitas gas pada simulasi dengan temperatur 450°C memiliki penurunan densitas gas yang lebih signifikan dibandingkan dengan penggunaan temperatur 400°C.

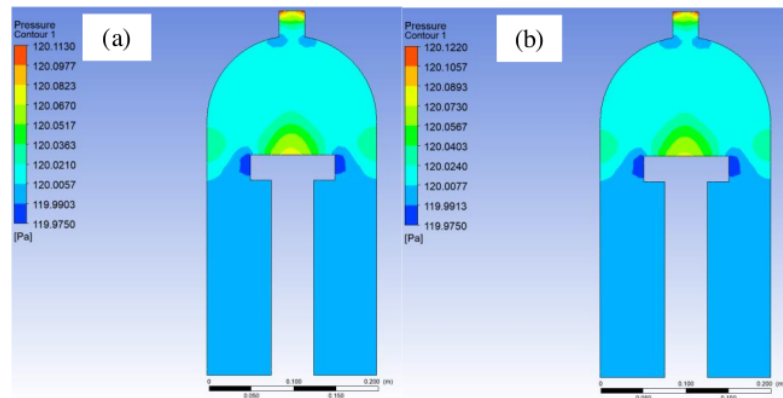


Gambar 4.5 Kontur Perubahan Densitas Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C

Gambar 4.5 menunjukkan densitas gas pada temperatur pemanasan gas 400°C saat mencapai area substrat berada pada rentang $3,0452 \times 10^{-3}$ hingga $3,1678 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ sedangkan pada model temperatur 450°C densitas gas saat mencapai substrat berada pada rentang $2,8467 \times 10^{-3}$ hingga $3,0793 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Nilai kedua densitas gas tersebut berbanding terbalik dengan temperatur sehingga sudah sesuai dengan data temperatur pada substrat, di mana temperatur substrat pada model kedua (136,27°C) lebih tinggi dibandingkan dengan model pertama (126,55°C).

4.5 Pengaruh Temperatur terhadap Tekanan Gas

Desain geometri beserta perbedaan temperatur menjadi bagian dari faktor yang mempengaruhi adanya perbedaan tekanan pada kedua model simulasi. Gambar 4.6 menunjukkan tekanan gas secara perlahan naik di area substrat, hal ini dikarenakan substrat berada di jalur yang akan dilalui gas. Tekanan yang diterima substrat pada model pertama dengan temperatur pemanasan gas 400°C berada pada kisaran 119,9913 Pa hingga 120,0728 Pa. Pada hasil yang lain dengan temperatur 450°C, substrat menerima tekanan gas yang terdistribusi sebesar 119,9920 Pa hingga 120,0769 Pa. Tidak terjadi perubahan tekanan yang signifikan di antara kedua temperatur.



Gambar 4.6 Kontur Perubahan Tekanan Gas Propana pada Temperatur Gas (a)400°C, dan (b)450°C

Kadaan gas di dalam reaktor yang bekerja berlaku hukum Redlich-Kwong

di mana gas berada pada kondisi sebenarnya (*real gas*) sehingga memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan persamaan gas dalam kondisi ideal. Kondisi *real gas* ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan yang mengatur aliran fluida dan perpindahan panas. Persamaan Redlich-Kwong merupakan persamaan aljabar empiris yang menghubungkan temperatur, tekanan, dan volume gas. Persamaan ini umumnya lebih akurat daripada persamaan Van der Waals dan persamaan gas ideal pada temperatur di atas temperatur kritis masing-masing gas. Rumus dari Redlich-Kwong ini dituliskan pada persamaan (27) berikut

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{T} \cdot V \cdot (V+b)} \dots\dots\dots(27)$$

di mana P adalah tekanan gas, R adalah konstanta tetapan gas, T adalah temperatur gas, V adalah volume molar gas, nilai a adalah konstanta daya tarik molekul, dan nilai b adalah konstanta untuk volume gas yang keduanya diambil berdasarkan titik kritis gas. Ketika tekanan sistem menjadi sangat besar, yaitu $P \rightarrow 0$, volume molar V akan menurun dari volume kritisnya tanpa dipengaruhi perubahan temperatur sistem sehingga persamaan (27) memenuhi kondisi

$$b = 0,26 V_c \dots\dots\dots(28)$$

dengan memasukkan persamaan (28) pada persamaan (27) kemudian dari penyelesaian didapatkan nilai persamaan baru untuk a dan b yaitu

$$a = 0,42747 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \dots\dots\dots(29)$$

$$b = 0,08664 \frac{RT_c}{P_c} \dots\dots\dots(30)$$

dengan memasukkan persamaan (30) pada persamaan (28), maka akan didapatkan

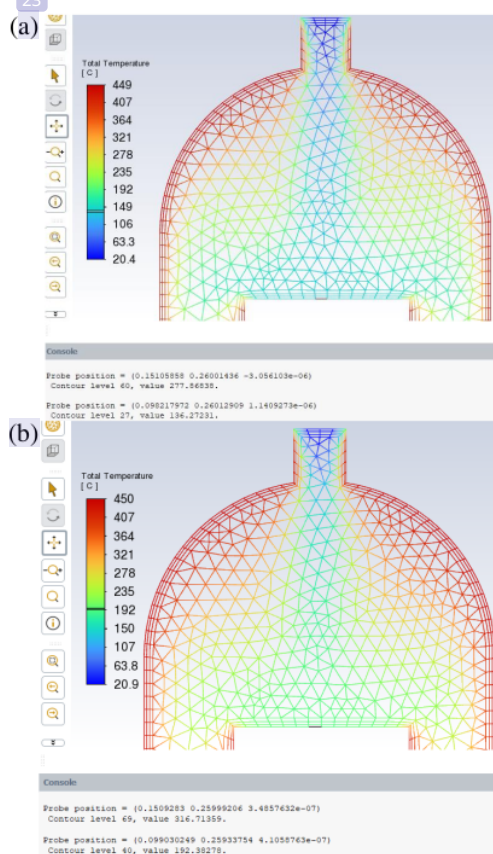
$$P_c V_c = 0,333 RT_c \dots\dots\dots(31)$$

4.6 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Distribusi Temperatur

Penggunaan gas hidrokarbon berbeda sebagai gas prekursor pada model simulasi juga dianalisis pada penelitian ini, di mana hasil menunjukkan perbedaan pada variabel yang diamati. Simulasi pengaruh jenis gas hidrokarbon dilakukan dengan penggunaan gas propana (C₃H₈) dan asetilena (C₂H₂), Kedua jenis pengujian simulasi dijalankan pada temperatur 450°C dengan kecepatan alir gas 5

m/dtk dan tekanan 1,2 mbar (120 Pa). Parameter tetap dan langkah simulasi bekerja serupa dengan simulasi sebelumnya.

Gas hidrokarbon sebagai gas prekursor, pada ANSYS *Fluent* ini berperan sebagai fluida berbentuk gas yang mengalir di dalam reaktor. Penggunaan gas hidrokarbon ini diatur terlebih dahulu pada bagian *setup* pada tabel menu *fluid flow (fluent)*. Dipilih fluida gas yang akan digunakan yaitu masing-masing adalah gas propana dan gas asetilena. Densitas masing-masing gas tidak diatur dalam keadaan gas ideal, melainkan keadaan sebenarnya (*real gas*). Penggunaan gas ideal tidak cocok untuk simulasi dikarenakan simulasi berjalan dalam kondisi yang terlalu ideal. Pengaturan gas dalam keadaan *real gas* dipilih karena mengikuti hukum persamaan Redlich-Kwong, serupa seperti simulasi sebelumnya.



Gambar 4.7 Hasil Distribusi Temperatur dengan Parameter Gas Prekursor
(a) Propana 450°C, dan (b) Asetilena 450°C

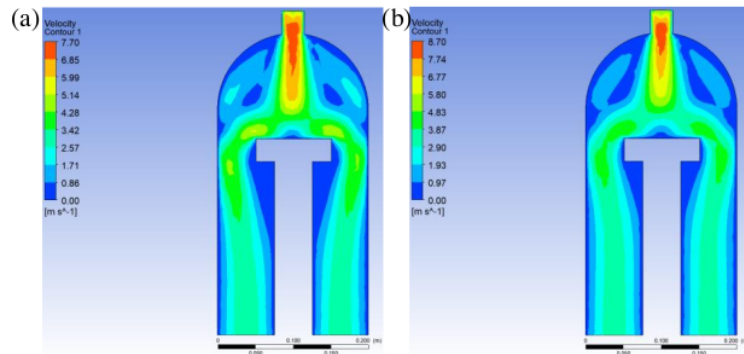
Pada peta distribusi temperatur yang ditunjukkan Gambar 4.7 dapat dilihat temperatur pada area substrat berada pada titik yang berbeda-beda. Penggunaan gas hidrokarbon propana dan gas asetilena pada temperatur pemanasan gas 450°C menunjukkan temperatur substrat yang berbeda. Temperatur substrat pada simulasi gas propana berada pada rentang 136,27 – 277,87°C sedangkan pada simulasi gas asetilena, substrat mengalami kenaikan temperatur hingga pada rentang 192,38 – 316,71°C. Perbedaan ini menunjukkan bahwa penggunaan gas asetilena yang semula memiliki temperatur 20°C, menghasilkan kenaikan temperatur gas yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan gas propana pada temperatur awal yang sama.

Pada simulasi temperatur 450°C, temperatur substrat simulasi gas asetilena lebih tinggi 38,84–56,11 derajat. Perbedaan temperatur akhir pada substrat pada pemanasan gas dengan temperatur yang sama ini dipengaruhi oleh sifat fisik dari masing-masing gas hidrokarbon yang berbeda. Faktor utama yang mengakibatkan perbedaan ini yaitu nilai kapasitas panas spesifik dari gas hidrokarbon yang digunakan. Kapasitas panas merupakan nilai yang menggambarkan berapa banyak energi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur sebesar 1 unit untuk satu unit massa material. Bahan dengan panas spesifik yang tinggi dapat menyerap banyak energi panas sebelum terjadi perubahan temperatur. Energi panas akan lebih sedikit diperlukan untuk meningkatkan temperatur material yang memiliki nilai kapasitas panas spesifik yang rendah. Oleh karena itu, pada simulasi ini gas asetilena yang memiliki kapasitas panas lebih rendah dari gas propana mengalami kenaikan temperatur gas yang lebih tinggi karena lebih sedikit energi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur pada perlakuan yang sama.

4.7 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Laju Alir Gas

Pada ilustrasi laju alir gas hidrokarbon yang ditunjukkan Gambar 4.8 terjadi kenaikan laju alir pada bagian sambungan saluran masuk gas menuju reaktor yang sama seperti simulasi pengaruh temperatur sebelumnya. Prinsip Bernoulli juga bekerja pada simulasi gas asetilena yang ditunjukkan oleh kontur berwarna merah. Penggunaan jenis gas hidrokarbon yang berbeda juga menunjukkan perbedaan

temperatur yang cukup tinggi dan mempengaruhi laju alir gas pada tiap model simulasi. Pada keterangan warna yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, laju alir gas asetilena lebih cepat dibandingkan dengan laju alir gas propana.



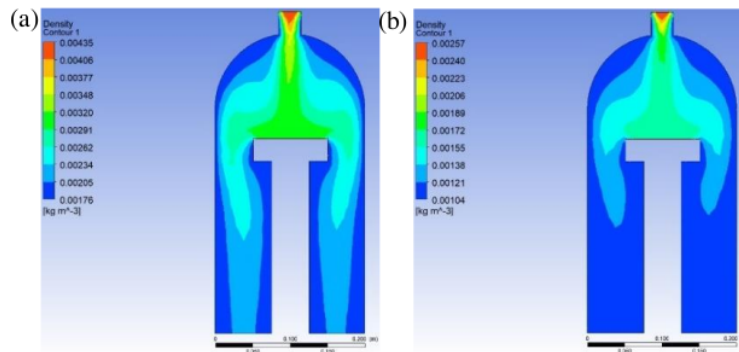
Gambar 4.8 Kontur Laju Alir Gas dengan Parameter Gas Prekursor (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

Gas propana dengan temperatur pemanasan gas 450°C tersebut memiliki laju alir maksimal sebesar 7,70 m/dtk sedangkan pada simulasi gas asetilena, laju alir maksimal gas asetilena di dalam reaktor mencapai 8,70 m/dtk. Tingginya laju alir gas di dalam reaktor ini akan membuat gas berputar dengan cepat di dalam reaktor yang sebanding dengan tingginya temperatur untuk mempercepat laju reaksi gas terhadap substrat. Laju alir gas pada kedua model simulasi tersebut mengalami penurunan saat mencapai substrat. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh gas yang sudah bereaksi saat mencapai substrat sehingga laju alirnya menuju nilai nol.

4.8 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Perubahan Densitas Gas

Penggunaan jenis gas hidrokarbon yang berbeda dapat mempengaruhi nilai densitas gas di dalam reaktor sebagaimana yang dijelaskan pada subbab sebelumnya, di mana densitas gas prekursor mengalami penurunan seiring dengan tingginya temperatur yang beroperasi di dalam reaktor. Umumnya perbandingan nilai densitas ini tidak dapat menjadi perbandingan secara langsung karena perbedaan jenis gas prekursor hidrokarbon yang digunakan sehingga densitas awal tiap gas berbeda-beda. Dapat dilihat secara sekilas pada perubahan kontur warna

dari hasil simulasi yang diilustrasikan pada Gambar 4.9 bahwa densitas gas asetilena cenderung lebih rendah. Densitas gas propana mencapai kisaran $2,8467 \times 10^{-3}$ hingga $3,0793 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ sepanjang area substrat sedangkan densitas gas asetilena sepanjang area substrat berada pada kisaran $1,2997 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ hingga $1,5896 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.



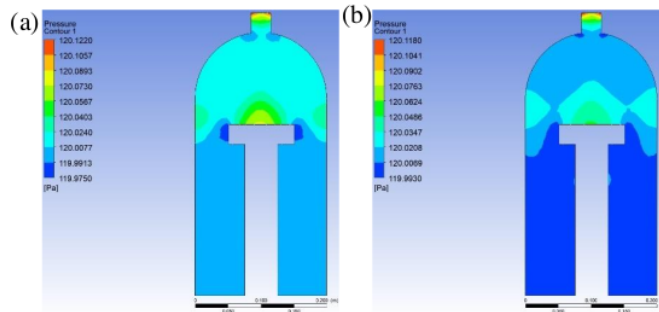
Gambar 4.9 Kontur Densitas Gas dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

Temperatur yang lebih tinggi tentunya akan memiliki densitas yang jauh lebih rendah sebagaimana yang ditunjukkan pada simulasi perbandingan temperatur pada gas propana. Perbandingan nilai densitas antar kedua gas prekursor juga dapat dilihat berdasarkan temperatur pada substrat. Substrat pada simulasi dengan penggunaan gas asetilena memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan gas propana, sehingga densitas gas pada simulasi dengan gas asetilena terlampau cukup rendah apabila dibandingkan dengan penurunan densitas gas propana.

4.9 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Perubahan Tekanan Gas

Penggunaan gas hidrokarbon baik gas propana maupun asetilena di dalam reaktor yang semula memiliki tekanan 1,2 mbar atau 120 Pa mengalami kenaikan maupun penurunan seperti pada Gambar 4.10. Tekanan gas yang menurun mengalami kenaikan kembali di sekitar area substrat. Hal ini disebabkan kondisi batas yang ditetapkan pada simulasi. Kondisi batas tekanan diterapkan pada saluran

masuk dan keluar gas sehingga hal ini dapat menyebabkan peningkatan tekanan di dekat area substrat. Selain itu, kecepatan alir gas berubah karena variasi tekanan lokal yang dapat menyebabkan perubahan aliran massa yang menyebabkan perubahan tekanan di dekat substrat.



Gambar 4.10 Kontur Distribusi Tekanan Gas dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

Pada Gambar 4.10 ditunjukkan bahwa distribusi tekanan gas asetilena pada area substrat memiliki tekanan gas yang lebih rendah dibandingkan distribusi tekanan gas propana pada area substrat. Pada simulasi dengan gas propana, tekanan di area substrat sebesar 119,99201 Pa hingga 120,0769 Pa sedangkan tekanan pada simulasi gas asetilena sebesar 120,0059 Pa hingga 120,0496 Pa. Nilai tekanan awal gas asetilena pada substrat sedikit lebih tinggi dibandingkan gas propana, namun berada pada titik yang lebih rendah pada tekanan di area tengah substrat. Perubahan tekanan ini dipengaruhi beberapa faktor, di antaranya temperatur dan densitas.

Temperatur merupakan salah satu faktor perubahan tekanan. Namun, densitas gas menjadi faktor utama yang lebih mempengaruhi tekanan gas. Gas asetilena memiliki nilai densitas yang lebih rendah dibandingkan gas propana yang berarti memiliki lebih sedikit molekul dalam volume tertentu. Ketika temperatur meningkat, molekul gas mendapatkan energi kinetik dan bergerak lebih cepat. Akibatnya, molekul gas menyebar dan densitas gas menurun. Karena tekanan udara sebanding dengan kerapatan udara, penurunan densitas mengakibatkan penurunan tekanan udara. Oleh sebab itu, meskipun gas asetilena memiliki temperatur dan kecepatan alir yang lebih tinggi, densitasnya yang jauh lebih rendah menyebabkan

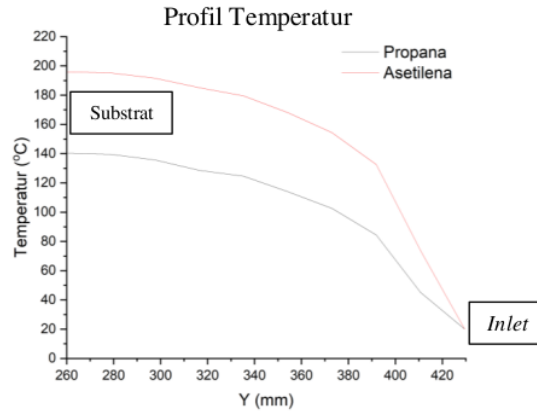
tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan tekanan pada gas propana. Hal ini dikarenakan jumlah molekul gas atau densitas memiliki dampak yang lebih langsung terhadap jumlah benturan dengan dinding reaktor yang menciptakan tekanan, sehingga penurunan densitas memiliki efek yang lebih besar pada tekanan dibandingkan dengan peningkatan temperatur.

4.10 Profil Temperatur Hubungan Jenis Gas Hidrokarbon

Berdasarkan dari hasil simulasi yang telah dijabarkan, area inti terjadinya perubahan temperatur, laju alir, dan tekanan berada di daerah sekitar substrat. Sedangkan itu, pada area saluran masuk dan keluar gas prekursor, parameter tersebut tidak mengalami perubahan yang cukup signifikan. Hal ini diharapkan bahwa reaksi pembentukan lapisan *diamond-like carbon* terjadi tepat pada area substrat. Perubahan temperatur merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi laju reaksi, di mana temperatur yang tinggi akan mempercepat proses terjadinya reaksi. Keempat simulasi menunjukkan bahwa temperatur substrat yang semula berada pada temperatur 20°C mengalami kenaikan temperatur saat gas prekursor yang dipanaskan hingga temperatur 400°C dan 450°C mencapai substrat.

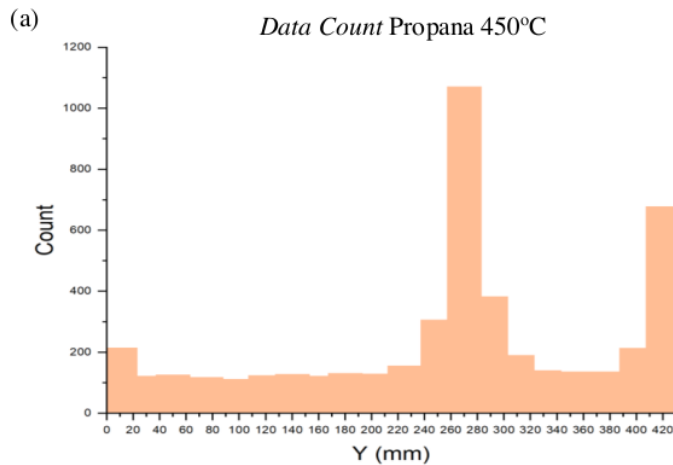
Perubahan temperatur dapat diamati dalam bentuk grafik profil temperatur. Pada profil temperatur, masing-masing gas mengalami kenaikan yang cukup tinggi. Perbedaan antar temperatur yang berbeda pada gas prekursor yang sama tidak terlalu besar. Sedangkan penggunaan gas prekursor yang berbeda menunjukkan perbedaan perubahan temperatur yang cukup berbeda jauh. Hal ini disebabkan adanya perbedaan densitas dan kapasitas panas pada masing-masing gas prekursor. Lebih sedikit energi yang dibutuhkan gas asetilena untuk menaikkan temperaturnya dibandingkan gas propana. Kemudahan ini yang diharapkan mampu mempercepat distribusi gas untuk pelapisan pada permukaan substrat, karena berhubungan dengan laju reaksi yang semakin cepat. Grafik profil temperatur dapat diamati pada Gambar 4.11 yang menunjukkan perubahan temperatur gas dari *inlet* menuju substrat. Pada grafik tersebut ditunjukkan profil temperatur gas asetilena yang lebih tinggi dibandingkan gas propana. Hubungan antara tekanan gas yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dengan profil temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 4.11

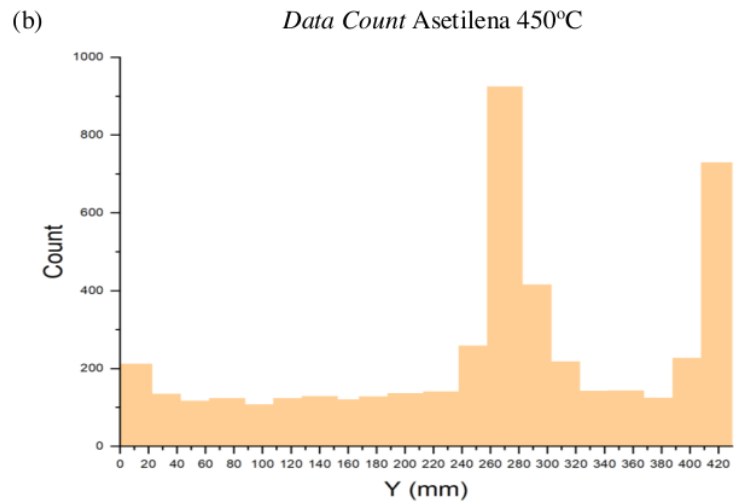
menunjukkan nilai yang berbanding terbalik, sehingga sesuai dengan persamaan gas Redlich-Kwong pada persamaan (31) tentang karakteristik gas sebenarnya.



Gambar 4.11 Profil Temperatur Sepanjang *Inlet* ke Substrat

Laju reaksi yang cepat dapat membuat reaksi yang terjadi pada suatu titik menjadi semakin banyak. Akan tetapi, temperatur yang terlalu tinggi hingga melebihi temperatur optimum juga dapat menjadi faktor yang membuat titik optimal untuk terjadinya reaksi kimia pada proses PECVD menjadi menurun. Hal ini dapat dibuktikan dengan mengamati nilai optimal sepanjang reaktor yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 di mana nilai y pada sumbu x menunjukkan ketinggian reaktor.





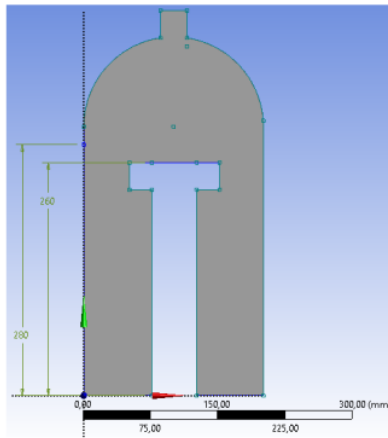
Gambar 4.12 *Data Count* Simulasi dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

Kedua grafik batang menunjukkan posisi optimal di mana reaksi terjadi. *Data count* pada *post-processing* ANSYS mengkalkulasikan banyaknya sel pada suatu area. Istilah sel pada ANSYS merujuk pada volume kontrol yang menjadi bagian dari *domain*. *Domain* geometri ini dipecah menjadi banyak elemen oleh proses *meshing* yang digunakan *solver* CFD untuk membuat volume kontrol, sehingga banyaknya volume kontrol pada suatu area dapat mewakili tempat terjadinya reaksi kimia sering terjadi. Jenis histogram ini dapat membantu memahami distribusi data di seluruh ketinggian reaktor. Histogram ini dapat menunjukkan di mana data sel terkonsentrasi yang ditunjukkan dengan jumlah yang tinggi dan di mana data tersebar yang ditunjukkan dengan jumlah yang rendah.

Grafik *data count* tersebut diatur dengan mengambil data berdasarkan *streamline* yang bergerak di sepanjang reaktor. Data sebanyak 100 poin *streamline* diambil sebagai sampel untuk grafik. Keempat grafik menunjukkan titik optimal terjadinya reaksi berada pada area substrat, sebagaimana yang diharapkan terjadi. Daerah optimal tersebut berada pada ketinggian 260 mm – 280 mm, di mana ketinggian tersebut merupakan daerah gas terkonsentrasi dan letak substrat berada seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.13. Masing-masing grafik memiliki nilai

optimal yang berbeda. Nilai optimal ini menunjukkan banyaknya *nodes* atau *count* pada suatu area di dalam reaktor.

Pada simulasi dengan gas propana nilai optimal *nodes* mencapai angka 1071 sedangkan pada simulasi gas asetilena nilai optimal *nodes* mencapai angka 925. Nilai optimal *nodes* pada simulasi gas propana dengan temperatur 450°C lebih tinggi dibandingkan simulasi dengan gas asetilena. Berdasarkan temperatur, temperatur yang lebih tinggi dapat meningkatkan energi kinetik molekul gas yang menyebabkan lebih banyak tumbukan dan interaksi reaksi kimia sehingga semakin sedikit molekul gas yang terkonsentrasi di area substrat. Berdasarkan densitas, gas asetilena secara signifikan lebih rendah densitas gasnya dibandingkan densitas gas propana sehingga terdapat lebih sedikit molekul yang terkonsentrasi yang dapat menghasilkan jumlah data yang lebih rendah. Hasil tersebut dapat diperkuat dengan sebuah studi yang menyatakan bahwa peningkatan laju reaksi berbanding lurus dengan peningkatan kandungan senyawa hidrokarbon [42]. Hal ini dapat dihubungkan dengan gas propana yang memiliki rumus C_3H_8 sehingga jumlah atom karbon dan hidrogennya lebih banyak dibandingkan dengan gas asetilena dengan rumus C_2H_2 .



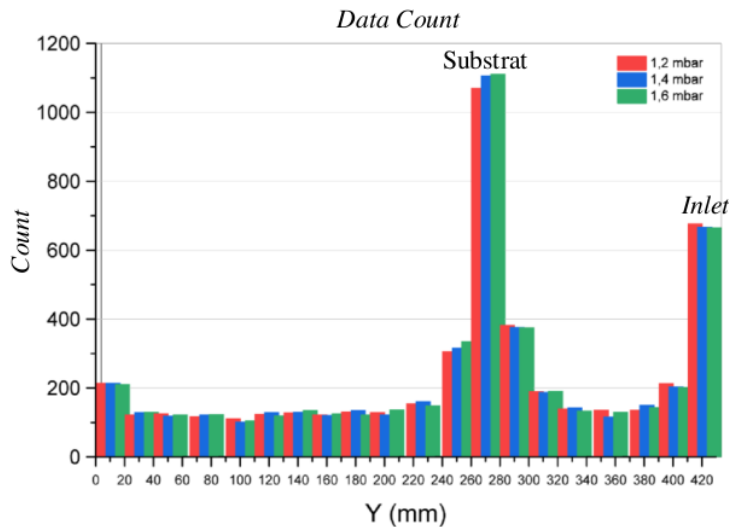
Gambar 4.13 Koordinat Nilai Optimal pada Reaktor

4.11 Perbandingan Variabel Utama pada Tekanan Berbeda

Pada bagian ini dilakukan simulasi perbedaan tekanan untuk melihat *data*

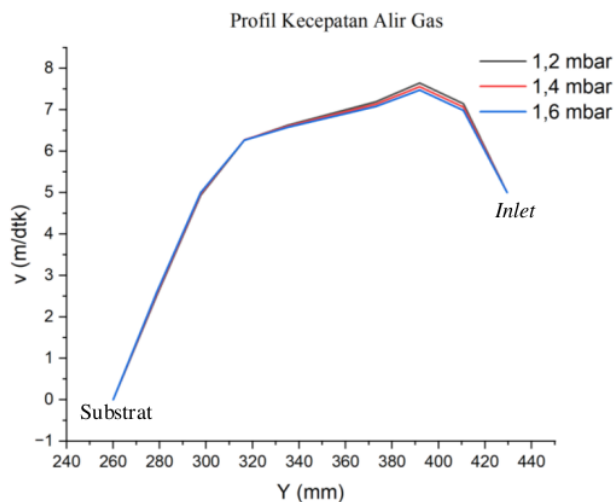
count. Pemilihan *data count* tertinggi sebagai sampel ini dengan pertimbangan bahwa banyaknya sel yang terkalkulasi pada satu model simulasi mewakili hasil simulasi yang terbaik pada variabel utama yaitu temperatur dan jenis gas hidrokarbon pada temperatur 1,2 mbar (120 Pa). Berdasarkan hasil simulasi sebelumnya, didapatkan bahwa *data count* tertinggi dicapai dengan menggunakan gas prekursor berupa gas propana dengan temperatur operasi 450°C. Perbandingan kali ini menggunakan parameter yang sama dengan gas propana sebagai prekursor dengan temperatur operasi 450°C yang divariasikan pada tekanan 1,2 mbar (120 Pa), 1,4 mbar (140 Pa), dan 1,6 mbar (160 Pa).

Simulasi ini dijalankan dengan mengatur tekanan gas yang masuk melalui saluran masuk gas atau *inlet* pada kolom *boundary condition*. Selanjutnya pada kolom kondisi operasi juga diatur pada tekanan yang telah ditentukan. Ketiga simulasi pada tekanan berbeda ini kemudian dijalankan dengan iterasi maksimal 200 kali. Untuk melihat parameter yang terbaik, maka ketiga model tersebut dibandingkan berdasarkan *data count* sepanjang reaktor. Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 mengungkapkan bahwa *data count* pada 1,2 mbar, 1,4 mbar, dan 1,6 mbar secara berturut-turut yaitu sebanyak 1071, 1107, dan 1112.



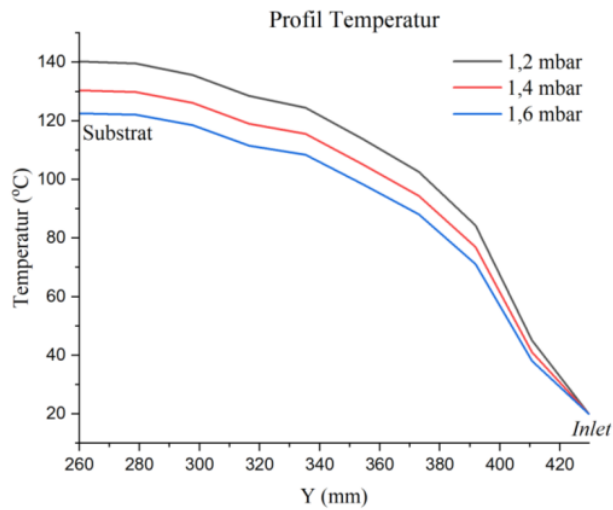
Gambar 4.14 Pengaruh Perbedaan Tekanan terhadap *Data Count*

Pada grafik yang ditampilkan, tampak bahwa pada *inlet* menjadi titik yang memiliki data sel yang terkonsentrasi tertinggi kedua setelah area substrat. Batas kondisi saluran masuk gas berupa kecepatan aliran masuk gas pada 5 m/dtk dan temperatur 20°C menjadi sebab gas terkonsentrasi di bagian *inlet*. Sedangkan data pada area substrat yang menjadi grafik tertinggi dikarenakan gas yang sudah diinjeksikan mengalami kenaikan temperatur oleh gas yang dipanaskan pada temperatur 450°C sehingga kecepatan aliran gas juga mengalami kenaikan untuk mendistribusikan gas menuju substrat. Pada perbandingan tekanan gas hidrokarbon, terlihat bahwa tekanan 1,6 mbar memiliki nilai terendah pada *inlet* namun memiliki nilai yang tinggi pada daerah substrat. Hasil tersebut dikarenakan gas yang mengalir melalui ruang sempit dengan tekanan tinggi akan mengalami tumbukan antar molekul lebih sering dengan satu sama lain dan dinding reaktor. Tumbukan ini menghasilkan perubahan arah dan kecepatan molekul gas. Hal ini berlaku prinsip Bernoulli dan persamaan kontinuitas seperti pada persamaan (25) dan persamaan (26) mengenai kecepatan fluida yang tinggi pada tekanan fluida yang rendah. Persamaan tersebut dapat diperkuat dengan profil kecepatan alir gas antara tiga tekanan berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut di mana pada tekanan gas yang lebih tinggi, kecepatan alir gas berada pada posisi yang lebih rendah.



Gambar 4.15 Profil Kecepatan Alir Gas Perbandingan Tekanan pada Parameter Gas Propana 450°C

Tekanan gas yang disimulasikan tersebut juga berpengaruh terhadap temperatur sepanjang *inlet* menuju substrat. Hal ini dapat diperkuat dengan hubungan nilai temperatur dan tekanan gas seperti yang dituliskan pada persamaan (31) di mana kenaikan tekanan gas dapat mengurangi temperatur jika diikuti dengan penurunan kecepatan alir gas. Pada Gambar 4.16 menunjukkan tekanan gas yang lebih rendah membuat temperatur mudah mengalami kenaikan di permukaan substrat dibandingkan gas dengan tekanan yang lebih tinggi. Temperatur menjadi salah satu faktor peningkatan terjadinya reaksi pada daerah substrat, sekaligus menjadi faktor penurunan reaksi apabila melebihi temperatur optimum.



Gambar 4.16 Profil Temperatur Perbandingan Tekanan pada Parameter Gas Propana 450°C

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dengan mengacu kepada hasil data serta pembahasan, dapat diperoleh kesimpulan mengenai pengaruh temperatur dan jenis gas hidrokarbon dengan simulasi ANSYS *Fluent* yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Perbedaan penggunaan temperatur pada kondisi operasional di dalam reaktor mempengaruhi beberapa faktor yaitu adanya perubahan densitas, tekanan, dan laju alir. Laju alir maksimal pada temperatur 400°C dan 450°C berturut-turut mencapai 7,52 m/dtk dan 7,70 m/dtk. Tekanan gas yang umumnya naik saat temperatur naik, mengalami penurunan karena lebih dipengaruhi oleh penurunan densitas. *Data count* pada pengaruh temperatur menunjukkan bahwa nilai tertinggi didapatkan pada temperatur operasional 400°C dengan sel yang terkonsentrasi sebanyak 1071. Sedangkan, jumlah sel *count* pada temperatur operasional 400°C mencapai 1070.
2. Pada simulasi perbandingan gas hidrokarbon, temperatur substrat pada simulasi gas asetilena berada pada rentang tertinggi yaitu 192,38 – 316,71°C diikuti dengan kecepatan maksimal aliran gas selama di dalam reaktor yang mencapai 8,7 m/dtk. Namun, terjadi penurunan densitas yang lebih rendah dan diikuti dengan penurunan tekanan gas. *Data count* tertinggi pada gas propana 450°C yaitu 1071 sedangkan pada penggunaan gas asetilena dengan temperatur 450°C, *count* tertinggi hanya mencapai angka 925.
3. Simulasi yang telah dibuat dengan perangkat lunak ANSYS *Fluent* versi 2023 R2 ini telah memperhatikan beberapa aspek untuk menjalankan simulasi CFD. Model simulasi ini memperhatikan kondisi batas geometri yang dibuat, seperti saluran masuk gas atau *inlet*, dinding reaktor, substrat, daerah fluida, dan saluran keluar gas atau *outlet*. Selain

itu, simulasi menjalankan kondisi di mana gravitasi dan persamaan energi bekerja. Berdasarkan simulasi ini, didapatkan ilustrasi mengenai perubahan densitas, laju alir, temperatur, hingga tekanan gas di dalam reaktor, serta posisi optimal terjadinya reaksi yang berada pada ketinggian 260 mm-280 mm di mana substrat terletak pada ketinggian 260 mm.

5.2 ³ Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya dari hasil penelitian melalui simulasi ini yaitu untuk melakukan hasil simulasi dengan variabel yang lebih beragam seperti penggunaan temperatur yang berbeda jauh dan penggunaan kondisi waktu transien agar dapat divariasikan waktu selama proses di dalam *plasma chamber* berlangsung sehingga mendapatkan data yang berbeda dan lebih terlihat pengaruhnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Masami, N. Setsuo, S. Tsutomu, & C. Junho, "Improvement of corrosion protection property of Mg-alloy by DLC and Si-DLC coatings with PBII technique and multi-target DC-RF magnetron sputtering," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, vol. 267, no. 8–9, pp. 1675–1679, 2009, doi: 10.1016/j.nimb.2009.01.101.
- [2] P. Jin, D. Xiao, X. Tian, C. Gong, and X. Wang, "Synergistically tailoring the distribution of precursor gas for uniform internal DLC coating of long tube," *Surface and Coatings Technology*, vol. 466, p. 129661, 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129661.
- [3] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281, 2002, doi: 10.1016/s0927 796x(02)00005-0.
- [4] L. Sun *et al.*, "Chemical vapour deposition," *Nature Reviews Methods Primers*, vol. 1, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s43586-020-00005-y.
- [5] P. A. Dearnley and T. Liskiewicz, "Vapor Deposition Coating Technologies (CVD, PACVD, PVD, and Hybrid PVD-CVD) and Their Tribological Application," *Encyclopedia of Tribology*, pp. 3948–3960, 2013, doi: 10.1007/978-0-387-92897-5705.
- [6] Jack and Jack, "Understanding PECVD: Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition - Oil & Gas Process Engineering," *Oil & Gas Process Engineering*, Oct. 24, 2023. <https://www.oilngasprocess.com/chemical-process/plasma-assisted-chemical-vapor-deposition.html> (Diakses 18 Mei, 2024).
- [7] Y. Hamedani, P. Macha, T. J. Bunning, R. R. Naik, and M. C. Vasudev, "Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition: Where we are and the Outlook for the Future," *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*, Aug. 2016, doi: 10.5772/64654.

- [8] A. Szpicer, W. Bińkowska, I. Wojtasik-Kalinowska, S. M. Salih, and A. Póltorak, "Application of computational fluid dynamics simulations in food industry," *European Food Research and Technology*, vol. 249, no. 6, pp. 1411–1430, Mar. 2023, doi: 10.1007/s00217-023-04231-y.
- [9] L. An, X. Lei, X. Qi, M. Fang, and Y. Liu, "Heat and mass transfer characteristics of three-dimensional bell-shaped polysilicon chemical vapor deposition reactor," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, no. 1, pp. 323–335, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09465-6.
- [10] I. Hinkov *et al.*, "Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes," *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, vol. 04, no. 04, pp. 196–209, 2014, doi: 10.4236/jseamat.2014.44023.
- [11] A. Grill, "Diamond-like carbon: state of the art," *Diamond and Related Materials*, vol. 8, no. 2–5, pp. 428–434, Mar. 1999, doi: 10.1016/s0925-9635(98)00262-3.
- [12] Libretexts, "5.2D: sp³ Hybridization," *Chemistry LibreTexts*, May 03, 2023. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Map%3A_Inorganic_Chemistry_\(Housecroft\)/05%3A_Bonding_in_Polyatomic_Molecules/5.02%3A_Valence_Bond_Theory_-_Hybridization_of_Atomic_Orbitals/5.2D%3A_sp3_Hybridization](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Map%3A_Inorganic_Chemistry_(Housecroft)/05%3A_Bonding_in_Polyatomic_Molecules/5.02%3A_Valence_Bond_Theory_-_Hybridization_of_Atomic_Orbitals/5.2D%3A_sp3_Hybridization) (Diakses 20 Mei, 2024).
- [13] B.-G. Choi, "Effect of the additive gas on the bonding structure and mechanical properties of the DLC films deposited by RF-PECVD," *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 145–152, Aug. 2015, doi: 10.6111/jkcgct.2015.25.4.145.
- [14] F. Olaitan Kolawole, S. Kolade Kolawole, L. Bernardo Varela, A. Felix Owa, M. Antonio Ramirez, and A. Paulo Tschiptschin, "Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings for Automobile Applications," *Engineering Applications of Diamond*, Aug. 2021, doi: 10.5772/intechopen.95063.
- [15] N. Ohtake *et al.*, "Properties and Classification of Diamond-Like Carbon Films," *Materials*, vol. 14, no. 2, p. 315, Jan. 2021, doi: 10.3390/ma14020315.

- [16] D. K. Rajak, A. Kumar, A. Behera, and P. L. Menezes, "Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classification, Properties, and Applications," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 4445, May 2021, doi: 10.3390/app11104445.
- [17] A. Erdemir and C. Donnet, "Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, no. 18, pp. R311–R327, Sep. 2006, doi: 10.1088/0022-3727/39/18/r01.
- [18] Y. Li *et al.*, "Large Single-Crystal Cu Foils with High-Index Facets by Strain-Engineered Anomalous Grain Growth," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 29, Jun. 2020, doi: 10.1002/adma.202002034.
- [19] L. Tang *et al.*, "Vertical Chemical Vapor Deposition Growth of Highly Uniform 2D Transition Metal Dichalcogenides," *ACS Nano*, vol. 14, no. 4, pp. 4646–4653, Apr. 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c00296.
- [20] B. Deng *et al.*, "Scalable and ultrafast epitaxial growth of single-crystal graphene wafers for electrically tunable liquid-crystal microlens arrays," *Science Bulletin*, vol. 64, no. 10, pp. 659–668, May 2019, doi: 10.1016/j.scib.2019.04.030.
- [21] Y. Xu and X.-T. Yan, "Chemical Vapour Deposition," *Engineering Materials and Processes*, 2010, doi: 10.1007/978-1-84882-894-0.
- [22] J.-H. Park *et al.*, "Large-Area Monolayer Hexagonal Boron Nitride on Pt Foil," *ACS Nano*, vol. 8, no. 8, pp. 8520–8528, Aug. 2014, doi: 10.1021/nn503140y.
- [23] O. A. Stadnichenko, L. F. Nurislamova, N. S. Masyuk, V. I. N. Snytnikov, and V. N. Snytnikov, "Radical mechanism for the gas-phase thermal decomposition of propane," *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, vol. 123, no. 2, pp. 607–624, Oct. 2017, doi: 10.1007/s11144-017-1299-3.
- [24] B. Yan, P. Xu, X. Li, C. Y. Guo, Y. Jin, and Y. Cheng, "Experimental Study of Liquid Hydrocarbons Pyrolysis to Acetylene in H₂/Ar Plasma," *Plasma*

Chemistry and Plasma Processing, vol. 32, no. 6, pp. 1203–1214, Jul. 2012, doi: 10.1007/s11090-012-9400-1.

- [25] D. Lundin, J. Jensen, and H. Pedersen, “Influence of pulse power amplitude on plasma properties and film deposition in high power pulsed plasma enhanced chemical vapor deposition,” *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 32, no. 3, Mar. 2014, doi: 10.1116/1.4867442.
- [26] R. Curley, T. McCormack, and M. Phipps, “Low-pressure CVD and Plasma-Enhanced CVD.,” <https://www.semanticscholar.org/>. 2011. Diakses: 20 Januari, 2024. [Online]. Tersedia: <https://www.semanticscholar.org/paper/Low-pressure-CVD-and-Plasma-Enhanced-CVD-Curley-McCormack/950e3404dcf006e97735a0453c56010bc7cf77a7>
- [27] D. Lusk *et al.*, “Thick DLC films deposited by PECVD on the internal surface of cylindrical substrates,” *Diamond and Related Materials*, vol. 17, no. 7–10, pp. 1613–1621, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.diamond.2008.01.051.
- [28] N. Fourches and G. Turban, “Influence of hydrocarbon gasses on PECVD a-C:H film deposition,” *Plasmas and Polymers*, vol. 1, no. 1, pp. 47–64, Mar. 1996, doi: 10.1007/bf02532814.
- [29] G. Kim *et al.*, “Two dimensional radial gas flows in atmospheric pressure plasma-enhanced chemical vapor deposition,” *AIP Advances*, vol. 7, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1063/1.4996797.
- [30] H. Wilkes and J. Schwarzbauer, “Hydrocarbons: An Introduction to Structure, Physico-Chemical Properties and Natural Occurrence,” *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, pp. 1–48, 2010, doi: 10.1007/978-3-540-77587-4_1.
- [31] P. Pässler *et al.*, “Acetylene,” *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Oct. 2011, doi: 10.1002/14356007.a01_097.pub4.
- [32] V. V. Voronin, M. S. Ledovskaya, A. S. Bogachenkov, K. S. Rodygin, and V. P. Ananikov, “Acetylene in Organic Synthesis: Recent Progress and New

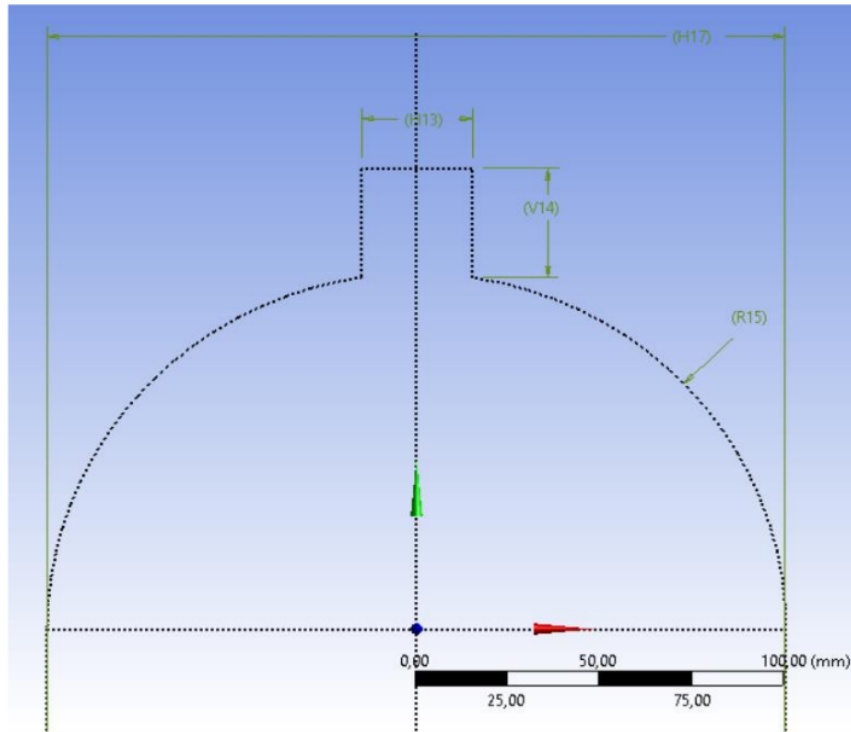
Uses,” *Molecules*, vol. 23, no. 10, p. 2442, Sep. 2018, doi: 10.3390/molecules23102442.

- [33] “Propylene Production by Propane Dehydrogenation (PDH),” *SlideShare*, Jun. 17, 2019. <https://www.slideshare.net/AmirRazmi/propylene-production-by-propane-dehydrogenation-pdh> (Diakses 23 Juli, 2023).
- [34] A. C. Dimian, C. S. Bildea, and A. A. Kiss, “Introduction in Process Simulation,” *Computer Aided Chemical Engineering*, pp. 35–71, 2014, doi: 10.1016/b978-0-444-62700-1.00002-4.
- [35] M. Crose, W. Zhang, A. Tran, and P. D. Christofides, “Multiscale three-dimensional CFD modeling for PECVD of amorphous silicon thin films,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 113, pp. 184–195, May 2018, doi: 10.1016/j.compchemeng.2018.03.011.
- [36] V. Michalcová and K. Kotrasová, “The Numerical Diffusion Effect on the CFD Simulation Accuracy of Velocity and Temperature Field for the Application of Sustainable Architecture Methodology,” *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 10173, Dec. 2020, doi: 10.3390/su122310173.
- [37] B. Debtera, “Computational Fluid Dynamics Simulation and Analysis of Fluid Flow in Pipe: Effect of Fluid Viscosity,” *SSRN Electronic Journal*, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4201717.
- [38] C. Siripaiboon, P. Sarabhorn, and C. Areeprasert, “Two-dimensional CFD simulation and pilot-scale experimental verification of a downdraft gasifier: effect of reactor aspect ratios on temperature and syngas composition during gasification,” *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 536–550, Aug. 2020, doi: 10.1007/s40789-020-00355-8.
- [39] D. I. Pashchenko, “CFD Modeling of Operating Processes of a Solar Air Heater in ANSYS Fluent,” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 92, no. 1, pp. 73–79, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10891-019-01908-8.

- [40] A. Andalouci *et al.*, “Role of Oxygen in PECVD Carbon Nanotubes Growth: Experiments and Modeling,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 43, no. 3, pp. 757–786, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11090-023-10317-y.
- [41] S. A. Konakov and V. V. Krzhizhanovskaya, “A mathematical model and simulation results of plasma enhanced chemical vapor deposition of silicon nitride films,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 574, p. 012144, Jan. 2015, doi: 10.1088/1742-6596/574/1/012144.
- [42] L. Mustafi, M. M. Rahman, M. N. E. A. Al Nasim, M. A. Chowdhury, and M. H. Monir, “Deposition behavior and tribological properties of diamond-like carbon coatings on stainless steels via chemical vapor deposition,” *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 25, no. 11, pp. 1335–1343, Oct. 2018, doi: 10.1007/s12613-018-1687-3.

LAMPIRAN

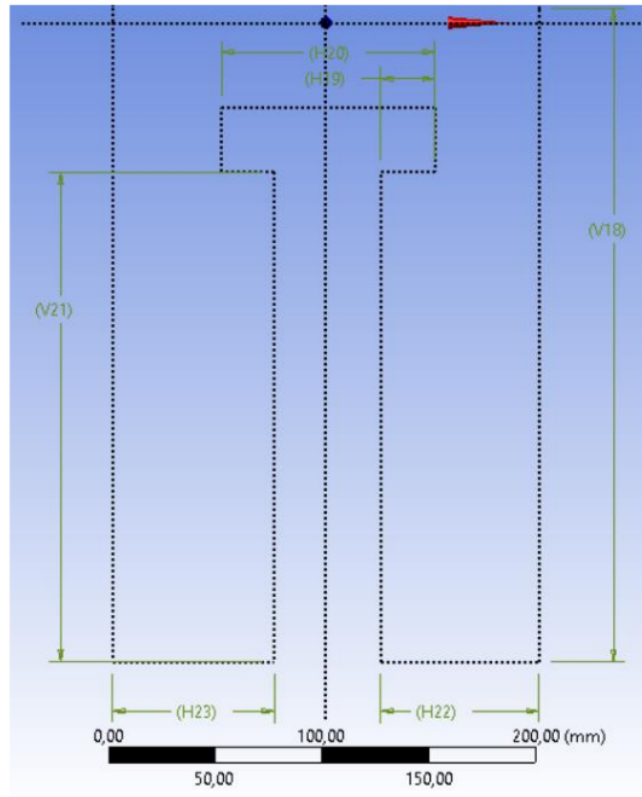
Lampiran A. *Input Data* dan Langkah Simulasi



Gambar A.1 Dimensi pada Sektor Atas *Chamber*

Details View	
[-] Details of Sketch2	
Sketch	Sketch2
Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No
[-] Dimensions: 4	
(H13)	30 mm
(H17)	200 mm
(R15)	100,11 mm
(V14)	30,667 mm

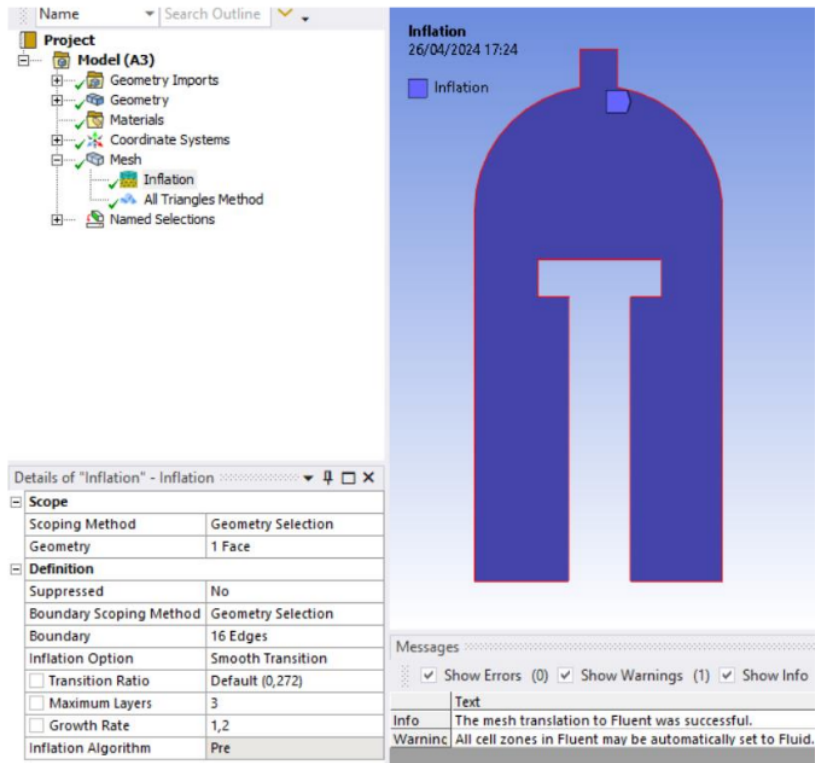
Gambar A.2 Keterangan Angka pada Dimensi Sektor Atas *Chamber*



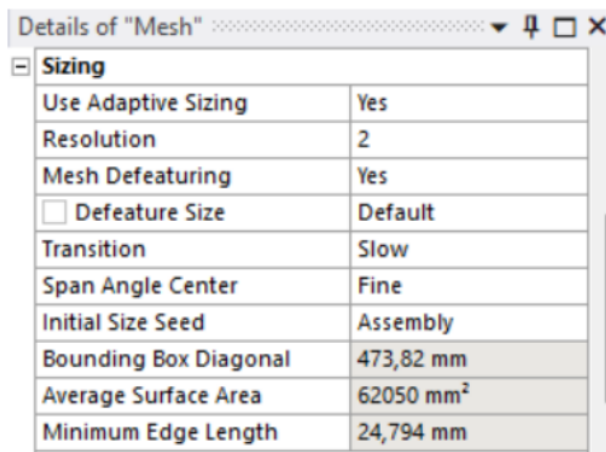
Gambar A.3 Dimensi pada Sektor Bawah Chamber

Details View	
[-] Details of Sketch2	
Sketch	Sketch2
Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No
[-] Dimensions: 6	
(H19)	25,206 mm
(H20)	100 mm
(H22)	74,12 mm
(H23)	75,88 mm
(V18)	306,6 mm
(V21)	229,85 mm

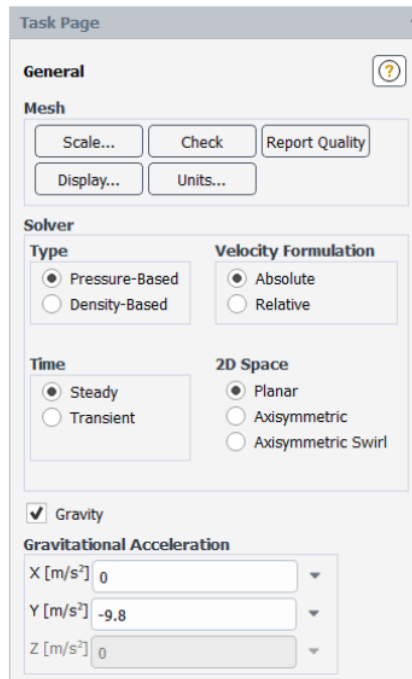
Gambar A.4 Keterangan Angka pada Dimensi Sektor Bawah Chamber



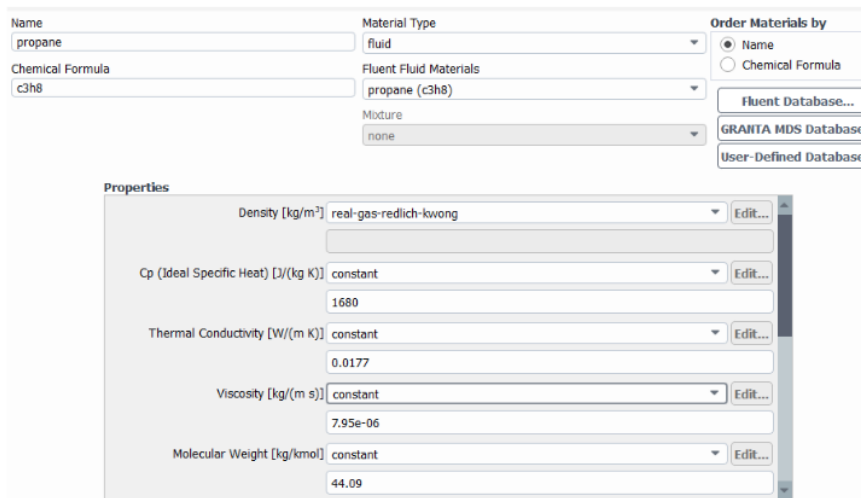
Gambar A.5 Proses Meshing Inflation pada Model



Gambar A.6 Pengaturan Ukuran dan Kualitas Mesh



Gambar A.7 Pengaturan Standar Gravitasi dan Tipe Penyelesaian



Gambar A.8 Standar Sifat Fisik Gas Propana pada ANSYS

Name	acetylene	Material Type	fluid	Order Materials by	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula	c2h2	Fluent Fluid Materials	acetylene (c2h2)		<input type="radio"/> Chemical Formula
		Mixture	none	Fluent Database...	
				GRANTA MDS Database...	
				User-Defined Database...	

Properties	
Density [kg/m ³]	real-gas-redlich-kwong
Cp (Ideal Specific Heat) [J/(kg K)]	constant
	1674
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant
	0.0213
Viscosity [kg/(m s)]	constant
	1e-05
Molecular Weight [kg/kmol]	constant
	26.04

Gambar A.9 Standar Sifat Fisik Gas Asetilena pada ANSYS

Name	d2-steel	Material Type	solid	Order Materials by	<input checked="" type="radio"/> Name
Chemical Formula		Fluent Solid Materials	d2-steel		<input type="radio"/> Chemical Formula
		Mixture	none	Fluent Database...	
				GRANTA MDS Database...	
				User-Defined Database...	

Properties	
Density [kg/m ³]	constant
	7610
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant
	460
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant
	23

Gambar A.10 Standar Sifat Fisik Baja D2 pada ANSYS

Name stainless-steel-304	Material Type solid	Order Materials by <input checked="" type="radio"/> Name <input type="radio"/> Chemical Formula
Chemical Formula	Fluent Solid Materials stainless-steel-304	Fluent Database...
	Mixture none	GRANTA MDS Database...
		User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m ³]	constant	Edit...
	8000	
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant	Edit...
	500	
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant	Edit...
	16.27	

Gambar A.11 Standar Sifat Fisik *Stainless Steel 304* pada ANSYS

Zone Name
inlet

Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	Structure	UDS
----------	----------------	-----------	---------	-----	------------	-----------	-----------	-----

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude [m/s]: 5

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 120

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Gambar A.12 *Input Data Inlet*

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 120

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%] 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10

Gambar A.13 *Input Data Outlet*

Zone Name
reactor_wall

Adjacent Cell Zone
surface_body

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

Thermal Conditions

Heat Flux

Temperature

Convection

Radiation

Mixed

via System Coupling

via Mapped Interface

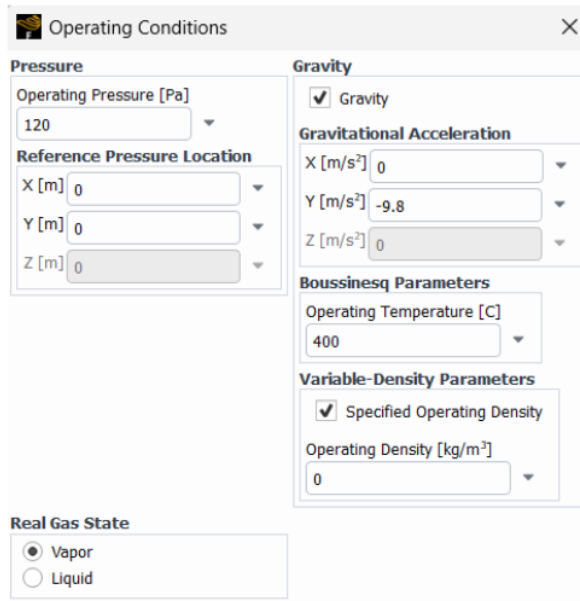
Temperature [C] 400

Wall Thickness [m] 0

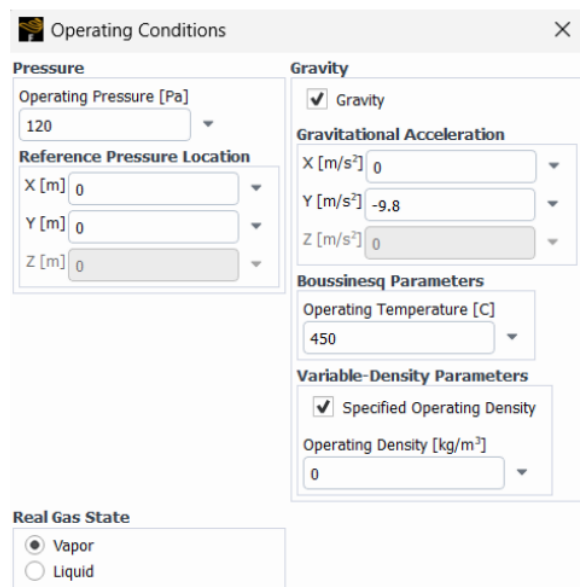
Heat Generation Rate [W/m²] 0

Material Name
stainless-steel-304 Edit...

Gambar A.14 *Input Data Dinding Reaktor*



Gambar A.15 Pengaturan Kondisi Pengoperasian Temperatur 400°C



Gambar A.16 Pengaturan Kondisi Pengoperasian Temperatur 450°C

Reference Values ?

Compute from
inlet

Reference Values

Area [m²] 1

Density [kg/m³] 0.004341369

Depth [m] 1

Enthalpy [J/kg] 0

Length [m] 1

Pressure [Pa] 120

Temperature [C] 20

Velocity [m/s] 5

Viscosity [kg/(m s)] 7.95e-06

Ratio of Specific Heats 1.4

Yplus for Heat Tran. Coef. 300

Reference Zone
surface_body

Gambar A.17 Pengaturan Nilai Referensi

Solution Methods ?

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
SIMPLE

Flux Type
Rhie-Chow: momentum based Auto Select

Spatial Discretization

Gradient
Least Squares Cell Based

Pressure
Second Order

Density
Second Order Upwind

Momentum
Second Order Upwind

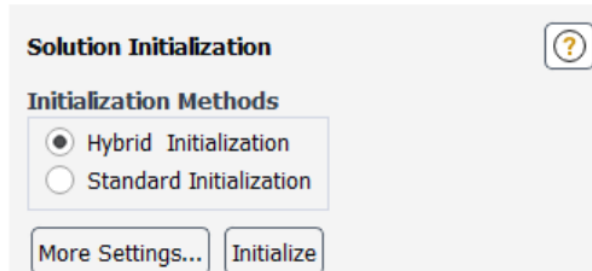
Turbulent Kinetic Energy
First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate
First Order Upwind

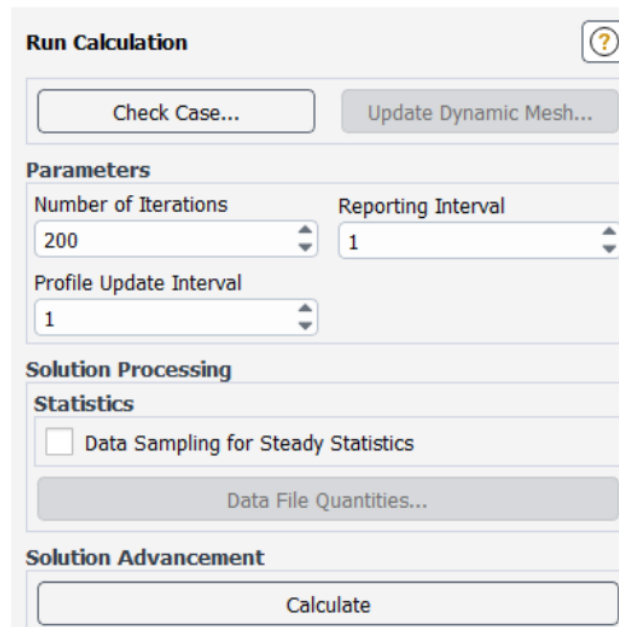
Energy
Second Order Upwind

Pseudo Time Method
Off

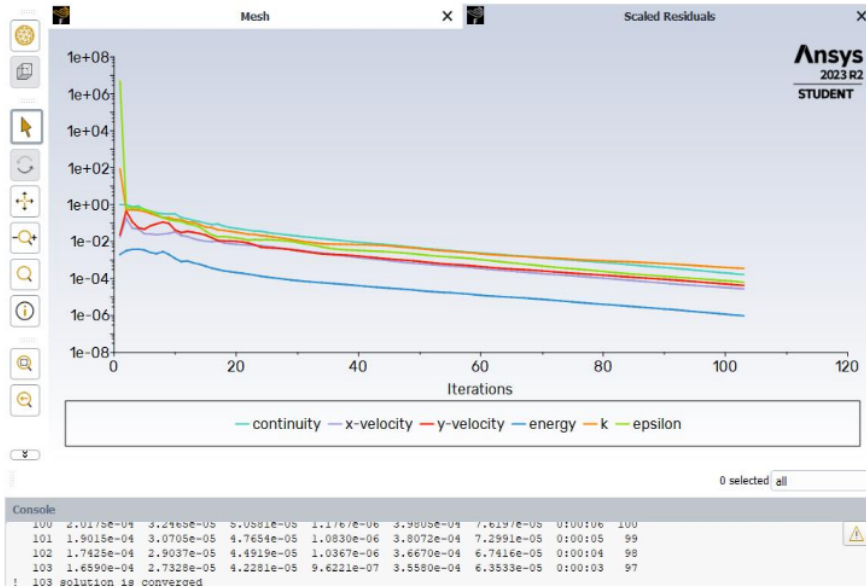
Gambar A.18 Pengaturan Metode Penyelesaian Simulasi



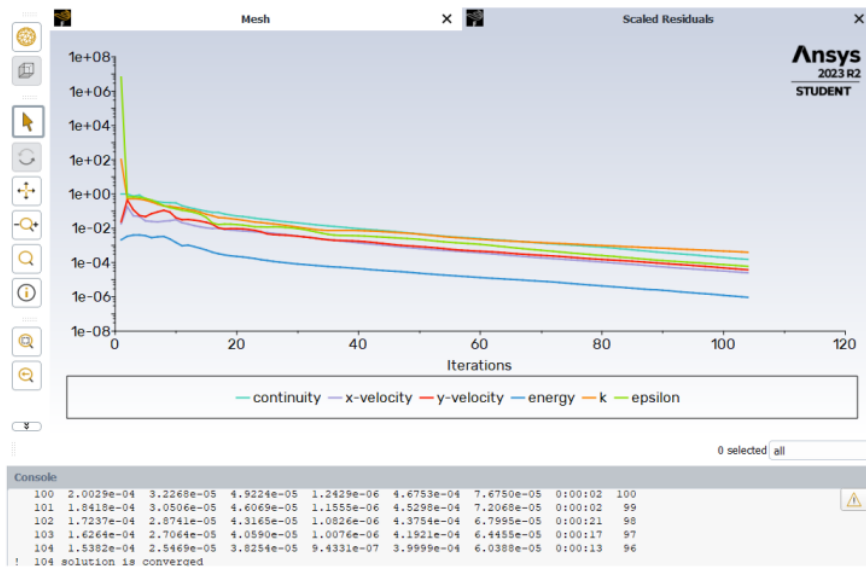
Gambar A.19 Pengaturan Metode Inisialisasi



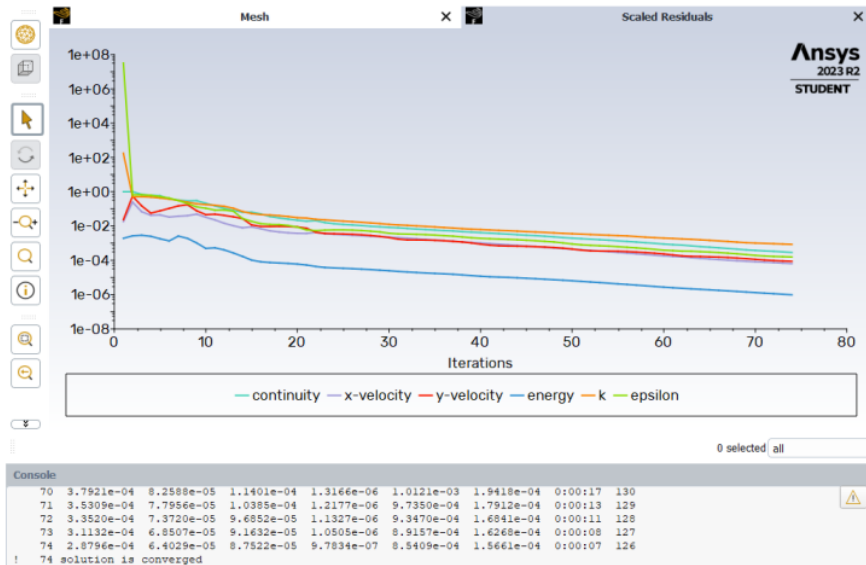
Gambar A.20 Pengaturan Jumlah Iterasi dan Interval



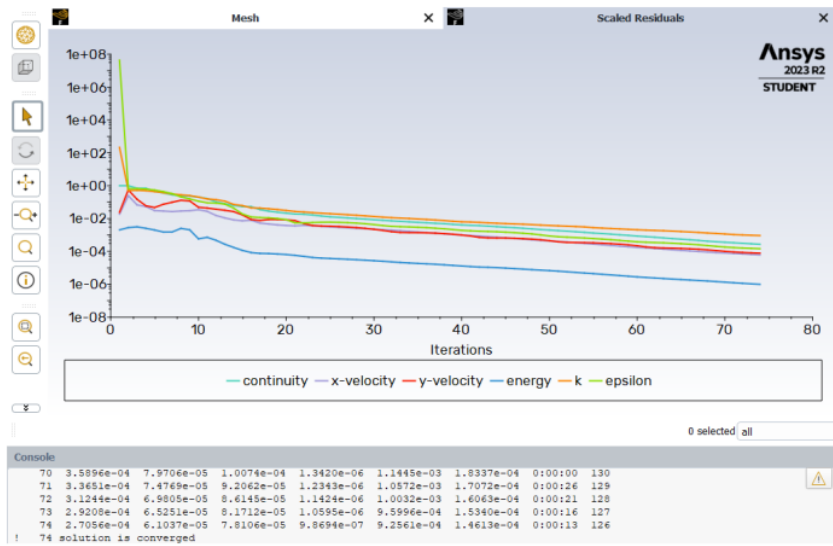
Gambar A.21 Penyelesaian Komputasi pada Gas Propana 400°C



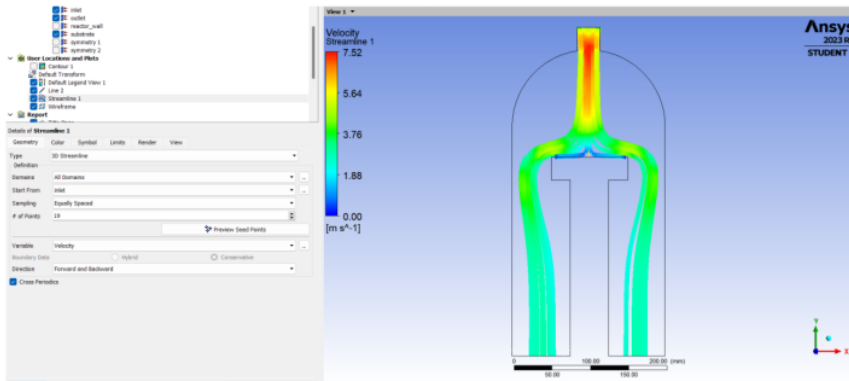
Gambar A.22 Penyelesaian Komputasi pada Gas Propana 450°C



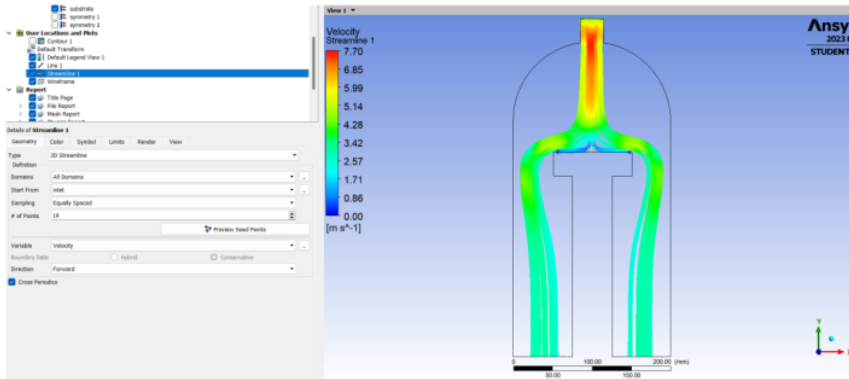
Gambar A.23 Penyelesaian Komputasi pada Gas Asetilena 400°C



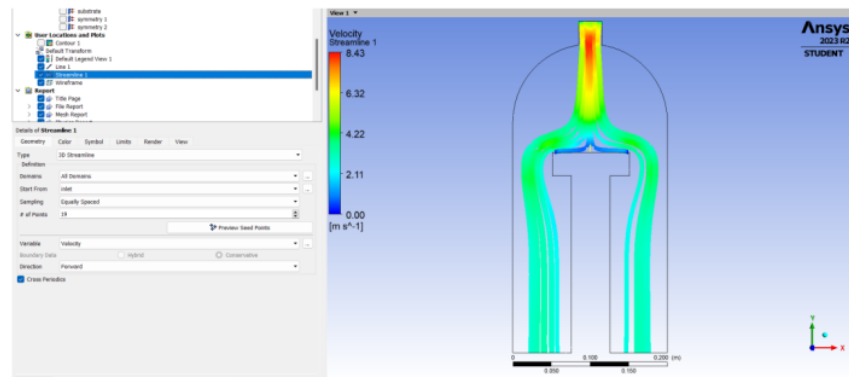
Gambar A.24 Penyelesaian Komputasi pada Gas Asetilena 450°C



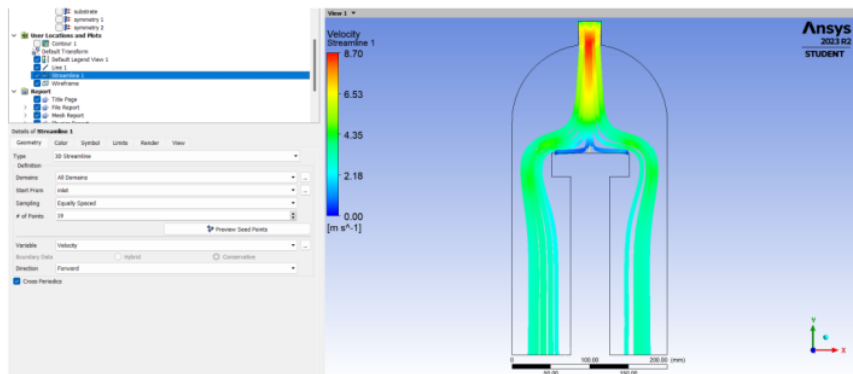
Gambar A.25 Streamline Gas Propana 400°C



Gambar A.26 Streamline Gas Propana 450°C



Gambar A.27 Streamline Gas Asetilena 400°C



Gambar A.28 Streamline Gas Asetilena 450°C

ORIGINALITY REPORT

9%

SIMILARITY INDEX

8%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

eprints.untirta.ac.id

Internet Source

2%

2

www.slideshare.net

Internet Source

<1%

3

repository.ub.ac.id

Internet Source

<1%

4

es.scribd.com

Internet Source

<1%

5

text-id.123dok.com

Internet Source

<1%

6

pdfcoffee.com

Internet Source

<1%

7

repository.its.ac.id

Internet Source

<1%

8

lib.unnes.ac.id

Internet Source

<1%

9

docplayer.info

Internet Source

<1%

10	huggingface.co Internet Source	<1 %
11	repository.nobel.ac.id Internet Source	<1 %
12	metalurgi.untirta.ac.id Internet Source	<1 %
13	purehost.bath.ac.uk Internet Source	<1 %
14	repository.unhas.ac.id Internet Source	<1 %
15	repository.univ-tridinanti.ac.id Internet Source	<1 %
16	"Vapor Transport Processing: Mechanisms", Encyclopedia of Condensed Matter Physics, 2005 Publication	<1 %
17	perbedaan.budisma.net Internet Source	<1 %
18	repo.undiksha.ac.id Internet Source	<1 %
19	eprints.polsri.ac.id Internet Source	<1 %
20	id.scribd.com Internet Source	<1 %

21	repository.usd.ac.id Internet Source	<1 %
22	docit.tips Internet Source	<1 %
23	pt.scribd.com Internet Source	<1 %
24	fr.scribd.com Internet Source	<1 %
25	lib.ui.ac.id Internet Source	<1 %
26	safirarahmi.wordpress.com Internet Source	<1 %
27	tel.archives-ouvertes.fr Internet Source	<1 %
28	rizqiakbarmuharrom.wordpress.com Internet Source	<1 %
29	Dwi Priyantoro, Tjipto Sujitno, Bangun Pribadi, Zuhdi Arif Ainun Najib. "PERLAKUAN PERMUKAAN PADA ROLLER RANTAI DENGAN METODE PLASMA CARBURIZING DARI CAMPURAN GAS He DAN CH4 PADA TEKANAN 1,8 mbar", Jurnal Forum Nuklir, 2017 Publication	<1 %
30	idoc.pub	

Internet Source

<1 %

31

library.binus.ac.id

Internet Source

<1 %

32

melezy.com

Internet Source

<1 %

33

Lei Tang, Tao Li, Yuting Luo, Simin Feng, Zhengyang Cai, Hang Zhang, Bilu Liu, Hui-Ming Cheng. "Vertical Chemical Vapor Deposition Growth of Highly Uniform 2D Transition Metal Dichalcogenides", ACS Nano, 2020

Publication

<1 %

34

docobook.com

Internet Source

<1 %

35

eprints.undip.ac.id

Internet Source

<1 %

36

jurnal.untan.ac.id

Internet Source

<1 %

37

repository.untar.ac.id

Internet Source

<1 %

38

www.researchgate.net

Internet Source

<1 %

39

etheses.uin-malang.ac.id

Internet Source

<1 %

40	ejournal.upnvj.ac.id Internet Source	<1 %
41	eprints.pktj.ac.id Internet Source	<1 %
42	etd.repository.ugm.ac.id Internet Source	<1 %
43	garuda.kemdikbud.go.id Internet Source	<1 %
44	greatdayhr.com Internet Source	<1 %
45	id.123dok.com Internet Source	<1 %
46	id.iksvacuum.com Internet Source	<1 %
47	metall-mater-eng.com Internet Source	<1 %
48	mochsafarudin.wordpress.com Internet Source	<1 %
49	publications.lib.chalmers.se Internet Source	<1 %
50	repositorio.unifesp.br Internet Source	<1 %
51	repository.uin-suska.ac.id Internet Source	<1 %

52

search.unikom.ac.id

Internet Source

<1 %

53

worldwidescience.org

Internet Source

<1 %

54

www.repository.uinjkt.ac.id

Internet Source

<1 %

55

www.sciencepg.net

Internet Source

<1 %

56

Ahmad Taqwa, Soegijardjo Soegijoko,
Sugihartono ., Suhartono Tjondronegoro.
"DETEKTOR ML UNTUK KOMUNIKASI ANTENA
JAMAK", MAKARA of Technology Series, 2010

Publication

<1 %

57

Saleh Dwiyatno, Gunardi Wira Putra, Erni
Krisnaningsih. "Penerapan Ospf Routing, De-
Militarized Zone, Dan Firewall Pada Mikrotik
Routerboardtm Dinas Komunikasi Dan
Informatika Depok", JSiI (Jurnal Sistem
Informasi), 2017

Publication

<1 %

58

endahwrn.wordpress.com

Internet Source

<1 %

59

modernloveok.com

Internet Source

<1 %

60

repository.stikes-bhm.ac.id

Internet Source

<1 %

61 www.gultomlawconsultants.com <1 %
Internet Source

62 www.scribd.com <1 %
Internet Source

63 "Plasma Science and Technology for Emerging Economies", Springer Science and Business Media LLC, 2017 <1 %
Publication

64 [Encyclopedia of Tribology, 2013.](#) <1 %
Publication

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography On