

**SIMULASI PLASMA NITRIDASI MELALUI *COMPUTATIONAL  
FLUID DYNAMICS ANSYS FLUENT* DENGAN MENGAMATI  
PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR  
TERHADAP KARAKTERISTIK  
ALIRAN GAS**

**SKRIPSI**

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



Oleh:

Andhika Pramudya Rahmawan  
3334200003

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON - BANTEN  
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

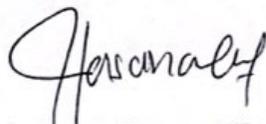
**SIMULASI PLASMA NITRIDASI MELALUI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANSYS FLUENT* DENGAN MENGAMATI  
PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR  
TERHADAP KARAKTERISTIK  
ALIRAN GAS**

**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



**Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.**  
NIP. 199012142019032022

Pembimbing II



**Anistasia Milandia, ST., MT.**  
NIP. 198203222006042002

LEMBAR PERSUTUJUAN

**SIMULASI PLASMA NITRIDASI MELALUI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANSYS FLUENT* DENGAN MENGAMATI  
PENGARUH TEKANAN DAN TEMPERATUR  
TERHADAP KARAKTERISTIK  
ALIRAN GAS**

**SKRIPSI**

Disusun dan diajukan oleh:

**Andhika Pramudya Rahmawan**

**3334200003**

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal **13 Januari 2025**

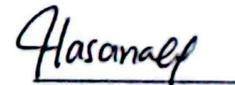
Susunan Dewan Penguji

Penguji I : Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

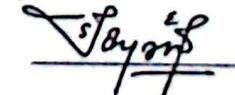
Penguji II : Anistasia Milandia, S.T., M.T.

Penguji III : Suryana, S.T., M.Si.

Tanda Tangan







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. 198003072005011002

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Simulasi Plasma Nitridasi Melalui *Computational Fluid Dynamics Ansys Fluent* Dengan Mengamati Pengaruh Tekanan dan Temperatur Terhadap Karakteristik Aliran Gas

Nama Mahasiswa : Andhika Pramudya Rahmawan

NIM : 3334200003

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut 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 dikemudian 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, 20 Januari 2025



Andhika Pramudya Rahmawan  
NIM. 3334200003

## ABSTRAK

*Thermochemical treatments* merupakan proses modifikasi permukaan material dengan menggunakan perlakuan panas dan rekasi kimia tanpa megubah sifat material tersebut. Salah satu metode *thermochemical treatments* yaitu nitridasi. Metode nitridasi gas memiliki kekurangan yaitu membutuhkan temperatur yang tinggi untuk memanaskan logam. Penggunaan temperatur tinggi, dapat menimbulkan resiko seperti merusak baja yang akan diproses. Berdasarkan kekurangan tersebut, metode ini dikembangkan menjadi plasma nitridasi. Plasma nitridasi ialah pengembangan dari nitridasi gas yang memanfaatkan plasma untuk meningkatkan efektivitas proses penyerapan nitrogen pada permukaan logam. Metode ini memiliki beberapa risiko dengan menggunakan plasma yaitu terbentuknya gas yang dipanaskan hingga temperatur tinggi sehingga dilakukan simulasi untuk melakukan uji eksperimen. Simulasi yang digunakan yaitu *computational fluid dynamics* (CFD) dengan *software* ANSYS 2024 untuk mempelajari sifat fluida berupa gas dan karakteristik gas pada baja yang disimulasikan. Pada simulasi kali ini menggunakan variabel berupa temperatur dan tekanan gas yang berbeda. Temperatur yang digunakan yaitu 400 °C, 425 °C dan 450 °C sedangkan tekanan yang digunakan yaitu 1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2,0 mbar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan temperatur 450 °C menghasilkan panas yang optimal pada baja dibandingkan dengan menggunakan temperatur 400 °C dan 425 °C. Temperatur tinggi ini mempengaruhi karakteristik aliran gas seperti densitas gas. Penggunaan tekanan 2,0 mbar menghasilkan penyebaran panas pada sampel lebih merata yang ditandai dengan kontur dengan dominasi warna merah pada permukaan sampel hingga dinding sampel dibandingkan dengan menggunakan tekanan 1,5 mbar dan 1,75 mbar.

**Kata kunci:** *Thermochemical Treatments, Computational Fluid Dynamics, Nitridasi*

## ABSTRACT

Thermochemical treatments are a process of modifying the surface of a material by using heat treatment and chemical reactions without changing the properties of the material. One method of thermochemical treatments is nitriding. The gas nitriding method has the disadvantage of requiring high temperatures to heat the metal. The use of high temperatures can pose risks such as damaging the steel to be processed. Based on these shortcomings, this method was developed into plasma nitriding. Plasma nitriding is a development of gas nitriding that utilizes plasma to increase the effectiveness of the nitrogen absorption process on the metal surface. This method has several risks by using plasma, namely the formation of gas heated to high temperatures so that simulations are carried out to conduct experimental tests. The simulation used is computational fluid dynamics (CFD) with ANSYS 2024 software to study fluid properties in the form of gas and gas characteristics in simulated steel. This simulation uses variables in the form of different gas temperatures and pressures. The temperatures used are 400°C, 425°C and 450°C while the pressures used are 1.5 mbar, 1.75 mbar and 2.0 mbar. The simulation results show that using a temperature of 450 °C produces optimal heat in steel compared to using temperatures of 400 °C and 425 °C. This high temperature affects gas flow characteristics such as gas density. The use of a pressure of 2.0 mbar produces a more even distribution of heat in the sample which is characterized by contours with a predominance of red on the surface of the sample to the sample wall compared to using pressures of 1.5 mbar and 1.75 mbar.

**Keywords:** Thermochemical Treatments, Computational Fluid Dynamics, Nitriding

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul " Simulasi Plasma Nitridasi Melalui *Computational Fluid Dynamics Ansys Fluent* Dengan Mengamati Pengaruh Tekanan dan Temperatur Terhadap Karakteristik Aliran Gas" Skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat kelulusan pada program sarjana di Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari proses pengerjaan skripsi ini banyak dibantu oleh beberapa pihak, maka dari itu penulis mengucapkan rasa terima kasih dengan tulus kepada:

1. Kedua orang tua penulis yaitu Bapak Didi Rachmawan dan Ibu Eha Muslihah. Terima kasih atas segala doa, pengorbanan, dukungan, motivasi, serta kasih sayang yang tiada henti-hentinya diberikan hingga penulis mampu menyelesaikan studi hingga akhir.
2. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Ibu Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T. selaku pembimbing I dan Ibu Anistasia Milandia, S.T., M.T. selaku pembimbing II sekaligus pembimbing akademik yang dengan sabar, tulus, ikhlas meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan, motivasi, arahan dan saran yang berharga kepada penulis selama penyusunan skripsi ini.
4. Keluarga besar penulis yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan kepada penulis selama proses pengerjaan skripsi ini.
5. Sahabat-sahabat yang tergabung dalam Rumah Ardo yang memberikan hiburan dan dukungan selama menjalani perkuliahan.
6. Teman-teman Dul Bedul, Rumah Arga, Puri Ungu, Kost Nana, Palm Flamboyan Atas, Damkar Oranye, Keserangan Biru, serta golongan yang tergabung dalam Teknik Metalurgi Angkatan 2020 yang telah memberikan dukungan dan semangat selama menjalani perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran akan penulis nantikan. Besar harapan penulis dengan menyusun skripsi ini dapat membantu penulis menjadi sebuah acuan penelitian dan bermanfaat bagi pembacanya. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Cilegon, Januari 2025

Andhika Pramudya Rahmawan

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup .....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Nitridasi .....	6
2.2 Plasma Nitridasi.....	8
2.3 Mekanisme dan Pramater Proses Plasma Nitridasi .....	10
2.4 Mekanisme Difusi .....	12

2.5	Definisi Diagram Fasa Fe-N.....	14
2.6	Gas Nitrogen.....	15
2.7	Definisi Baja dan Klasifikasinya .....	16
2.7.1	Macam-Macam Baja Karbon.....	17
2.7.2	Macam-Macam Baja Paduan.....	18
2.7.3	Unsur Baja Paduan .....	19
2.8	Spesifikasi Baja AISI D2.....	22
2.9	Pengaplikasian <i>Software</i> ANSYS.....	22
2.10	Metode <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD).....	24

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir Penelitian.....	28
3.1.1	Diagram Alir Simulasi Proses.....	28
3.2.1	Algoritma Simulasi CFD .....	29
3.2	Alat yang digunakan.....	30
3.3	Model Matematika Simulasi.....	31
3.4	Prosedur Penelitian.....	32
3.4.1	Pembuatan Geometri <i>Substrat</i> .....	32
3.4.2	Parameter Simulasi <i>Computational Fluida Dynamics</i> .....	34

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Data Hasil Penelitian .....	36
4.2	Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Gas.....	41
4.3	Pengaruh Temperatur terhadap Laju Alir Gas .....	45
4.4	Pengaruh Temperatur terhadap Densitas Gas.....	48

4.5	Pengaruh Tekanan Gas terhadap Distribusi Temperatur .....	50
4.6	Pengaruh Tekanan Gas terhadap Laju Alir Gas.....	54
4.7	Pengaruh Tekanan Gas terhadap Desnitas Gas.....	56
4.8	Profil Temperatur Hubungan Temperatur dengan Tekanan.....	58

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran.....	62

**DAFTAR PUSTAKA .....**63

**LAMPIRAN.....**69

## DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Sifat Kimia Nitrogen .....	16
2.2 Komposisi Kimia Baja AISI D2.....	22
3.1 Data Parameter Simulasi CFD.....	34
3.2 Data Parameter Model Gas Nitrogen.....	35
4.1 Data Hasil Simulasi Pengaruh Temperatur Terhadap Kecepatan Aliran dan Densitas.....	38
4.2 Data Hasil Simulasi Pengaruh Tekanan Terhadap Kecepatan Aliran dan Densitas.....	39
4.3 Data Hasil Simulasi Pengaruh Tekanan Terhadap Temperatur.....	40
4.4 Data Hasil Simulasi Temperatur Profil .....	41

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Skema Proses <i>Nitriding</i> .....	6
2.2 Skema Reaktor Plasma.....	8
2.3 Penyisipan Ion ke Benda Kerja.....	9
2.4 Tahap Perlakuan Panas Plasma Nitridasi.....	10
2.5 Proses Difusi <i>Vacancy</i> .....	13
2.6 Proses Difusi <i>Intersisi</i> .....	13
2.7 Diagram Fasa Fe-N.....	14
2.8 Skematik Simulasi Gas Masuk.....	27
2.9 Vektor Kecepatan Distribusi Gas di Sekitar Substrat.....	27
3.1 Diagram Alir Simulasi Proses.....	28
3.2 Algoritma Simulasi.....	30
3.3 Dimensi Geometri Sampel.....	33
4.1 Geometri Baja AISI D2.....	36
4.2 Hasil <i>Mehsing</i> Baja AISI D2.....	37
4.3 Hasil Distribusi Gas Nitrogen Pada Temperatur (a) 400 °C, (b) 425 °C dan (b) 450 °C.....	43
4.4 Kontur Kecepatan Alir Gas Nitrogen Pada Temperatur (a) 400 °C, (b) 425 °C dan (b) 450 °C.....	46
4.5 Kurva Kecepatan Alir Gas Nitrogen Pada Temperatur 400 °C, 425 °C dan 450 °C.....	47
4.6 Kontur Perubahan Densitas Gas Nitrogen Pada Temperatur (a) 400 °C, (b) 425 °C dan (c) 450 °C.....	49

4.7	Kurva Perubahan Densitas Gas Nitrogen Pada Temperatur 400 °C, 425 °C dan 450 °C .....	50
4.8	Hasil Distribusi Temperatur dengan Tekanan (a) 1,5 mbar, (b) 1,75 mbar dan (c) 2,0 mbar .....	52
4.9	Kurva Distribusi Temperatur dengan Tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar, dan 2,0 mbar 450 °C .....	53
4.10	Kontur Laju Aliran Gas dengan Tekanan (a) 1,5 mbar, (b) 1,75 mbar dan (c) 2,0 mbar .....	55
4.11	Kurva Laju Aliran Gas dengan Tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2,0 mbar .....	56
4.12	Kontur Densitas Gas dengan Tekanan (a) 1,5 mbar dan (b) 1,75 mbar, dan (c) 2,0 mbar .....	57
4.13	Kurva Densitas Gas dengan Tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar, dan 2,0 mbar .....	58
4.14	Profil Temperatur Sepanjang <i>Inlet</i> ke <i>Outlet</i> .....	59

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang menduduki posisi strategis sebagai penghasil gas alam di dunia dengan potensi cadangan sebesar 75 miliar m<sup>3</sup> dan menempatkannya pada peringkat ke-10 secara global. Selain penghasil gas terbesar, Indonesia juga menjadi negara konsumen gas alam dengan total konsumsi sebesar 39,7 miliar berdasarkan data statistik energi dunia [1]. Berdasarkan data Kementerian ESDM proyeksi pemanfaatan gas bumi domestik Indonesia naik dengan rata-rata 7,8% pertahun [2]. Salah satu masalah besar yang dihadapi Indonesia dalam pemanfaatan gas alam yaitu kurangnya infrastruktur pipa gas alam, yang akan digunakan untuk mendistribusikan gas tersebut.

Pipa gas memiliki ukuran dan spesifikasi yang berbeda-beda yang disesuaikan dengan kondisi yang terjadi di lapangan dan hal yang paling sering terjadi yaitu kebocoran yang diakibatkan oleh korosi. Korosi memberikan dampak buruk berupa kerugian langsung seperti kerusakan pada material yang digunakan [3]. Salah satu cara pencegahan korosi yaitu dengan melakukan *thermochemical treatments* [4].

*Thermochemical treatments* merupakan proses modifikasi permukaan material dengan menggunakan perlakuan panas dan reaksi kimia tanpa mengubah sifat material tersebut. Proses ini memiliki beberapa kelebihan seperti meningkatkan kekerasan pada permukaan material secara signifikan, ketahanan aus

yang tinggi, dan ketahanan terhadap korosi. *Thermochemical treatments* memiliki beberapa metode seperti karburisasi, karbonitridasi, dan nitridasi [5].

Metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kekerasan material adalah metode nitridasi. Pada prosesnya, nitridasi salah satu proses perlakuan panas *thermochemical treatment* dengan tujuan nitrida dimasukkan ke dalam permukaan baja pada temperatur 400 hingga 600 °C. Nitridasi memiliki dua metode dalam prosesnya seperti nitridasi gas dan nitridasi cairan [6].

Metode nitridasi gas memiliki kekurangan yaitu membutuhkan temperatur yang tinggi untuk memanaskan logam. Penggunaan temperatur tinggi, dapat menimbulkan resiko seperti merusak baja yang akan diproses. Berdasarkan kekurangan tersebut, metode ini dikembangkan menjadi plasma nitridasi. Proses plasma nitridasi memiliki kelebihan yaitu menggunakan plasma untuk menghasilkan temperatur lebih rendah sekitar 400 °C hingga 500 °C dibandingkan dengan nitridasi gas konvensional yang menggunakan temperatur mencapai 600 °C [7]. Mekanisme dari proses plasma nitridasi yaitu melibatkan penggunaan plasma membantu memasukan nitrogen ke dalam permukaan baja. Plasma merupakan gas yang terionisasi. Ion-ion nitrogen yang dihasilkan dari plasma akan berdifusi pada permukaan yang dikeraskan, sehingga terjadi membentuk lapisan nitrida yang bersifat keras pada permukaan [8].

Simulasi merupakan suatu metode permodelan serta analisis yang digunakan untuk memprediksi perilaku suatu proses dengan menggunakan model matematika dan komputer. Metode ini digunakan untuk menganalisis proses sebelum dilakukan secara langsung agar mengurangi resiko-resiko yang akan terjadi seperti biaya

produksi yang mahal dan bahaya yang dapat terjadi di lapangan seperti ledakan. Metode plasma nitridasi dengan menggunakan reaktor memiliki kendala salah satunya adalah biayanya yang tinggi untuk melakukan proses ini secara langsung. Untuk mengamati bagaimana gas dapat membentuk lapisan nitrida pada baja, perlu diamati proses difusi yang mendasarinya. *Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan metode yang dapat digunakan untuk mensimulasikan proses plasma nitridasi dengan parameter proses yaitu laju kecepatan aliran gas, densitas, dan distribusi gas. Pada metode CFD analisis sistem dengan memperhatikan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena lainnya, termasuk reaksi kimia, melalui simulasi berbasis komputer yang menggunakan pendekatan numerik [9].

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode CFD dengan aplikasi ANSYS, sebuah perangkat lunak simulasi teknik dengan pengaplikasian *Computer Aided Engineering* (CAE). ANSYS dapat dilakukan permodelan dengan tujuan untuk menyelesaikan masalah mekanis secara numerik. Masalah-masalah tersebut dapat dikategorikan sebagai statis, dinamis, masalah fluida, dan perpindahan panas. *Software* ANSYS yang digunakan adalah ANSYS versi R2 2024 untuk melakukan simulasi CFD dengan menyelesaikan persamaan yang mengatur aliran fluida dan perpindahan panas.

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Identifikasi masalah pada penelitian kali ini adalah bagaimana efektifitas laju alir dengan mengamati densitas, tekanan, dan distribusi ion pada proses plasma nitridasi ke baja AISI D2 yang dianalisis menggunakan simulasi berbasis ANSYS.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui pengaruh variasi temperatur pada proses plasma nitridasi terhadap densitas, laju alir, tekanan dan distribusi ion pada baja AISI D2.
2. Mengetahui pengaruh variasi tekanan pada proses plasma nitridasi terhadap terhadap densitas, laju alir, tekanan dan distribusi ion pada baja AISI D2.
3. Mengetahui pengaruh penggunaan gas nitrogen yang berfokus baja sampel baja AISI D2 dan mendapatkan simulasi permodel yang sesuai dengan literatur yang tersedia agar mendapatkan hasil simulasi dengan perbedaan temperatur dan tekanan.

### 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Geometri sampel dibuat dengan software 3d *modelling* berupa Autodesk AutoCAD.
2. Simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 2024 R1.
3. Simulasi difokuskan pada logam dengan menggunakan baja AISI D2.
4. Variabel bebas:
  - a. Tekanan: 1,5 milibar, 1,75 milibar, dan 2,0 milibar
  - b. Temperatur proses: 450 °C, 425 °C dan 450 °C
5. Variabel terikat yaitu *output* hasil simulasi berupa laju alir, tekanan, densitas dan distribusi temperatur gas.

## **1.5 Sistematika Penulisan**

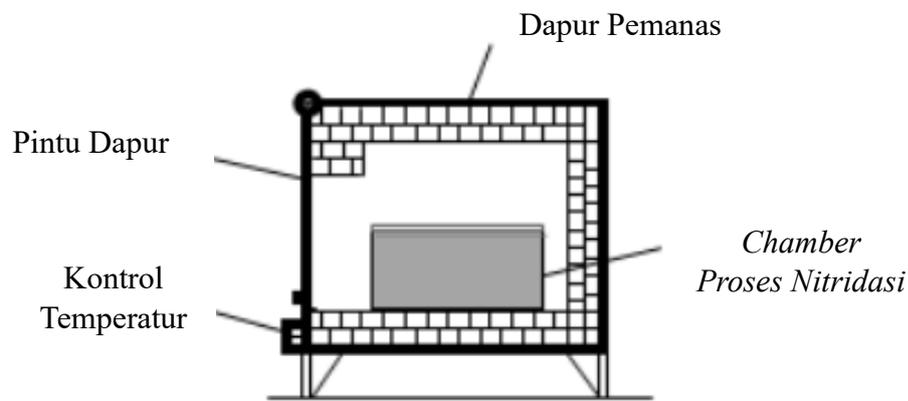
Sistematika penulisan terdiri dari bagian awal, bagian utama, dan bagian akhir skripsi. Bagian awal skripsi berisikan halaman judul, kata pengantar, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan daftar lampiran yang dimuat untuk mempermudah menemukan hal-hal yang yang diinformasikan. Bagian utama skripsi terbagi atas 5 bab dan sub bab yaitu yang membahas hal-hal mengenai penelitian. Bab I memuat latar belakang, identifikasi masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan skripsi. Latar belakang pada bab pertama menjelaskan tentang pemanfaatan gas alam di Indonesia, metode nitridasi, penggunaan plasma nitridasi, dan simulasi CFD sebagai komponen simulasi. Bab II memuat dan menjelaskan landasan teori, yang mendukung untuk memecahkan masalah penelitian. Adapun landasan teori yang dimuat membahas tentang dasar nitridasi, metode plasma nitridasi, gas nitrogen, simulasi proses berupa ANSYS. Bab III menjelaskan metode penelitian yang meliputi diagram alir penelitian, dan alat yang digunakan, serta prosedur penelitian. Bab IV memuat isi pembahasan mengenai data yang didapat dari hasil penelitian simulasi yang dilakukan. Bab V sebagai bab terakhir mengulas poin penting dari pembahasan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan. Selain itu juga dituliskan saran untuk penelitian serupa selanjutnya. Bagian akhir skripsi memuat daftar pustaka dan lampiran yang berisi contoh perhitungan, data hasil penelitian berupa data, dan berupa gambar hasil simulasi.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Nitridasi

Nitridasi pertama kali digunakan pada tahun 1920-an dan penggunaan metode ini terus berkembang pesat. Dengan menghasilkan baja dengan kualitas yang baik, metode ini terus dikembangkan hingga sebagian besar pengaplikasian baja menggunakan metode ini [10]. Proses nitridasi merupakan salah satu proses perlakuan panas kimia (*thermochemical treatment*) yang memiliki tujuan untuk meningkatkan kekerasan pada permukaan. Selain meningkatkan kekerasan permukaan, nitridasi juga dapat meningkatkan ketahanan aus, ketahanan fatik, dan ketahanan korosi. Metode ini dilakukan dengan cara pengerasan permukaan yang melibatkan difusi nitrogen ke dalam suatu logam pada temperatur dan jangka waktu tertentu tergantung dari ketebalan lapisan atau aplikasi dari material yang diinginkan [11].



**Gambar 2.1** Skema Proses *Nitriding* [12]

Nitridasi terbagi menjadi dua metode yaitu [13]:

a. Nitridasi Cairan

Proses nitridasi cairan merupakan salah satu metode perlakuan permukaan yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik material seperti kekerasan dan ketahanan korosi dengan cara menambahkan nitrogen pada permukaan. Pada proses nitridasi ini menggunakan cairan garam seperti *cyanide-cyanite salts* yang mengandung 60% - 70% NaCN (berat) dan 30% - 40% (berat). Proses ini diawali dengan pencairan garam pada permukaan dengan temperatur 560 – 570 °C dan waktu 1- 2 jam untuk membasahi permukaan baja yang dinitridasi. Kemudian dilanjutkan dengan proses nitridasi pada temperatur 565 – 595 °C dengan waktu hingga 12 jam.

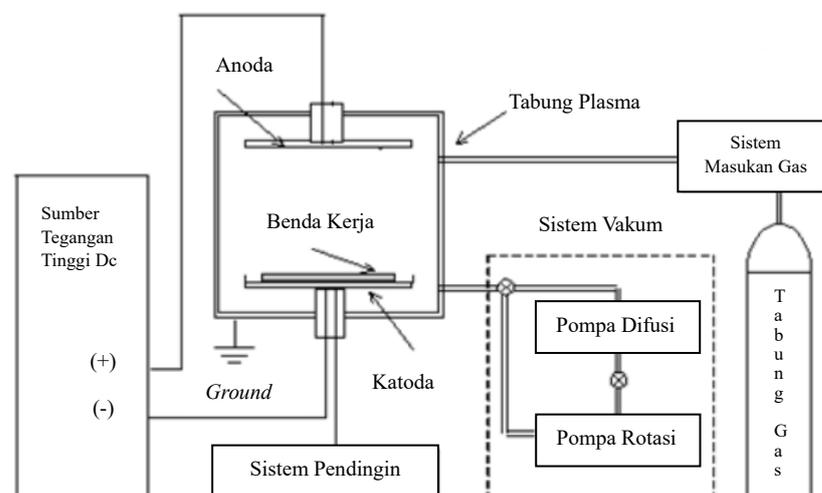
b. Nitridasi Gas

Proses nitridasi gas merupakan salah satu metode nitridasi yang dilakukan dengan cara mengalirkan gas yang mengandung nitrogen seperti gas amonia ( $\text{NH}_3$ ) dan nitrogen murni ( $\text{N}_2$ ) pada permukaan logam dengan temperatur yang tinggi sekitar 460-600 °C di dalam *furnace*. Pada temperatur tersebut amonia akan berdisosiasi sehingga menghasilkan atom hidrogen dan nitrogen. Dari hasil disosiasi ini selanjutnya atom nitrogen larut pada permukaan benda yang dinitridasi sehingga membentuk nitrida.

## 2.2 Plasma Nitridasi

Plasma merupakan gas yang terionisasi. Penggunaan metode plasma pertama kali dikembangkan oleh dua Fisikawan dari Jerman yaitu Drs. Wehnheldt dan Berghaus untuk melakukan penelitian yang berkaitan dengan metalurgi pada tahun 1930-an. Teknologi plasma biasanya digunakan untuk teknologi pelapisan dan perlakuan permukaan yang dibantu dengan plasma seperti nitridasi, karbonitridasi, dan karburisasi. [14]

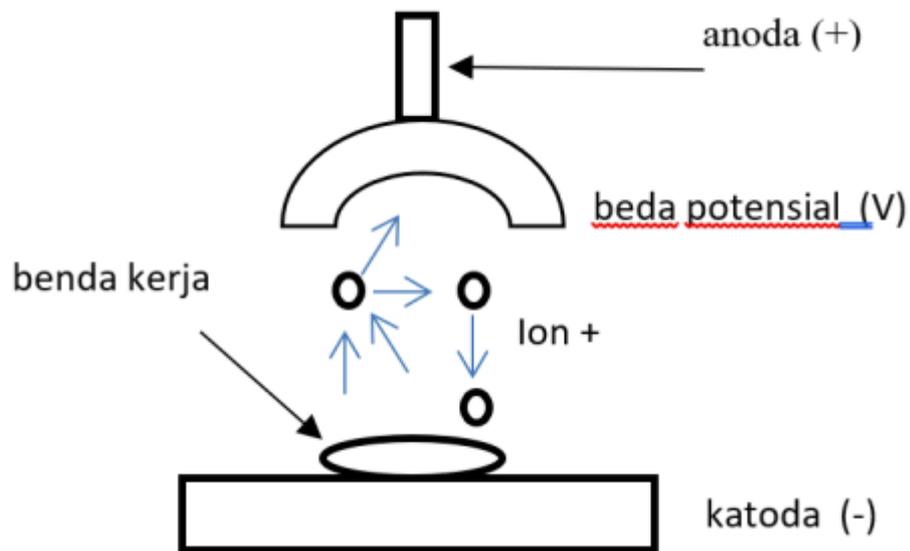
Seiring dengan perkembangan teknologi, nitridasi gas mengalami inovasi dengan diperkenalkannya plasma nitridasi. Plasma nitridasi ialah pengembangan dari nitridasi gas yang memanfaatkan plasma untuk meningkatkan efektivitas proses penyerapan nitrogen pada permukaan logam. Berikut merupakan skematik reaktor plasma:



**Gambar 2.2** Skema Reaktor Plasma [15]

Pada Gambar 2.1 merupakan komponen utama reaktor plasma yang terdiri dari tabung plasma yang dilengkapi peralatan pendukung berupa sumber tegangan

DC, sumber gas nitrogen, sistem vakum, dan sistem pendingin. Pada tabung plasma terdapat dua elektroda yaitu katoda dan anoda yang mana benda kerja yang akan dilakukan percobaan diletakkan pada katoda. Jika di dalam tabung plasma diisi gas nitrogen maka akan terjadi ionisasi dari atom-atom nitrogen. Ion positif dari nitrogen akan bergerak menuju katoda dan apabila pada katoda diletakkan benda kerja maka permukaan pada benda kerja akan tersisipi atom-atom nitrogen [15]. Dapat dilihat pada Gambar 2.3



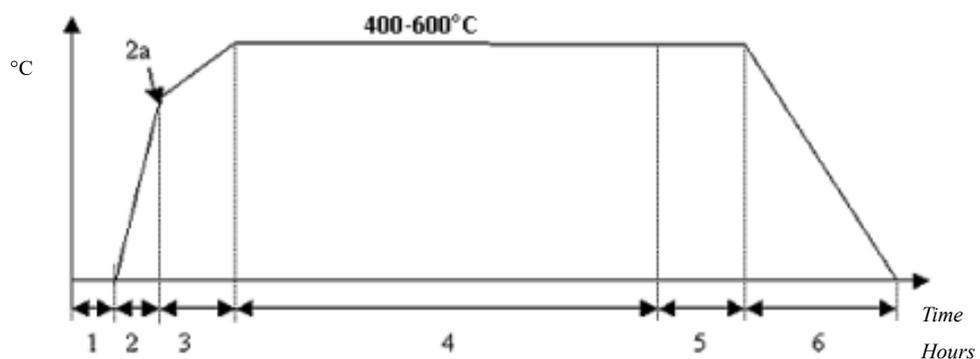
**Gambar 2.3** Penyisipan Ion ke Benda Kerja [15]

Permukaan benda kerja yang telah tersisipi atom-atom nitrogen akan menjadi lebih keras dibanding dengan *raw material* dari spesimen yang dilakukan percobaan plasma nitridasi. Apabila kekerasan awal dari *raw material* yaitu  $K_i$  dan kekerasan akhir setelah dilakukan proses nitridasi yaitu  $K_f$ , maka presentasi kenaikan kekerasan ( $K$ ) dapat dinyatakan seperti pada persamaan berikut [15]:

$$K = \frac{K_f - K_i}{K_i} \times 100 \% \dots \dots \dots (1)$$

### 2.3 Mekanisme dan Parameter Proses Plasma Nitridasi

Mekanisme pada proses plasma nitridasi yaitu pembentukan lapisan nitrit besi yang seragam pada permukaan melalui atom dari permukaan katoda dan ion nitrogen dari plasma. Proses plasama memungkinkan difusi. Selama proses nitridasi plasma, gas nitrogen diionisasi dengan menggunakan listrik atau gelombang elektromagnetik untuk menghasilkan plasma. Plasma yang terbentuk memiliki energi yang tinggi yang memungkinkan atom-atom besi pada permukaan katoda berinteraksi dengan ion nitrogen dari plasma. Nitrogen yang terionisasi dalam plasma akan berdifusi ke dalam permukaan logam dan membentuk lapisan nitrida. Salah satu keuntungan menggunakan plasma pada proses nitridasi yaitu menghasilkan lapisan nitrida yang lebih seragam dengan ketebalan yang lebih baik [14]. Adapun beberapa tahap perlakuan plasma nitridasi sebagai berikut:



**Gambar 2.4** Tahap Perlakuan Panas Plasma Nitridasi [14]

- a. Pada tahap 1 yaitu *pumping*. Pada tahap ini tabung dibersihkan lalu diisi dengan gas yang disesuaikan dengan kebutuhan.
- b. Pada tahap 2 yaitu *heating*. Pada tahap ini dibagi menjadi beberapa tahap tergantung dengan temperatur dan komponen proses yang dibutuhkan.
- c. Pada tahap 2a yaitu *pre oxidation*. Walaupun pada tahap ini biasanya tidak digunakan, tahap ini lapisan tipis oksida dibentuk pada atmosfer uap yang berguna untuk mempercepat proses nitridasi.
- d. Pada tahap 3 yaitu *sputtering*. Pada tahap ini permukaan dipanaskan hingga sedikit di bawah temperatur nitridasi.
- e. Pada tahap 4 yaitu *nitriding*. Pada tahap ini ion nitrogen masuk ke dalam permukaan yang membentuk nitrida yang tersebar merata.
- f. Pada tahap 5 yaitu *oxidation*. Pada tahap ini dilakukan sesuai permintaan atau kebutuhan. Lapisan tipis oksida dibuat untuk mencegah korosi pada komponen.
- g. Pada tahap 6 yaitu *cooling*. Pada tahap ini dilakukan secepat mungkin tanpa menyebabkan distorsi pada komponen.

Proses nitridasi plasma memberikan beberapa keunggulan dibandingkan dengan nitridasi konvensional menggunakan garam atau gas murni. Secara Khusus, struktur lapisan, kekerasan, dan homogenitas lapisan permukaan yang dihasilkan dapat dikendalikan secara selektif dengan cara beberapa parameter yang ditentukan sebagai berikut:

- a. Gas utama yang digunakan dalam proses nitridasi yaitu nitrogen dan hidrogen

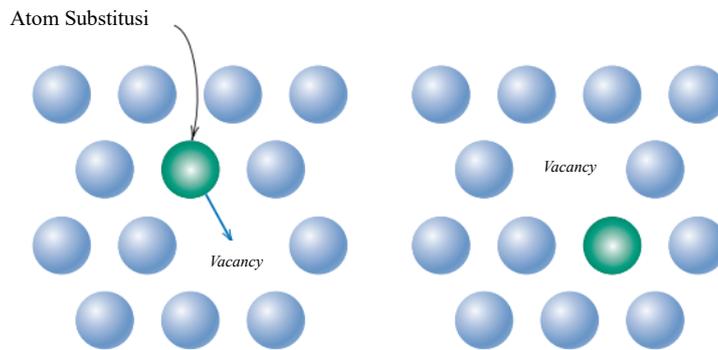
- b. Temperatur yang digunakan yaitu 350 hingga 600 °C
- c. Tekanan gas yang digunakan yaitu 50 hingga 500 Pa
- d. Konsumsi gas yang digunakan yaitu 20 l/h (skala laboratorium) hingga 1/h (skala industri)
- e. Waktu pemanasan yang digunakan yaitu 0,5 hingga 60 jam

#### 2.4 Mekanisme Difusi

Difusi merupakan proses perpindahan atom atau molekul dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi rendah yang terjadi karena adanya gerakan atom-atom tersebut. Gaya pendorong terjadinya proses difusi adalah gradien konsentrasi yaitu jumlah atom atau molekul yang terdapat di dalam sebuah komponen [16]. Difusi terbagi menjadi dua mekanisme yaitu:

- a. Difusi *Vacancy*

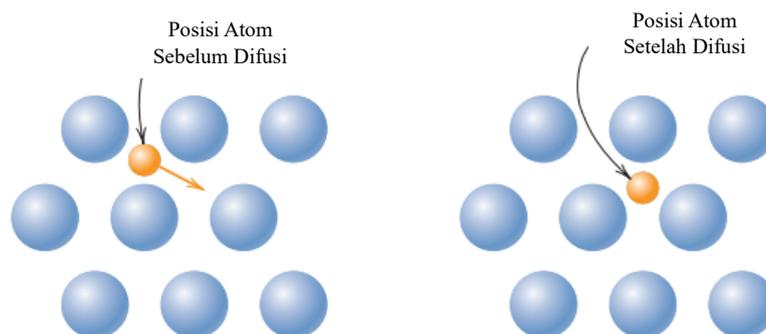
Difusi *vacancy* merupakan salah satu mekanisme perpindahan atom dalam material yang terjadi karena adanya kekosongan pada struktur atom. Kekosongan ini berperan sebagai jalur perpindahan bagi atom-atom yang berada di sekitarnya. Ketika material berada pada temperatur tinggi, energi termal yang dihasilkan menyebabkan atom-atom dalam struktur tersebut memperoleh energi kinetik yang cukup untuk bergerak. Akibatnya, atom-atom tersebut dapat berpindah dan mengisi kekosongan di antara atom tersebut [17].



**Gambar 2.5** Proses Difusi *Vacancy* [18]

b. Difusi *Intersisi*

Difusi *intersisi* merupakan mekanisme perpindahan atom yang terjadi akibat pergerakan atom-atom di dalam rongga pada struktur atom. Proses ini berlangsung ketika atom yang bergerak memiliki jari-jari yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan atom induk. Atom-atom yang berada dalam posisi intersisi tersebut bergerak ke dalam rongga yang terbentuk di antara atom-atom yang berukuran lebih besar [17].



**Gambar 2.6** Proses Difusi *Intersisi* [18]

Hukum pertama Fick menjelaskan mekanisme dasar dari proses difusi. Perpindahan massa suatu zat dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah akibat

adanya perbedaan konsentrasi. Hukum ini menyatakan bahwa laju aliran difusi berbanding lurus dengan perbedaan konsentrasi. Hukum Fick dirumuskan sebagai berikut

$$J = D \left( \frac{dC}{dx} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

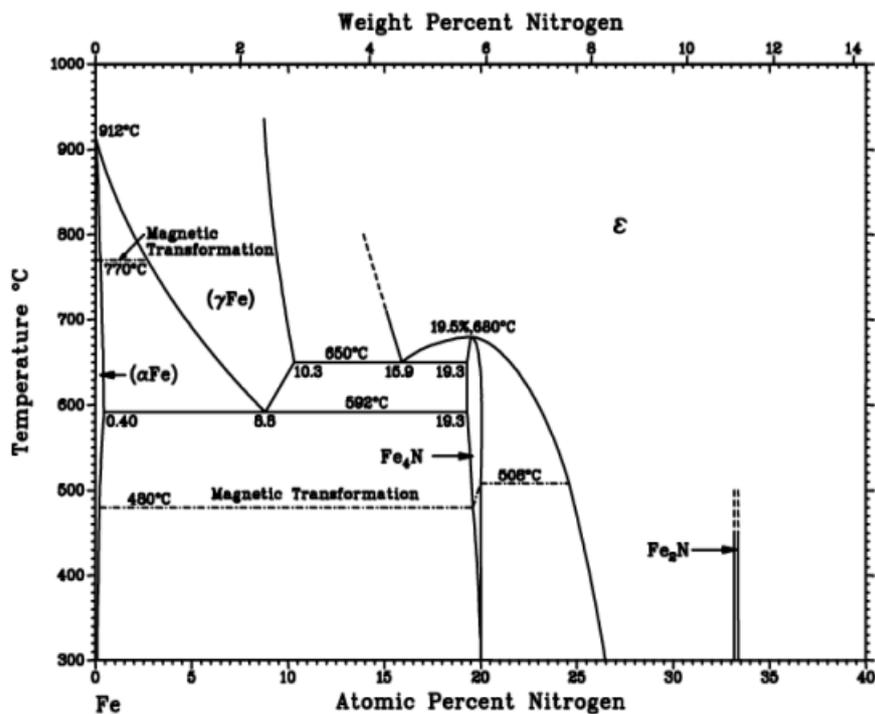
$J$  = aliran atom (jumlah atom)

$D$  = koefisien difusi (satuan luas)

$dC/dx$  = gradien konsentrasi

## 2.5 Definisi Diagram Fasa Fe-N

Berikut merupakan diagram Fasa Fe-N dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini



Gambar 2.7 Diagram Fasa Fe-N [19]

Diagram fasa Fe-N merupakan diagram yang menggambarkan hubungan antara temperatur, konsentrasi nitrogen, dan fasa-fasa yang terbentuk dalam paduan besi dan nitrogen. Diagram ini umumnya untuk mengetahui fenomena nitridasi yaitu proses difusi nitrogen ke dalam baja untuk membentuk senyawa nitrida yang meningkatkan sifat mekanik pada material. Didalam besi, atom nitrogen larut sebagai larutan padat interstisi. Kelarutan maksimum nitrogen dalam besi pada temperatur nitridasi 500-590 °C adalah 0,1 %, lebih besar dari 0,1 % maka akan membentuk nitrida  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Jika kelarutan nitrogen pada besi melebihi 6 %, nitrida  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) akan berubah menjadi  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ). Pada temperatur dibawah 500 °C dengan kadar nitrogen lebih dari 11 % maka nitrida ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ) akan segera terbentuk dan diatas 650 °C  $\text{Fe}_4\text{N}$  akan terurai. Nitrida  $\gamma'$  dan  $\epsilon$  secara fisik pada permukaan baja terlihat sebagai lapisan putih (*white layer*) atau *compound layer* [20].

## 2.6 Gas Nitrogen

Nitrogen merupakan suatu unsur kimia yang memiliki lambang N dan nomor atom 7. Gas nitrogen sering menjadi senyawa pokok dalam industri kimia. Nitrogen ialah salah satu senyawa inert sehingga cocok digunakan untuk berbagai aplikasi yang mencakup berbagai aspek pembuatan, pengolahan, penanganan, dan pengiriman bahan kimia. Salah satu gas alam ini memiliki sifat tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa pada temperatur dan tekanan standar. Dengan unsur yang paling melimpah di atmosfer bumi sekitar 78% dari total volume atmosfer, nitrogen menjadi gas dengan permintaan yang tinggi pada industri kimia dan terus

meningkat setiap tahunnya. Diantaranya negara-negara asia permintaan nitrogen indonesia yaitu sebesar 6% dari permintaan dunia [21].

Pengaplikasian gas nitrogen banyak digunakan di berbagai industri. Salah satunya industri kimia dan dalam pembuatan pupuk. Dalam industri metalurgi, nitrogen dapat digunakan dalam proses nitridasi dalam membuat kekuatan pada permukaan logam dengan menggunakan plasma. Selain digunakan dalam industri pupuk dan industri metalurgi, nitrogen juga digunakan dalam beberapa industri lainnya seperti industri pangan, elektronik, dan manufaktur.

**Tabel 2.1** Sifat Fisik Nitrogen

<b>Sifat</b>	<b>Nilai</b>
Rumus Kimia	N <sub>2</sub>
Berat Molekul	28,01
Densitas	0,072 lb/ft <sup>3</sup>
Temperatur Kritis	-232,4 °F
Tekanan Kritis	493 Psia
Titik Didih	-320,4 °F

## **2.7 Definisi Baja dan Klasifikasinya**

Baja merupakan material yang termasuk ke dalam logam paduan sebab memiliki perpaduan antara unsur dasar yaitu besi (Fe) dengan unsur paduan yaitu karbon (C). Dalam pembuatan baja, jumlah kandungan unsur paduan baja perlu diperhatikan, dalam hal ini agar perpaduan besi dengan karbon dapat disebut sebagai baja, maka karbon dalam baja harus berkisar antara 0,1% hingga 1,7%

disesuaikan dengan tingkatannya [22]. Tingkatan yang dimaksud adalah jenis baja berdasarkan tinggi rendahnya kandungan unsur karbon yang terkandung di dalamnya. Namun sebenarnya di dalam proses pembuatan baja terdapat unsur-unsur lain selain karbon, hal ini dikarenakan karbon sebagai unsur paduan utamanya, dan terdapat unsur paduan lainnya seperti mangan (Mn), silikon (Si), kromium (Cr), vanadium (V), dan unsur lainnya, sehingga dalam baja terdapat klasifikasi jenis baja tergantung komposisi kimianya, berikut ini penjelasannya [23]:

### **2.7.1 Macam-Macam Baja Karbon**

Terdapat tiga macam baja karbon jika ditinjau dari tinggi rendahnya kandungan karbonnya yaitu baja karbon tinggi, baja karbon sedang dan baja karbon rendah. Baja karbon rendah (*low carbon steel*) memiliki kandungan karbon berkisar antara 0,10 hingga 0,30 %, baja karbon rendah umumnya digunakan dalam bentuk plat baja, baja strip dan baja batangan atau profil. Baja karbon menengah (*medium carbon steel*) memiliki kandungan karbon berkisar antara 0,30% hingga 0,60%, baja karbon menengah umumnya digunakan dalam keperluan alat-alat perkakas bagian mesin dan berbagai keperluan lain seperti untuk keperluan industri kendaraan, roda gigi dan pegas. Terakhir, baja karbon tinggi (*high carbon steel*) memiliki kandungan karbon berkisar antara 0,60% hingga 1,7%, baja karbon tinggi umumnya digunakan untuk *material tools*, seperti alat-alat perkakas seperti pahat, palu, gergaji potong kemudian pegas dan juga pembuatan kawat baja dan kabel baja. Tinggi rendahnya kandungan karbon yang berbeda-beda

tersebut akan mempengaruhi sifat kekerasan yang berbeda-beda tergantung seberapa tinggi kandungan karbonnya, sebab semakin besar kandungan karbon di dalam baja, maka kekerasan baja akan meningkat [22].

### 2.7.2 Macam-Macam Baja Paduan

Baja paduan merupakan baja dengan lebih banyak unsur paduan yang sengaja ditambahkan dengan jumlah konsentrasi tertentu [24]. Melalui penambahan unsur-unsur seperti nikel (Ni), kromium (Cr), molibdenum (Mo), vanadium (V), tembaga (Cu) dan zirkonium (Zr), maka hadirnya baja paduan dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketahanan aus, ketahanan temperatur, ketahanan korosi, *machinability* dan *castability of irons* [25]. Baja paduan berdasarkan komposisi paduannya terbagi menjadi tiga jenis, yaitu [25]:

- 1 Baja paduan rendah (*low steel alloys*) dengan komposisi paduannya kurang dari 5%, dengan rincian 1,8% nikel, < 6% kromium, dan < 0,65% molibdenum dan memiliki rentang kekuatan tarik berkisar 450-620 N/mm - 2 sampai dengan 850-1000 N/mm.
- 2 Baja paduan sedang (*medium steel alloys*) dengan komposisi paduannya berkisar antara 5 hingga 12% umumnya digunakan untuk *structural work*, gandar atau *axles*, poros, contohnya baja nikel-molibdenum yang mampu dilakukan *case-hardened* sehingga mampu digunakan untuk *cams*, *camshafts*, *rolling bearing races* berkekuatan tinggi yang *fatigue resistance* yang baik.

- 3 Baja paduan tinggi (*high steel alloys*) dengan komposisi paduannya memiliki lebih dari 12% elemen paduan dengan rincian kandungan kromium 13-18% contohnya *stainless steel* yang memiliki ketahanan korosi yang baik, kemudian contoh lainnya adalah *austenitic steel* yang memiliki ketahanan aus yang tinggi dengan kandungan mangan 11%, serta beberapa jenis lainnya memiliki ketahanan panas dan kekuatan tinggi yang baik.

### 2.7.3 Unsur Paduan Baja

Dari penjelasan paduan baja sebelumnya, maka dapat diketahui bahwa setiap unsur paduan yang terkandung dalam sebuah baja paduan, memiliki fungsi dan hasil yang berbeda-beda. Berikut merupakan unsur baja paduan dan kegunaannya [25]:

1. Aluminium

Fungsinya sebagai *deoxidizer* untuk meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan kerak, sehingga membantu proses nitridasi, membatasi *grain growth*, namun dapat mengurangi kekuatan jika digunakan dalam jumlah besar. Maka dari itu kisaran kandungan yang digunakan adalah 0 hingga 2%.

2. Kromium

Fungsinya untuk meningkatkan ketahanan aus sebab kromium jika bergabung dengan karbon membentuk struktur mikro yang tahan aus., kemudian meningkatkan ketahanan oksidasi, ketahanan terhadap pembentukan kerak, kekuatan dan *hardenability*. Kemudian

kekuatannya meningkat temperatur tinggi, namun *ductility* berkurang, sehingga kisaran kandungan yang digunakan adalah 0,3 hingga 4%.

### 3. Kobalt

Fungsinya untuk memberikan pengerasan udara dan ketahanan terhadap kerak, sehingga meningkatkan *cutting properties* pada baja perkakas. Kisaran kandungan yang digunakan adalah 8 hingga 10%.

### 4. Tembaga

Fungsinya untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan kekuatan luluh baja paduan rendah serta memberikan keuletan pada film oksida. Kisaran kandungan yang digunakan adalah 0,2-0,5%.

### 5. Timbal

Fungsinya untuk meningkatkan *machinability* dalam baja karbon biasa dibandingkan baja paduan. Kisaran kandungan yang digunakan hingga 0,25%.

### 6. Mangan

Fungsinya untuk mengurangi kerapuhan belerang. Kisaran yang digunakan adalah 0,3 hingga 2%. Dengan rincian jika ingin mengurangi *sulphur brittleness* maka digunakan kandungan hingga 2%, jika digunakan sebagai *agent hardening* maka digunakan kandungan hingga 1% dan untuk meningkatkan kekuatan maka digunakan kandungan dari 1 hingga 2%.

#### 7. Nikel

Fungsinya untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan dan pengerasan tanpa mempengaruhi keuletan bahkan dapat meningkatkan ketahanan korosi. Kisaran kandungan yang digunakan adalah 0,3 hingga 5%.

#### 8. Silikon

Fungsinya untuk meningkatkan kekuatan dan pengerasan namun dapat mengurangi keuletan. Kisaran kandungan yang digunakan adalah 0,2 hingga 3%.

#### 9. Sulfur

Fungsinya untuk memperbaiki *machinability* namun dapat mengurangi keuletan dan kemampuan las. Kisaran kandungan yang digunakan hingga 0,5%.

#### 10. Titanium

Fungsinya sebagai elemen pembentuk karbida yang kuat sehingga dapat digunakan dalam penguatan presipitasi (pengerasan umur) dan meningkatkan kekuatan, kisaran kandungan yang digunakan adalah 0,2 hingga 0,75%.

#### 11. Tungsten

Fungsinya untuk membentuk karbida yang keras dan stabil dan menghasilkan *grain refining* dengan kekerasan dan ketangguhan tinggi. Sehingga pengaplikasiannya dalam *high speed tool steels*.

## 2.8 Spesifikasi Baja AISI D2

Baja AISI D2 merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon dan kromium yang tinggi. Dengan komposisi tersebut, baja ini memiliki kekuatan dan daya tahan yang unggul. Baja ini menjadi pilihan yang tepat untuk banyak aplikasi karena tahan terhadap korosi. Material baja yang termasuk baja perkakas ini banyak diproduksi di Asia dan Eropa [26]. Berikut merupakan komposisi kimia baja AISI D2:

**Tabel 2.2** Komposisi Kimia Baja AISI D2 [27]

AISI	Komposisi (wt%)						
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo
D2	1.4 –	0.1 –	0.1 –	11 –	0.03 -	0.03 -	0.7 –
	1.6	0.6	0.6	13	max	max	1.2

Pada baja AISI D2 yang termasuk baja perkakas sering digunakan secara ekstensif dalam berbagai operasi permesinan dan manufaktur. Baja ini memiliki kemampuan untuk mempertahankan sifat mekanik yang diinginkan untuk mengatasi berbagai macam temperatur. Dengan memiliki sifat mekanik yang baik baja ini memiliki beberapa aplikasi industri seperti membentuk *die* atau *cold stamping*, *chipper knife*, *shear blade*, *punch* dan *stamping tools* [28].

## 2.9 Pengaplikasian *Software* ANSYS

ANSYS merupakan lunak yang digunakan sebagai simulasi teknik dan desain 2D maupun 3D. *Software* ini banyak digunakan dalam konteks ilmiah industri untuk mencari tahu informasi mengenai hal yang akan disimulasikan. Dengan melakukan simulasi dapat merepresentasikan suatu proses dengan cara menggunakan model

tertentu untuk memaksimalkan produksi dan mengurangi resiko-resiko dan biaya yang mahal. ANSYS dapat diaplikasikan sebagai analisis elemen hingga struktur hingga permasalahan fluida seperti analisis struktural, dinamika fluida, dan elektromagnetik [29]. Berikut beberapa sistem analisis yang disediakan oleh ANSYS sebagai berikut [30]:

- a. *Static analysis* merupakan jenis analisis yang dapat menentukan perpindahan, tekanan, regangan, dan gaya pada komponen yang disebabkan oleh beban yang tidak menyebabkan efek inersia.
- b. *Transient analysis* merupakan jenis analisis yang menghubungkan perilaku suatu objek yang bergantung dari sistem atau struktur fisik.
- c. *Mode frequency analysis* merupakan jenis analisis yang berfungsi menentukan *natural frequency* dan bentuk mode suatu struktur.
- d. *Harmonic response analysis* merupakan jenis analisis yang digunakan untuk menentukan respon *steady state* dari struktur yang mengalami beban yang sinusidal dengan waktu yang berbeda dari analisis dinamis transien.
- e. *Buckling analysis* merupakan jenis analisis yang digunakan sebagai prediksi titik struktur menjadi tidak stabil dan mulai berubah bentuk di bawah beban tekan.
- f. *Fluid structure interaction (FSI)* merupakan jenis analisis yang digunakan untuk interaksi antara fluida dengan sebuah struktur.
- g. *Multiphase flow* merupakan jenis analisis yang digunakan untuk membuat simulasi dan analisis aliran multifase yang kompleks yang meliputi sebuah aliran.

Salah satu sistem analisis yang dapat digunakan pada ANSYS yaitu *computational fluid dynamics* (CFD). *Computational fluid dynamics* merupakan analisa dari sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait seperti reaksi kimia melalui melalui simulasi berbasis komputer. Teknik ini sangat kuat dan mencakup berbagai bidang aplikasi industri dan *non* industri [31].

## **2.10 Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD)**

*Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan sebuah analisis yang melibatkan aliran fluida, perpindahan energi, panas, momentum, dan fenomena fluida lainnya berbasis dengan *software* ANSYS. Metode ini dapat melakukan eksperimen yang berupa simulasi dengan menerapkan sistem dan kondisi nyata dengan tujuan meminimalisir kejadian yang tidak diinginkan dan mengurangi *cost* dalam percobaan. Dalam penggunaan CFD memerlukan pengetahuan dan pemahaman dasar mekanika fluida untuk diterapkan dalam menjalankan simulasi [31].

Sejak tahun 1960 dan seterusnya, industri kedirgantaraan telah menggunakan metode CFD ke dalam desain, penelitian, pengembangan, dan pembuatan pesawat terbang dan mesin jet. Baru-baru ini metode ini telah diterapkan pada desain mesin pembakaran, ruang bakar turbin gas dan tungku. CFD menjadi komponen penting dalam desain produk dan proses industri. Proses CFD menerapkan perhitungan yang dikhususkan pada fluida beserta perilakunya, mulai dari aliran fluida, *heat transfer* dan reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Prinsip-prinsip dasar mekanika

fluida, konservasi energi, momentum dan hukum kekekalan massa perhitungan CFD dapat dilakukan [32].

Simulasi CFD dilakukan melalui tiga tahapan yaitu *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*. *Preprocessing* merupakan pembuatan model obyek penelitian dengan format *Computer Aided Design (CAD)*, membuat *mesh* sesuai desain, kemudian menerapkan kondisi batas dan sifat fluidanya. *Solvers* merupakan program inti untuk mencari solusi dengan menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat *preprocessing*. *Postprocessing* merupakan tahap terakhir dalam analisis CFD yang dilakukan pada tahap ini yaitu menghasilkan data hasil simulasi CFD berupa gambar, grafik, atau animasi [33]. Dalam penyelesaian CFD memiliki beberapa algoritma sebagai proses *solving*. Berikut beberapa algoritma yang dapat digunakan seperti [34]:

a. SIMPLE

Metode SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) adalah algoritma yang dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida dengan mengaitkan hubungan antara tekanan dan kecepatan dalam persamaan Navier-Stokes. Metode ini menggunakan proses iteratif untuk mengestimasi nilai tekanan dan kecepatan pada setiap tahapan sampai mencapai konvergensi. Tahapan dalam metode SIMPLE mencakup penentuan nilai awal tekanan, penghitungan kecepatan sementara, penyesuaian tekanan, penyesuaian kecepatan, dan pengulangan proses iterasi.

b. SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*)

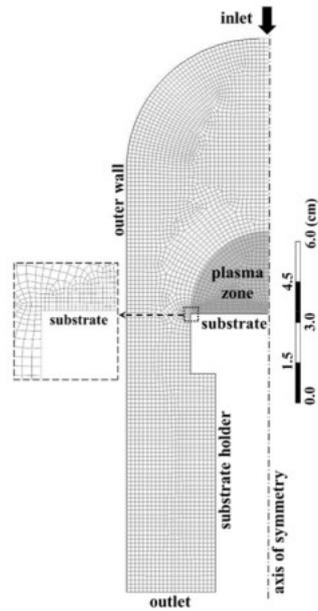
Metode SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*) adalah penyempurnaan dari metode SIMPLE yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses iterasi. Metode ini menerapkan modifikasi pada tahapan penyesuaian tekanan dan kecepatan untuk menurunkan tingkat keterkaitan antar variabel, sehingga mempercepat konvergensi solusi. Metode SIMPLEC sangat sesuai diterapkan pada kasus aliran fluida berkecepatan tinggi atau permasalahan yang membutuhkan penyelesaian lebih cepat dibandingkan dengan metode SIMPLE.

c. COUPLED

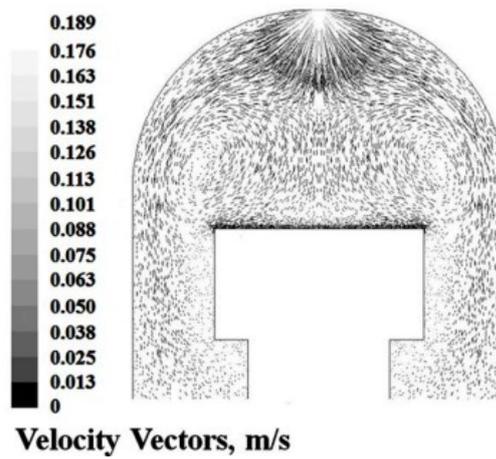
Metode COUPLED atau Algoritma Kopel adalah metode yang menyelesaikan persamaan momentum dan kontinuitas secara bersamaan dalam satu sistem persamaan aljabar. Penyelesaian ini memungkinkan metode COUPLED untuk mengatasi keterkaitan yang kuat antara kecepatan dan tekanan dalam aliran fluida kompresibel atau pada kasus yang memiliki interaksi antar variabel yang intensif. Dengan pendekatan penyelesaian persamaan secara simultan, metode COUPLED menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dan stabilitas yang lebih baik untuk berbagai kondisi aliran kompleks.

Penelitian tentang simulasi CFD pada proses plasma nitridasi dengan menggunakan gas berupa asetilena yang masuk ke dalam reaktor melalui *inlet*. Gas terbagi menjadi dua komponen, di mana salah satu mengalir ke saluran keluar dan yang lainnya mengalir ke substrat. Pada permukaan atas substrat, gas mengalir dari pusat ke tepi substrat sehingga temperatur pada bagian tengah substrat cenderung

lebih tinggi. Dapat dilihat pada Gambar 2.5 terdapat inlet sebagai tempat gas masuk dan Gambar 2.6 penyebaran gas yang terjadi pada *chamber*.



**Gambar 2.8** Skematik Simulasi Gas Masuk [35]



**Gambar 2.9** Vektor Kecepatan Distribusi Gas di Sekitar Substrat [36]

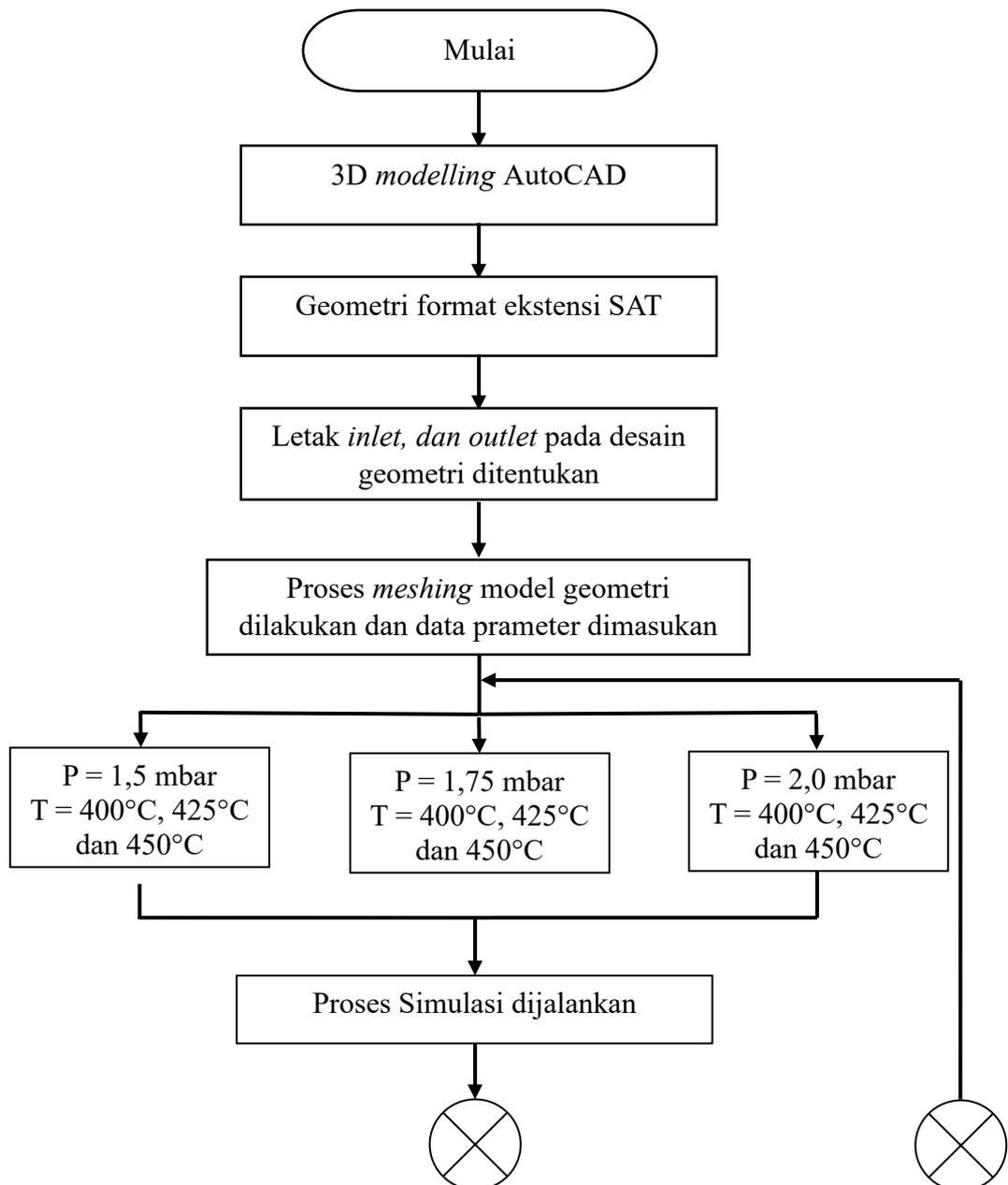
# BAB III

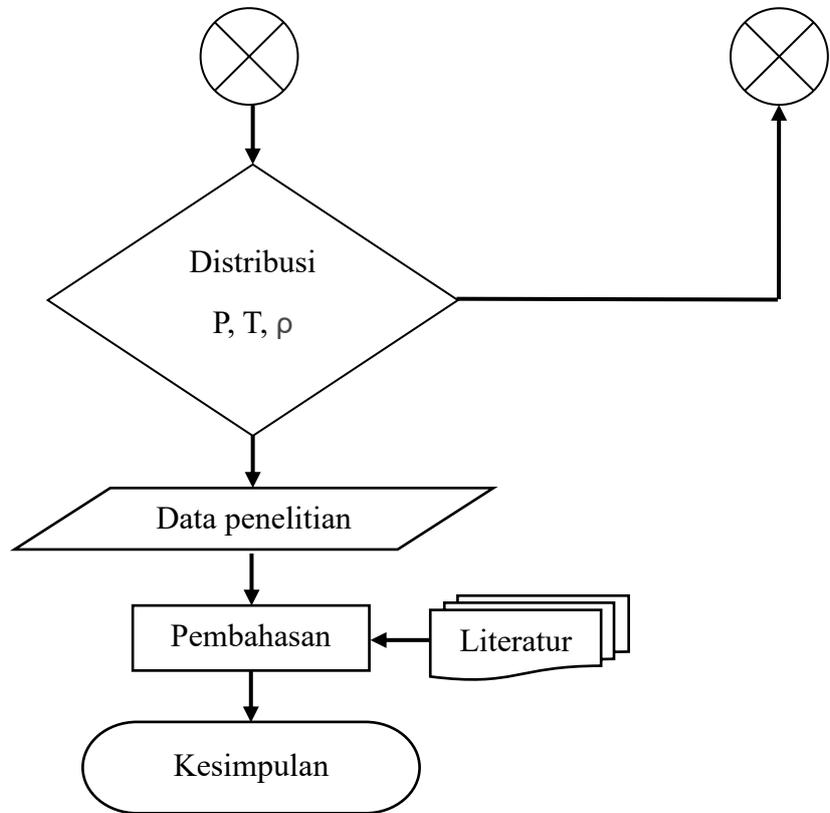
## METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

#### 3.1.1 Diagram Alir Simulasi Proses

Berikut merupakan diagram alir simulasi proses pada penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3. 1 sebagai berikut

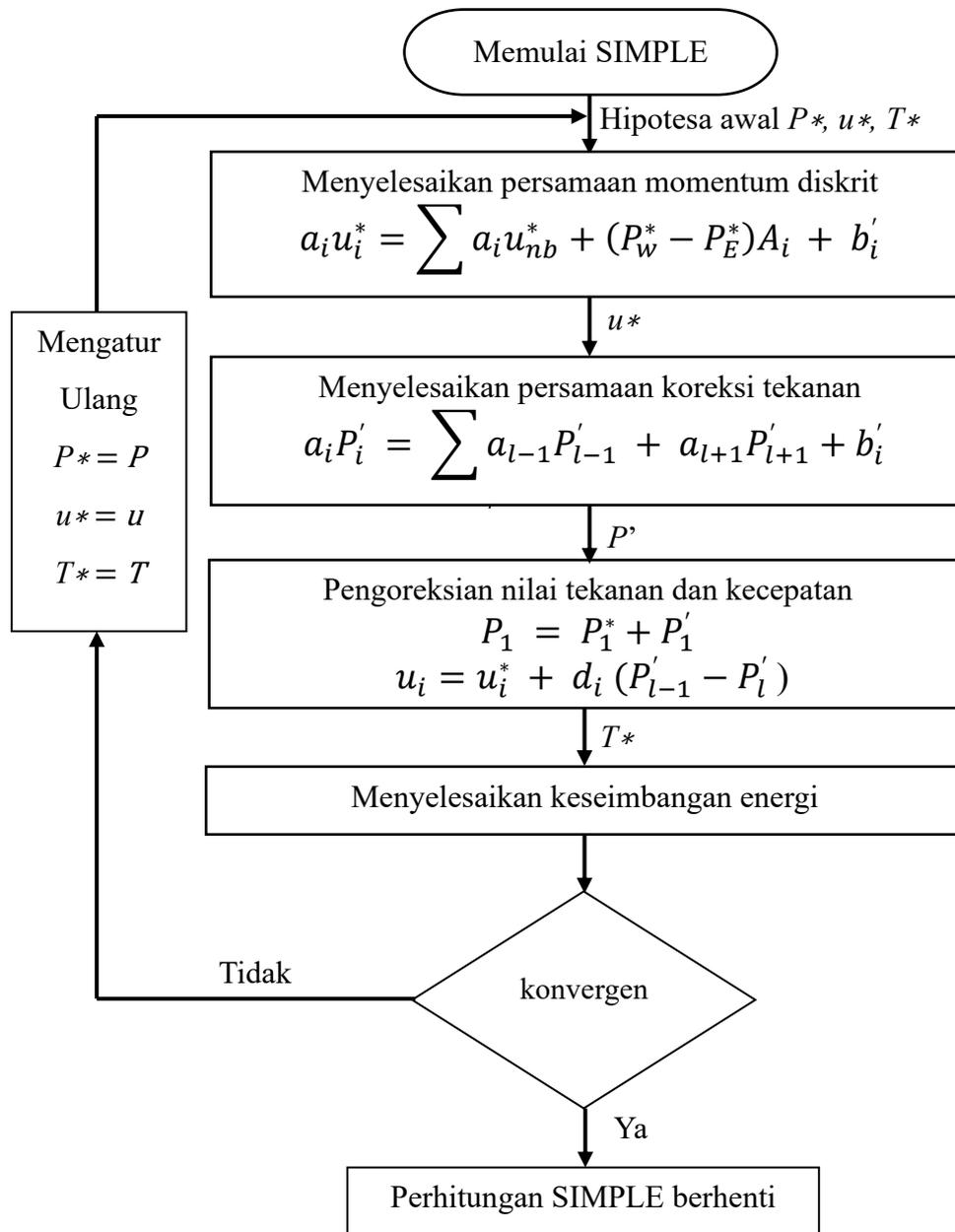




**Gambar 3.1** Diagram Alir Simulasi Proses

### 3.1.2 Algoritma Simulasi CFD

Dalam *simulasi computational fluid dynamics* (CFD) dapat menggunakan *semi implicit method for pressure linked equations* (SIMPLE) sebagai pemecahan masalah simulasi aliran fluida. Berikut merupakan algoritma SIMPLE pada simulasi CFD yang digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 3.2** Algoritma Simulasi

### 3.2 Alat yang digunakan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. *Software* Autodesk AutoCAD
- b. *Software* ANSYS Versi R2 2024

### 3.3 Model Matematika Simulasi

Simulasi CFD untuk proses plasma nitridasi memerlukan berbagai permodelan yang mencakup dinamika gas, perpindahan panas, perpindahan massa. Aspek dinamika aliran gas dalam ruang proses dapat dijelaskan melalui persamaan (1) yang membahas hukum kekekalan massa dan persamaan (2) yang menjabarkan persamaan Navier Stokes untuk aliran laminar pada kondisi *steady state* [37]:

$$\Delta(\rho V) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta(\rho V u_i) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \nabla(\mu \nabla u_i) \dots\dots\dots(2)$$

Dalam persamaan tersebut, terdapat beberapa variabel yaitu  $\rho$  yang menunjukkan densitas,  $V$  yang mempresentasikan vektor kecepatan, dan  $\mu$  merupakan simbol viskositas kinetik. Persamaan perpindahan panas dapat dituliskan sebagai berikut

$$\Delta(\rho V h_0) = \nabla(k_{eff} \nabla T) S_h \dots\dots\dots(3)$$

Dalam persamaan tersebut, terdapat beberapa parameter yaitu  $h_0$  yang menunjukkan entalpi,  $k_{eff}$  yang menunjukkan konduktivitas termal,  $T$  yang menunjukkan temperatur dan  $S_h$  yang menunjukkan sumber panas akibat reaksi kimia. Model plasma yang terhubung secara kapasitif didasarkan pada persamaan distribusi energi elektron mengikuti hukum Maxwellian. Berdasarkan hal tersebut, keseimbangan elektron dapat dituliskan sebagai berikut

$$\nabla T_e = S \dots\dots\dots(4)$$

Dalam persamaan ini,  $T_e$  menunjukkan fluks elektron,  $S$  menunjukkan sumber elektron yang dihasilkan dari reaksi kimia. Adapun keseimbangan energi yang terjadi pada plasma dapat dituliskan sebagai berikut

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

Dalam persamaan ini,  $T_e$  menunjukkan temperatur elektron, sedangkan  $\chi$  merupakan konstanta termodifusi elektron, lalu  $P$  merupakan daya yang teradsorpsi pada plasma,  $P_c$  merupakan besaran energi yang hilang akibat reaksi tumbukan elektron. Distribusi spasial dari potensial elektrostatik dijelaskan melalui persamaan Poisson yang dituliskan sebagai berikut

$$-\nabla \cdot \epsilon_r \nabla \varphi = e(\sum_i q_i n_i - n_e) \dots\dots\dots(6)$$

Dalam persamaan ini  $\epsilon_r$  merupakan permisivitas listrik relatif,  $q_i$  merupakan muatan ion,  $\varphi$  merupakan fluks elektrik,  $n_i$  merupakan densitas ion,  $e$  merupakan muatan listrik partikel,  $n_e$  merupakan densitas elektron. Model persamaan perpindahan massa untuk partikel pada sumbu  $i$  dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i) = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} J_{ij} + M_i \omega_i \dots\dots\dots(7)$$

Dalam persamaan ini  $u_j$  merupakan proyeksi vektor kecepatan pada sumbu  $j$  atau sumbu  $y$  pada koordinat kartesius,  $Y_i$  merupakan fraksi massa partikel pada sumbu  $i$ ,  $J_{ij}$  merupakan proyeksi vektor fluks difusi pada sumbu  $j$ ,  $M_i$  merupakan massa molar partikel pada sumbu  $i$  dan  $\omega_i$  merupakan besaran laju reaksi.

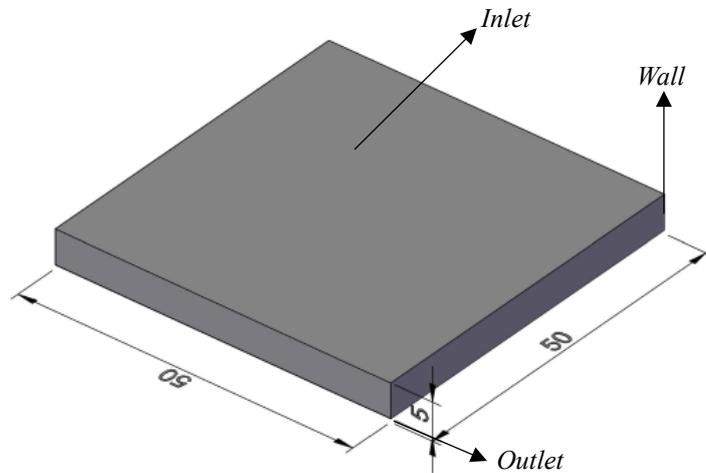
### 3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur percobaan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada uraian berikut

#### 3.4.1 Pembuatan Geometri *Substrat* Dengan AutoCAD

Dalam melakukan suatu simulasi *computational fluid dynamics* diperlukan beberapa komponen pendukung untuk menjalankannya, salah

satunya yaitu geometri. Geometri dibuat dengan AutoCAD dengan fitur 3D *modelling* untuk geometri *substrat*. Pada Gambar 3.3 yaitu tahap pertama membuat geometri *substrat* menggunakan AutoCAD dengan *workspace* 2D *drafting* beserta spesifikasinya. Dengan fitur ini, *workspace* akan menampilkan banyak *tools* untuk perintah 2D. Langkah kedua sebelum menggambar yaitu mengubah unit *scale* menjadi milimeter. Lalu mengubah *workspace* 2D *drafting* menjadi 3D *modelling*. Dengan fitur ini, *workspace* akan menampilkan banyak *tools* untuk 3D *modelling*. Langkah selanjutnya yaitu mengubah unit *scale* menjadi milimeter. Setelah dilakukan tahap persiapan tersebut, dilanjutkan dengan menggambar *substrat* dengan panjang 50 x 50 mm dan tebal 5 mm yang dapat dilihat pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Dimensi Geometri Sampel

Setelah masing-masing geometri telah dibuat, kemudian diekspor ke dalam format *standard ACIS test* (SAT). SAT merupakan format file yang digunakan dalam sistem *computer aided design* (CAD) untuk mewakili

model geometri. Ektensi SAT ini merupakan ekstensi yang didukung oleh ANSYS Workbench sebagai geometri dalam simulasi.

### 3.4.2 Parameter Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Tahap selanjutnya yaitu membuka ANSYS *Workbench* dan membuat analisis terhadap geometri yang telah dibuat. Proses *meshing* merupakan tahap untuk membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil. Mesh yang baik harus memiliki elemen yang cukup kecil untuk menangkap detail geometri dan perilaku fisik sistem. Pada proses *meshing* yang akan dilakukan kontak dan interaksi antara geometri serta memasukan parameter yang ditentukan. Parameter yang digunakan yaitu variabel simulasi seperti temperatur pemanasan gas, kecepatan aliran gas, dan tekanan gas. Berikut merupakan parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

**Tabel 3.1** Data Parameter Simulasi CFD

<b>Parameter</b>	<b>Keterangan</b>
Temperatur Pemanasan Gas	400°C, 425 °C, dan 450°C
Tekanan Gas	1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2 mbar
Kecepatan Aliran Masuk Gas	15 m/detik
Jenis Gas	Nitrogen (N <sub>2</sub> )
Gravitasi	9,8 m/detik <sup>2</sup>
Kondisi Gas	<i>Real Gas</i> (Redlich-Kwong)
Tingkat Mesh	<i>Fine, adaptive mesh</i>
<i>Energy Equation</i>	<i>On</i>
Inisialisasi ( <i>initializitaion</i> )	<i>Hybrid initialization</i>

**Tabel 3.2** Data Parameter Model Gas Nitrogen

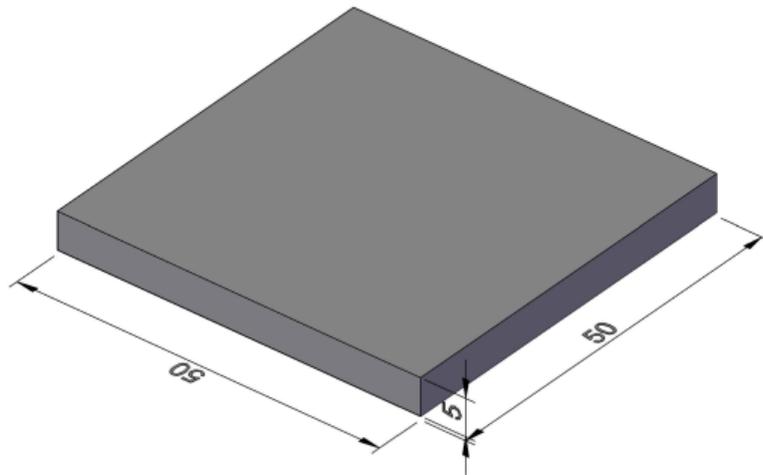
<b>Parameter</b>	<b>Keterangan</b>
Densitas ( <i>real gas</i> )	0,001145 g/m <sup>3</sup>
Konduktivitas Termal	0,0242 W/m. °C
Kapasitas Panas	1040 J/Kg. °C
Berat Molekul	28,02 g/mol
Temperatur Kritis	-146,95 °C

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Penelitian

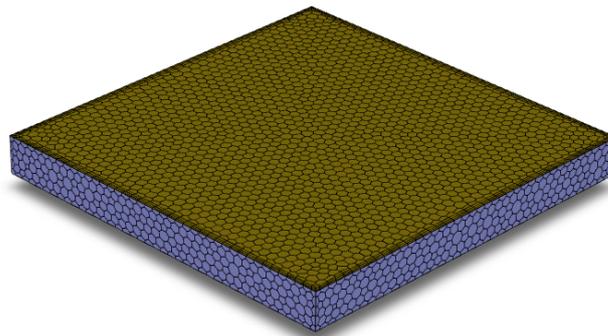
Pada penelitian yang dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* ANSYS *fluent* versi 2024. Sebelum dilakukannya simulasi, model geometri 3D dari substrat dibuat menggunakan AutoCAD. Geometri baja yang dimodelkan memiliki ukuran dengan panjang dan lebar yang sama yaitu 50 mm x 50 mm dan tinggi 5 mm. Baja yang telah dibuat geometri menggunakan AutoCAD, kemudian dikonversi ke dalam format *standart ACIS text* (SAT) dan diimpor ke dalam ANSYS. Model kemudian ditentukan bagian *inlet*, *outlet*, dan *wall* yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Sampel yang akan disimulasikan yaitu menggunakan baja AISI D2. Berikut merupakan gambar spesimen dengan dimensi ukuran yang telah ditentukan dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Geometri Baja AISI D2

Geometri baja AISI D2 yang telah didesain kemudian dilanjutkan dengan proses *meshing* yang bertujuan untuk membantu mendapatkan hasil simulasi yang lebih akurat. *Meshing* dalam ANSYS *Fluent* merupakan sebuah tahap yang krusial dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pada proses *meshing*, geometri dibagi menjadi subdomain kecil yang disebut sel atau element. Sel-sel yang terbentuk pada geometri membentuk *grid* atau *mesh* yang mencakup seluruh area model. Kualitas mesh memiliki dampak yang signifikan terhadap akurasi hasil simulasi.

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



**Gambar 4.2** Hasil *Meshing* Baja AISI D2

*Meshing* merupakan tahap penting pada proses simulasi seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Proses ini dilakukan sebelum menjalankan proses simulasi yang berfungsi untuk membagi wilayah menjadi bagian kecil yang terpisah-pisah, sehingga mendapatkan hasil yang lebih akurat. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat *mesh* terdiri dari 93.921 *node*, 42.437 *edge*, 115.157 *face*, dan 20.252 *cell*, yang menunjukkan tingkat kompleksitas tinggi. Elemen yang digunakan sebagian besar

berbentuk *hexahedral*, dipilih karena dalam elemen *hexahedral* bentuk *mesh* yang halus dan terstruktur sehingga dapat membantu menggambarkan distribusi aliran fluida dengan stabilitas yang baik.

Proses *meshing* ini juga mencakup *boundary layer zone* dengan 23.349 *boundary node*, 8.340 *boundary face*, dan 3 *boundary face zones* untuk menangkap efek viskositas yang signifikan di dekat permukaan dinding. Kepadatan elemen diatur sedemikian rupa untuk meningkatkan resolusi di area permukaan. Analisis konektivitas *boundary* dilakukan untuk memastikan kontinuitas domain dan akurasi simulasi. Dengan konfigurasi ini, model diharapkan mampu menghasilkan prediksi aliran fluida dan perpindahan panas yang akurat. Model yang telah dilakukan proses *meshing* kemudian dimasukkan parameter simulasi seperti area *inlet*, *outlet*, dan *wall*. Berikut merupakan data hasil simulasi yang didapatkan dengan menunjukkan perbedaan tekanan dan temperatur yang digunakan

**Tabel 4.1** Data Hasil Simulasi Pengaruh Temperatur Terhadap Kecepatan Aliran dan Densitas

Temperatur					
400 °C		425 °C		450 °C	
Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )
19,86	0,774	20,21	0,7341	20,56	0,7239
17,87	0,721	18,19	0,7097	18,51	0,6987
15,89	0,6973	16,16	0,6852	16,45	0,6736
13,9	0,6736	14,14	0,6607	14,39	0,6485

Temperatur					
400 °C		425 °C		450 °C	
Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )
11,91	0,6498	12,12	0,6362	12,34	0,6233
9,938	0,6261	10,1	0,6118	10,28	0,5982
7,943	0,6024	9,082	0,5873	8,225	0,573
5,957	0,5787	6,062	0,5628	6,169	0,5479
3,971	0,555	4,041	0,5384	4,113	0,52228
1,985	0,5313	2,021	0,5139	2,056	0,4976
0	0,5076	0	0,4894	0	0,4725

**Tabel 4.2** Data Hasil Simulasi Pengaruh Tekanan Terhadap Kecepatan Aliran dan Densitas

Tekanan					
1,5 mbar		1,75 mbar		2,0 mbar	
Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kecepatan Aliran (m/s)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )
14,54	0,7934	17,79	0,7551	20,56	0,7239
13,08	0,7713	16,01	0,7268	18,51	0,6987
11,63	0,7292	14,23	0,6985	16,45	0,6736
10,18	0,6971	12,45	0,6703	14,39	0,6485
8,723	0,665	10,67	0,642	12,34	0,6233

7,269	0,6329	8,896	0,6138	10,28	0,5982
5,815	0,6008	7,117	0,5855	8,225	0,573
4,361	0,5687	5,337	0,5573	6,169	0,5479
2,908	0,5366	3,558	0,529	4,113	0,5228
1,454	0,5045	1,779	0,5007	2,056	0,4976
0	0,5076	0	0,4894	0	0,4725

**Tabel 4.3** Data Hasil Simulasi Pengaruh Tekanan Terhadap Temperatur

Tekanan		
1,5 mbar	1,75 mbar	2,0 mbar
Temperatur (°C)	Temperatur (°C)	Temperatur (°C)
450,04	450,04	450,04
418,8	415,26	415,23
387,55	380,48	380,41
356,3	345,71	345,59
325,06	310,93	310,77
293,81	275,15	275,96
262,57	241,15	241,14
231,32	206,37	206,32
200,07	171,81	171,51
168,83	136,03	136,69
137,58	102,25	101,89

**Tabel 4.4** Data Hasil Simulasi Profil Temperatur

Tebal Sampel (mm)	Tekanan		
	1,5 mbar	1,75 mbar	2,0 mbar
5	400,04	400,04	400,04
4,5	372,1	382,32	393,03
4	334,15	344,61	366,01
3,5	306,2	316,89	348,99
3	268,28	289,17	301,97
2,5	263,31	271,45	284,96
2	230,37	249,74	267,94
1,5	200,42	206,02	210,92
1	166,47	178,3	193,91
0,5	152,53	160,58	176,89
0	120,58	122,86	120,87

#### 4.2 Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Gas

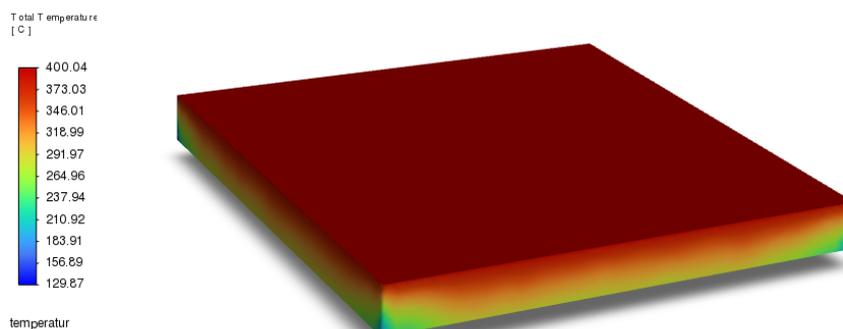
Simulasi pada model geometri 3D dari baja AISI D2 ini akan diberikan beberapa data parameter tetap serta variabel terikat. Pada hasil simulasi bagian pertama ini menganalisis penggunaan dua nilai temperatur selama proses plasma nitridasi berlangsung dengan menggunakan temperatur 400 °C, 425 °C, dan 450 °C dengan menggunakan jenis gas yang sama yaitu gas nitrogen. Masing-masing temperatur akan diinjeksikan pada baja dengan kecepatan 15 m/s dan tekanan gas yang diberikan pada permukaan baja sebesar 2,0 mbar (200 Pa). Simulasi

dilakukan dengan mengaktifkan *energy equation* untuk memungkinkan mengatur parameter terkait energi atau perpindahan panas pada model. Pada proses simulasi dengan kedua variabel temperatur menggunakan metode *hybrid initialization* yaitu metode inisialisasi komputasi untuk mengetahui hasil variabel seperti tekanan, temperatur, dan kecepatan dengan persamaan yang telah ditentukan.

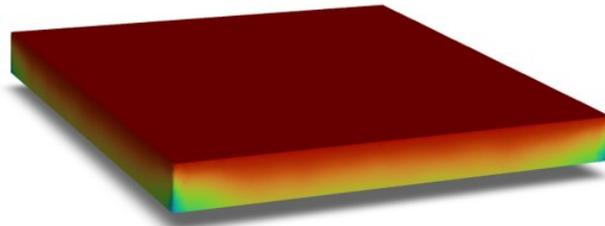
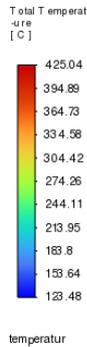
Simulasi dijalankan dengan iterasi maksimal sebanyak 200 kali. Dengan iterasi tersebut, persamaan yang sama akan dilakukan pada nilai batas yang berbeda sebanyak maksimal 200 kali sehingga akan memberikan hasil berupa solusi penyelesaian yang lebih baik. Proses *hybrid initialization* sering kali mengalami kendala dalam mencapai kondisi konvergen. Ketidakmampuan ini terjadi ketika terdapat perubahan signifikan terhadap berbagai variabel selama *solver* menjalankan banyak iterasi dalam mencari solusi. Salah satu faktor yang mempengaruhi sulitnya mencapai konvergensi yaitu kualitas proses *meshing*. Oleh karena itu, dalam simulasi ini diterapkan teknik *adaptive meshing* terlebih dahulu yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas elemen *mesh* dan memastikan hasil yang optimal.

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT

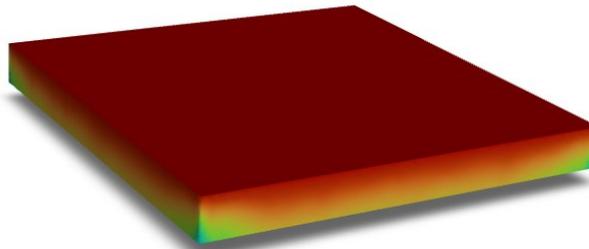
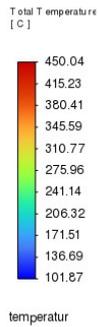
(a)



(b)



(c)



**Gambar 4.3** Hasil Distribusi Temperatur Pada Temperatur (a) 400 °C,  
(b) 425 °C dan (c) 450 °C

Hasil Simulasi pertama dengan temperatur pemanasan 400 °C, 425 °C dan 450 °C ditunjukkan pada Gambar 4.3 Berdasarkan ilustrasi tersebut, dapat dilihat bahwa distribusi temperatur pada kedua variabel temperatur yang digunakan terlihat sama, tetapi berbeda jika melihat keterangan warna yang disajikan. Terjadinya perubahan warna pada setiap titik di dalam sampel disebabkan oleh

konduktivitas termal ion pada bagian sampel bergantung pada ion yang terkonsentrasi. Ion yang terkonsentrasi pada suatu area akan mudah temperaturnya untuk naik sehingga warna pada setiap titik di bagian baja berbeda-beda.

Pada temperatur 400 °C distribusi temperatur terlihat merata dengan nilai maksimum sebesar 400,04 °C. Temperatur tersebut berada pada permukaan material, sementara area tepi menunjukkan penurunan hingga 129,87 °C. Perubahan gradien warna ini menunjukkan bahwa energi termal yang rendah menghambat pergerakan partikel ion nitrogen ke dalam material, mengurangi efektifitas difusi nitrogen pada area dengan temperatur yang lebih rendah.

Pada temperatur 425 °C distribusi temperatur mendapatkan hasil dengan nilai maksimum yaitu 425,04 °C yang berada pada permukaan sampel. Temperatur terus menurun seiring dengan ketebalan sampel yaitu menunjukkan nilai penurunan hingga 123,48 °C. Perubahan tersebut menunjukkan hasil yang tidak terlalu signifikan berdasarkan nilai penurunan temperatur seperti pada temperatur 400 °C.

Pada temperatur 450 °C distribusi temperatur lebih luas dan merata dengan nilai maksimum sebesar 450,04 °C. Pada kondisi ini, perbedaan temperatur di antara permukaan dan area tepi material menjadi lebih signifikan dengan ditunjukkan oleh nilai minimum yang lebih rendah yaitu 101,87 °C . Peningkatan temperatur ini memperkuat proses *thermal diffusion*, di mana pada ion nitrogen meningkat seiring bertambahnya temperatur. Energi kinetik yang lebih tinggi pada temperatur ini memperkuat proses difusi, ion nitrogen dapat bergerak lebih cepat dan membuat temperatur lebih merata pada material. Proses ini sesuai dengan hukum *fourier*

yaitu peningkatan gradien temperatur mempercepat laju aliran panas yang mendukung pergerakan partikel gas.

### 4.3 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Alir Gas

Perbedaan penggunaan temperatur pada permukaan sampel ini tidak hanya mempengaruhi pada peningkatan atau penurunan temperatur sampel, tetapi juga mempengaruhi berbagai aspek lain yang terjadi selama proses berlangsung. Salah satu aspek yang mengalami perubahan adalah gas yang diinjeksikan ke dalam reaktor. Gas yang diinjeksikan akan mengalami perubahan laju alir selama difusi berlangsung karena adanya perubahan temperatur pada gas. Hal ini berlaku prinsip persamaan Bernoulli yang merupakan konsep utama dalam dinamika fluida yang menghubungkan tekanan, kecepatan, dan ketinggian. Prinsip ini menyatakan bahwa peningkatan kecepatan fluida akan diikuti dengan penurunan tekanan atau energi potensial. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan kekekalan energi ketika kecepatan fluida meningkat, sebagian energi tekanan akan dikonversi menjadi energi kinetik untuk mempertahankan keseimbangan energi total. Prinsip Bernoulli dalam simulasi ini berjalan beriringan dengan persamaan kontinuitas yang dituliskan sebagai persamaan berikut.

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

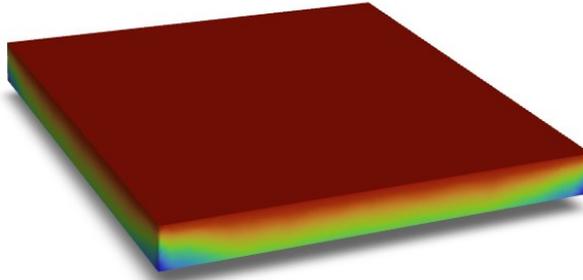
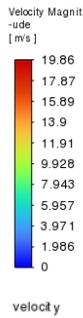
$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots(2)$$

Di mana  $P$  adalah tekanan gas,  $\rho$  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 pada titik pertama, dan  $A_2$  lebar atau diameter pada titik kedua.

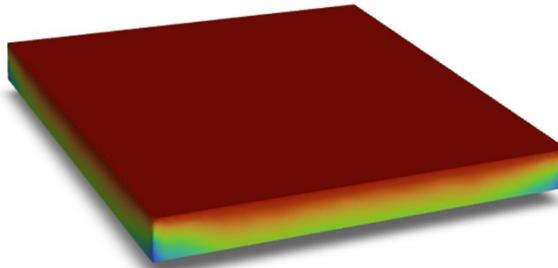
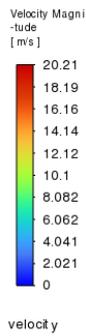
(a)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



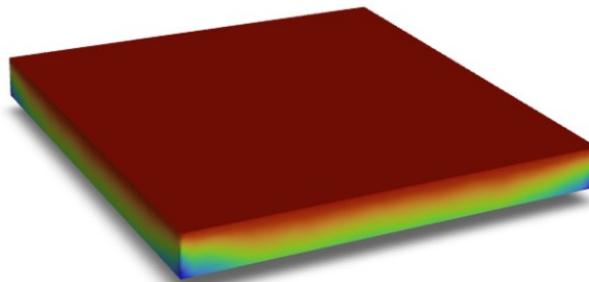
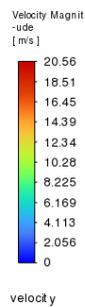
(b)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



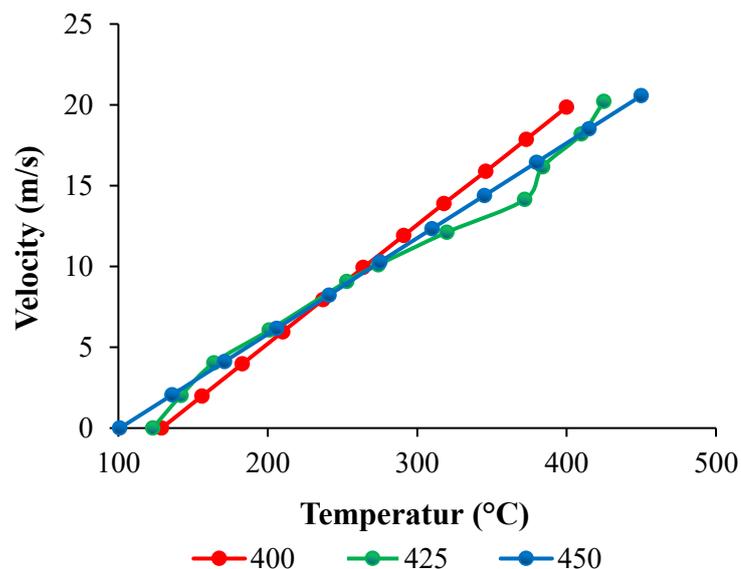
(c)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



**Gambar 4.4** Kontur Kecepatan Alir Gas Nitrogen Pada Temperatur (a) 400 °C, (b) 425 °C dan (c) 450 °C

Pada Gambar 4.4 dengan menggunakan temperatur 400 °C menunjukkan nilai kecepatan aliran gas maksimum sebesar 19,86 m/s, lalu dengan menggunakan temperatur 425 °C mendapatkan nilai kecepatan maksimum sebesar 20,21 m/s, lalu dengan menggunakan temperatur 450 °C menunjukkan nilai kecepatan maksimum sebesar 20,58 m/s. Distribusi kecepatan ini ditandai dengan variasi kontur warna yang berbeda menggambarkan tingginya nilai kecepatan di area tertentu. Kondisi naiknya kecepatan laju alir pada saluran masuk gas berlaku karena gas yang terdistribusi langsung menuju permukaan baja. Hal tersebut dapat dilihat ketika temperatur semakin tinggi, laju alir gas akan semakin tinggi dan secara perlahan akan mulai menurun hingga permukaan sampel. Hal tersebut sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa peningkatan laju alir dapat tercapai pada temperatur gas yang lebih tinggi [38]. Berikut merupakan perbandingan datanya dapat dilihat pada Gambar 4.5



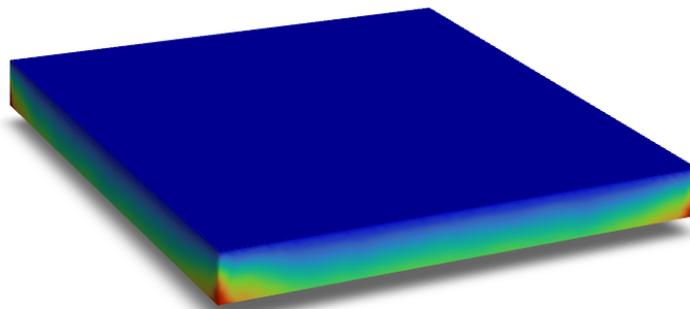
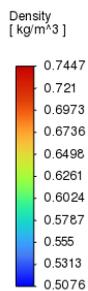
**Gambar 4.5** Kurva Kecepatan Alir Gas Nitrogen Pada Temperatur 400 °C, 425 °C, dan 450 °C

#### 4.4 Pengaruh Temperatur terhadap Densitas Gas

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada proses *plasma nitriding* dengan menggunakan temperatur 400 °C, 425 °C dan 450 °C dapat dilihat pengaruh temperatur dapat menyebabkan perubahan densitas gas. Pemanasan gas nitrogen pada simulasi ini menyebabkan molekul gas melaju lebih cepat dan menyebar hingga menempati volume yang lebih besar sehingga mengakibatkan penurunan densitas.

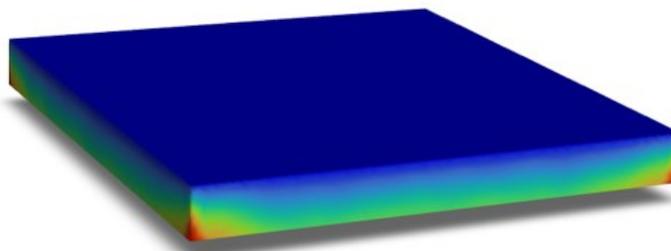
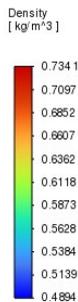
(a)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT

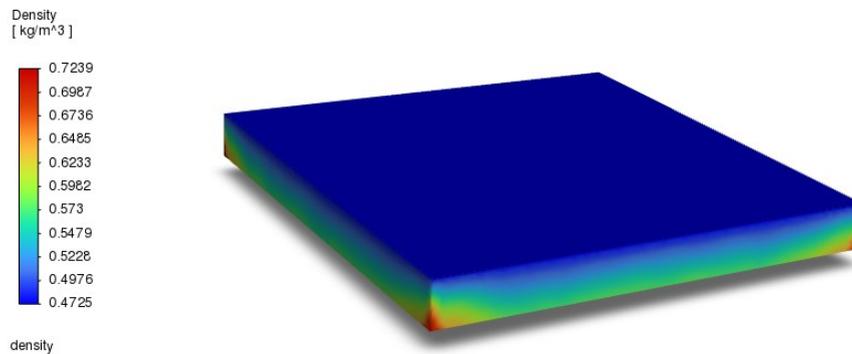


(b)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



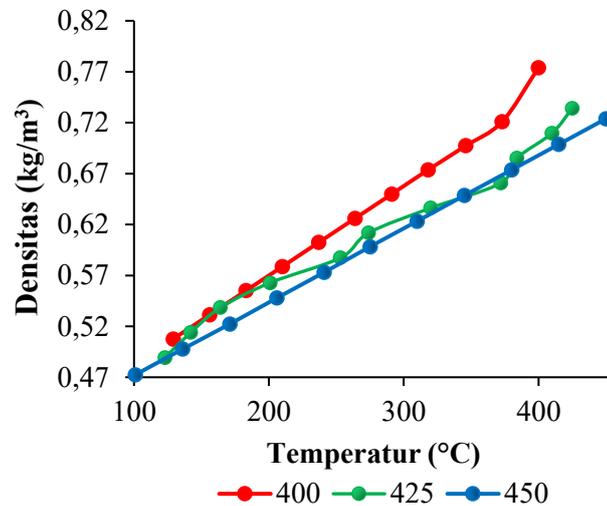
(c)



**Gambar 4.6** Kontur Perubahan Densitas Gas Nitrogen Pada Temperatur (a) 400 °C, (b) 425 °C dan (c) 450 °C

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat dengan menggunakan temperatur 400 °C distribusi densitas gas nitrogen menunjukkan hasil yang cukup signifikan, di mana nilai densitas berkisar antara 0,7447 kg/m<sup>3</sup> hingga 0,5076 kg/m<sup>3</sup>. Pada simulasi dengan menggunakan temperatur 425 °C menunjukkan distribusi densitas gas nitrogen sebesar 0,7341 kg/m<sup>3</sup> hingga 0,4894 kg/m<sup>3</sup>. Fenomena tersebut dapat terjadi karena temperatur lebih rendah, energi kinetik molekul gas nitrogen masih relatif kecil sehingga jarak antar molekul lebih padat. Pada temperatur 450 °C nilai densitas gas nitrogen mengalami penurunan yang lebih signifikan dengan distribusi yang lebih homogen. Nilai densitas pada temperatur ini berkisar 0,7239 kg/m<sup>3</sup> hingga 0,4725 kg/m<sup>3</sup>. Faktor perbedaan temperatur mengakibatkan densitas gas pada simulasi dengan temperatur 450 °C menunjukkan penurunan densitas gas yang lebih signifikan dibandingkan dengan penggunaan temperatur 400 °C dan 425 °C.

Berikut merupakan perbandingan data dapat dilihat pada Gambar 4.7



**Gambar 4.7** Kurva Perubahan Densitas Gas Nitrogen Pada Temperatur 400 °C, 425 °C, dan 450 °C

#### 4.5 Pengaruh Tekanan Gas terhadap Distribusi Temperatur

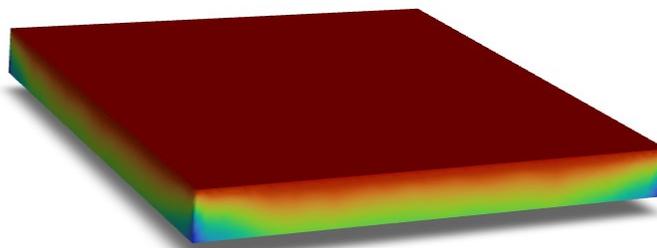
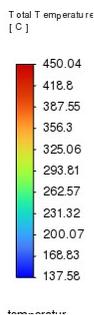
Penggunaan tekanan yang berbeda pada model simulasi juga dianalisis pada penelitian ini, di mana hasil menunjukkan perbedaan pada variabel yang diamati. Simulasi pengaruh tekanan yang dilakukan dengan menggunakan 1,5 mbar (150 Pa), 1,75 mbar (175 Pa) dan 2,0 mbar (200 Pa) dengan menggunakan jenis gas yang sama yaitu gas nitrogen. Masing-masing tekanan akan diinjeksikan pada baja dengan kecepatan 15 m/s dan temperatur gas yang diberikan pada permukaan baja sebesar 450 °C.

Tekanan yang berbeda yang diaplikasikan pada ANSYS *Fluent* berperan untuk mengetahui efisiensi aliran gas dengan tekanan yang berbeda-beda. Penggunaan variasi tekanan diatur terlebih dahulu pada bagian *setup*. Dipilih tekanan yang akan digunakan oleh masing-masing temperatur yaitu 1,5 mbar (150 Pa), 1,75 mbar (175

Pa) dan 2,0 mbar (200 Pa). Densitas masing-masing gas tidak diatur berdasarkan model gas ideal, melainkan berdasarkan kondisi gas yang sebenarnya (*real gas*). Penggunaan gas *ideal* dianggap kurang sesuai untuk simulasi ini karena simulasi tersebut beroperasi dalam kondisi yang ideal dan tidak menggambarkan keadaan gas yang sesungguhnya. Model ini mengikuti persamaan Redlich-Kwong yang serupa dengan yang digunakan dalam simulasi sebelumnya untuk memberikan hasil yang lebih akurat dan realistis dalam simulasi proses yang sedang dianalisis. Berikut merupakan hasil simulasi hasil distribusi temperatur dengan parameter tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2,0 mbar.

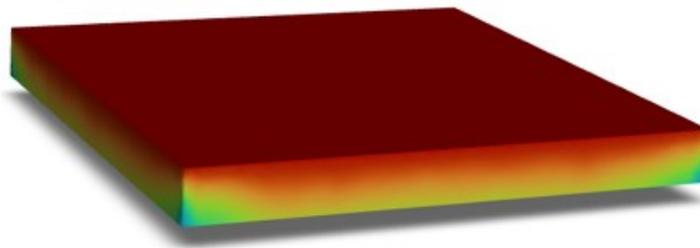
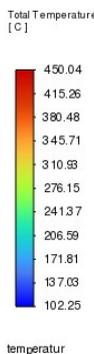
(a)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT

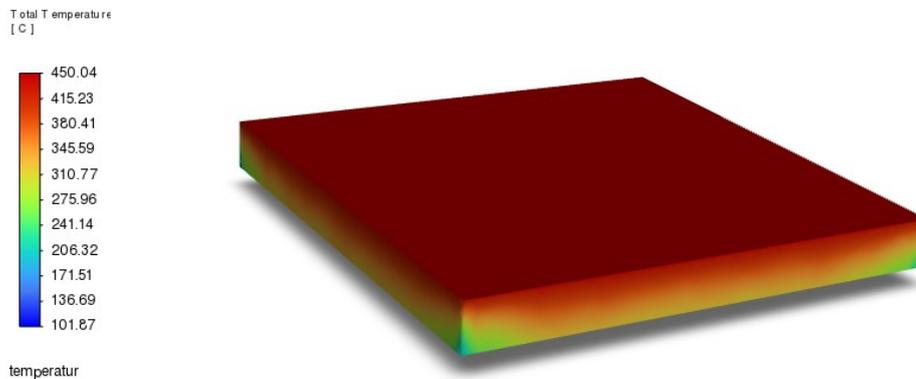


(b)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



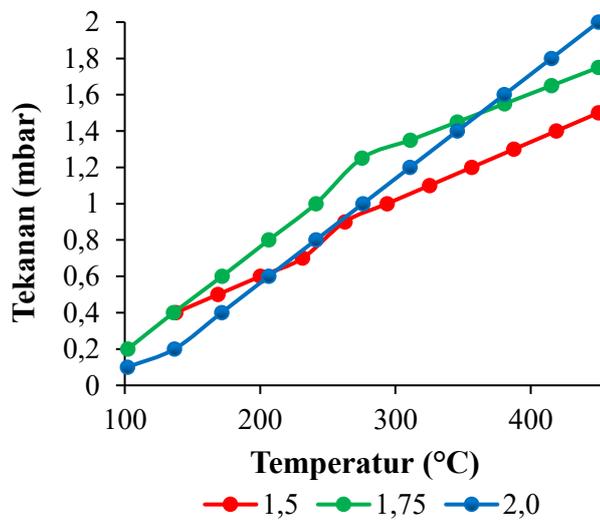
(c)



**Gambar 4.8** Hasil Distribusi Temperatur dengan Parameter Tekanan (a) 1,5 mbar, (b) 1,75 mbar (c), dan 2,0 mbar

Pada distribusi temperatur yang dapat dilihat di Gambar 4.8 dapat dilihat rentang temperatur yang dihasilkan dari masing-masing tekanan memiliki hasil yang berbeda-beda. Pada tekanan 1,5 mbar distribusi temperatur memiliki rentang nilai antara 450,04 °C hingga 137,58 °C. Kontur warna pada permukaan menunjukkan warna merah yang mengindikasikan temperatur maksimum 450 °C, sementara sisi permukaan samping hingga bawah sampel mengalami penurunan yang signifikan dengan gradasi dari warna hijau hingga biru yang menunjukkan penurunan drastis menuju nilai terendah. Pada tekanan 1,75 mbar mendapatkan distribusi temperatur nilai antara 450,04 °C hingga 102,25 °C. Sedangkan pada simulasi dengan tekanan 2,0 mbar menghasilkan distribusi temperatur 450,04 °C hingga 101,87 °C. Kontur warna pada tekanan 1,75 mbar dan 2,0 mbar tidak terlalu

berbeda dengan menggunakan tekanan 1,5 mbar. Dominasi warna merah pada permukaan sampel dan hingga dinding sampel menandakan tekanan yang didapatkan lebih merata dibandingkan dengan menggunakan tekanan 1,5 mbar. Berikut merupakan perbandingan datanya dapat dilihat pada Gambar 4.9 sebagai berikut.



**Gambar 4.9** Kurva Distribusi Temperatur dengan Parameter Tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar, dan 2,0 mbar

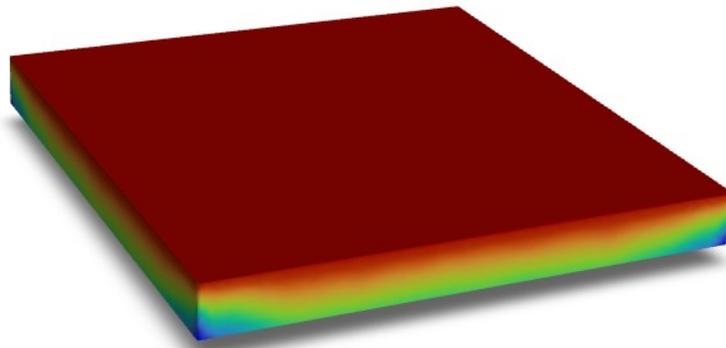
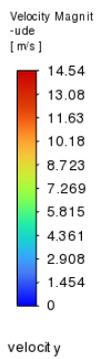
Perbedaan temperatur akhir pada sampel dapat dipengaruhi oleh tekanan yang diberikan pada masing-masing sampel. Dari ketiga tekanan yang digunakan pada sampel, tekanan 2,0 mbar menunjukkan nilai temperatur yang turun secara signifikan dan panas yang merata. Hal tersebut dapat terjadi karena densitas plasma yang meningkat dengan lebih banyak partikel gas dalam satuan volume. Dengan tekanan yang lebih besar, energi panas lebih cepat menyebar ke daerah sekitar sampel [39].

#### 4.6 Pengaruh Tekanan Gas terhadap Laju Alir Gas

Laju aliran gas dalam proses plasma nitridasi merupakan parameter penting yang mempengaruhi distribusi partikel pada ruang plasma serta mengetahui panas pada sampel. Salah satu faktor yang mempengaruhi aliran gas yaitu tekanan yang diatur pada permukaan sampel. Variasi tekanan gas akan mengubah sifat aliran dan distribusi kecepatan.

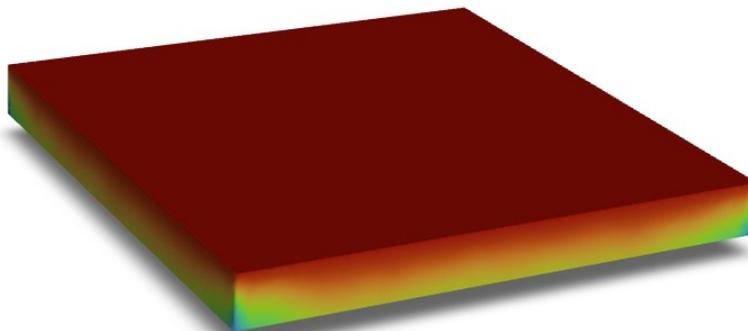
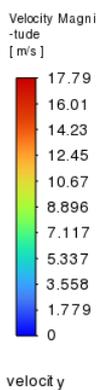
(a)

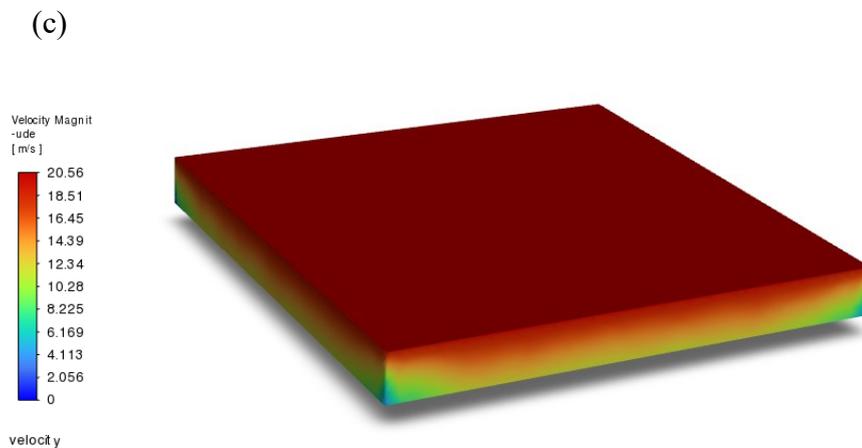
**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



(b)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT

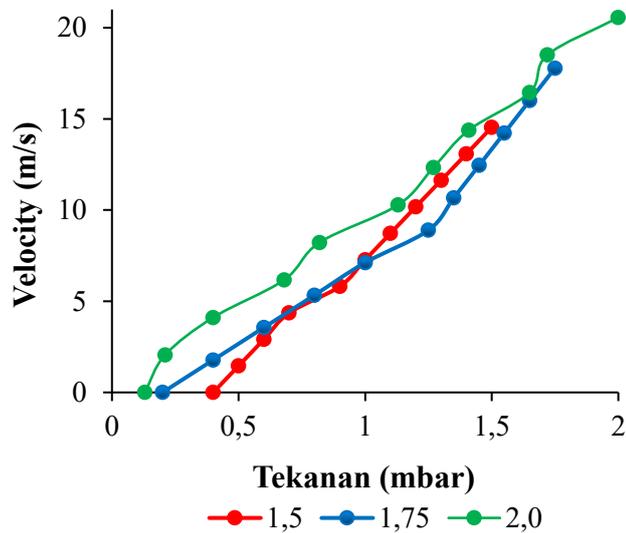




**Gambar 4.10** Kontur Laju Aliran Gas dengan Parameter Tekanan (a) 1,5 mbar, (b) 1,75 mbar (c), dan 2,0 mbar

Pada tekanan 1,5 mbar kecepatan aliran gas cenderung rendah dengan dominasi kontur warna merah tua yang menunjukkan nilai kecepatan 14,54 m/s hingga 0 m/s. Lalu kecepatan gas seiring meningkat dengan naiknya tekanan yang diberikan yaitu menggunakan tekanan 1,75 mbar mendapatkan nilai kecepatan sebesar 17,79 m/s hingga 0 m/s. Tekanan rendah dapat menyebabkan momentum partikel gas dalam reaktor berkurang sehingga mencapai kecepatan aliran gas yang lebih rendah. Pada tekanan 2,0 mbar kecepatan aliran gas menunjukkan peningkatan yang signifikan dapat terlihat dari dominasi kontur yang berwarna merah hingga oranye dan menghasilkan kecepatan aliran gas berkisar 20,56 m/s hingga 0 m/s. Peningkatan tekanan menghasilkan partikel gas yang lebih besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan Bernoulli yang menjelaskan tentang hubungan

antara tekanan, densitas, dan kecepatan aliran gas. Berikut merupakan perbandingan datanya dapat dilihat pada Gambar 4.11 sebagai berikut.



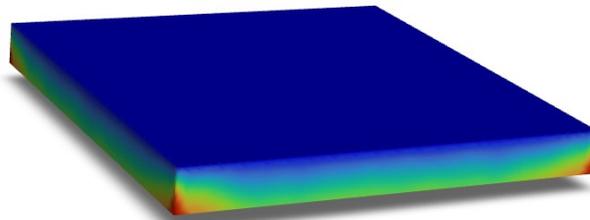
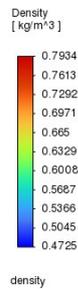
**Gambar 4.11** Kurva Laju Aliran Gas dengan Parameter Tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2,0 mbar

#### 4.7 Pengaruh Tekanan Gas terhadap Densitas Gas

Pada dasarnya, perbandingan nilai densitas tidak dapat menjadi perbandingan secara langsung karena perbedaan gas yang digunakan akan mempengaruhi densitas yang terjadi. Tetapi, densitas gas menjadi faktor dalam menentukan distribusi energi dan transfer massa dalam proses plasma nitridasi. Berikut merupakan perbandingan tekanan gas yang digunakan terhadap densitas yang dihasilkan.

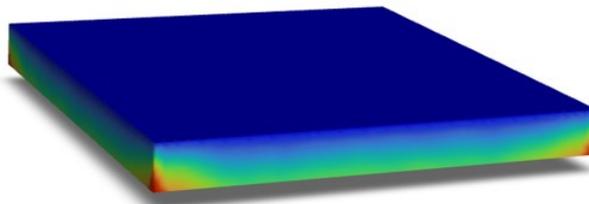
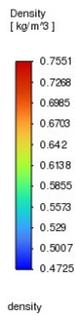
(a)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



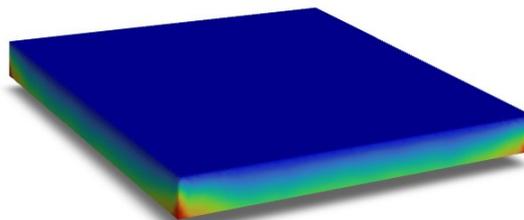
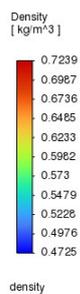
(b)

**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



(c)

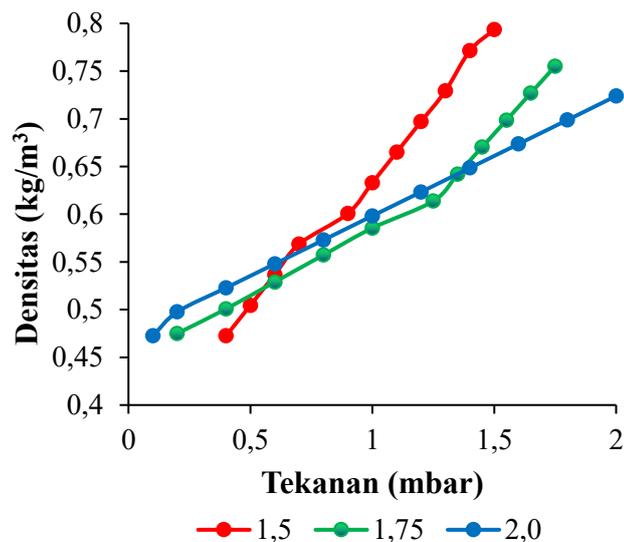
**Ansys**  
2024 R2  
STUDENT



**Gambar 4.12** Kontur Densitas Gas dengan Parameter Tekanan (a) 1,5 mbar, (b) 1,75 mbar, dan (c) 2,0 mbar

Pada Gambar 4.12 dapat dilihat dengan menggunakan tekanan 1,5 mbar sampel mendapatkan densitas yang relatif lebih tinggi sekitar 0,7934 kg/m<sup>3</sup> hingga

0,4725 kg/m<sup>3</sup>. Kemudian dengan menggunakan tekanan 1,75 mbar sampel mendapatkan densitas 0,7551 kg/m<sup>3</sup> hingga 0,4725 kg/m<sup>3</sup>. Sedangkan dengan menggunakan tekanan 2,0 mbar sampel mendapatkan densitas yang lebih rendah yaitu 0,7239 kg/m<sup>3</sup> hingga 0,4725 kg/m<sup>3</sup>. Dengan mendapatkan nilai tersebut, tekanan yang tinggi dapat mengakibatkan jarak antar partikel gas menjadi lebih padat yang mengakibatkan partikel gas bertabrakan satu sama lain. Perbedaan densitas gas ini menunjukkan bahwa tekanan memiliki peran dalam mengontrol karakteristik plasma selama proses nitridasi. Berikut merupakan perbandingan datanya dapat dilihat pada Gambar 4.13 sebagai berikut.

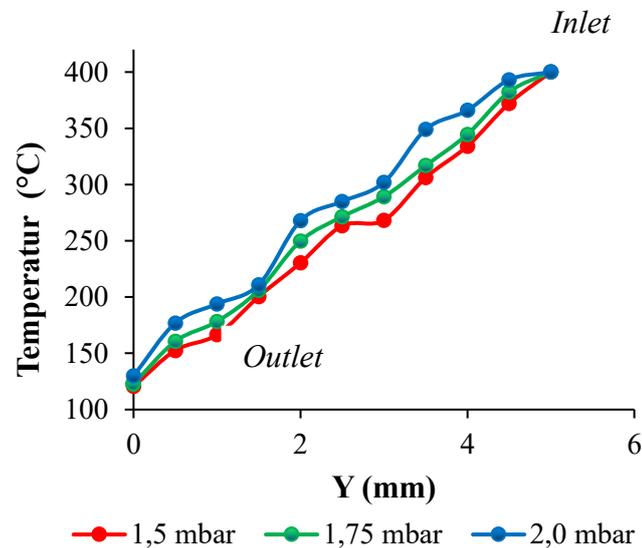


**Gambar 4.13** Kurva Densitas Gas dengan Parameter Tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2,0 mbar

#### 4.8 Profil Temperatur Hubungan Temperatur dengan Tekanan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dijalankan, terdapat perubahan seperti temperatur, laju alir, dan tekanan. Perubahan temperatur yang terjadi menunjukkan

salah satu faktor yang mempengaruhi yang mempengaruhi laju reaksi, dengan temperatur yang tinggi akan mempercepat proses terjadinya reaksi.



**Gambar 4.14** Profil Temperatur Sepanjang *inlet* ke *outlet*

Pada Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa temperatur sepanjang *inlet* ke *outlet* sampel pada variasi tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar, dan 2,0 mbar serta menggunakan temperatur yang sama yaitu 400 °C dengan ketebalan sampel yaitu 5 mm. Dengan menggunakan tekanan 1,5 mbar temperatur yang ditunjukkan pada permukaan baja yaitu 400,04 °C pada *inlet* dan menurun hingga 120,58 °C pada *outlet*. Dengan menggunakan tekanan 1,75 mbar temperatur yang dihasilkan pada permukaan baja yaitu 400,04 °C pada *inlet* dan menurun hingga 122,86 °C pada *outlet*. Pada tekanan 2,0 mbar temperatur yang dihasilkan mencapai 400,04 °C pada *inlet* dan menurun hingga 129,87 °C pada *outlet*. Tekanan gas yang disimulasikan tersebut juga berpengaruh terhadap temperatur sepanjang *inlet* menuju *outlet*. Pada hasil yang didapatkan dengan tekanan yang lebih tinggi menghasilkan penurunan temperatur yang signifikan dibandingkan tekanan yang lebih rendah. Hal tersebut dapat terjadi

karena dengan tekanan yang lebih tinggi kecepatan molekul gas yang meningkat. Dengan banyaknya molekul gas yang meningkat kecepatannya dapat menyebabkan konduktivitas termal gas ikut meningkat yang mengakibatkan transfer panas menjadi lebih efisien.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian simulasi proses plasma nitridasi dengan menggunakan ANSYS *Fluent*. Berikut beberapa poin kesimpulan yang dihasilkan.

1. Pengaruh variasi temperatur pada simulasi mempengaruhi beberapa faktor yaitu perubahan densitas dan laju alir. Pada temperatur 450 °C mendapatkan densitas gas nitrogen yang menurun hingga 0,7239 kg/m<sup>3</sup> dibandingkan dengan temperatur 425 °C dan 400 °C yang mendapatkan nilai 0,7341 kg/m<sup>3</sup> dan 0,7447 kg/m<sup>3</sup>. Laju alir gas yang didapatkan meningkat yaitu pada temperatur 400 °C mendapatkan laju alir gas 19,86 m/s. Pada temperatur 425 °C mendapatkan laju alir gas 20,21 m/s dan terus meningkat pada temperatur 450 °C mendapatkan laju alir gas 20,56 m/s.
2. Pengaruh variasi tekanan pada simulasi mempengaruhi faktor temperatur yang dihasilkan. Pada tekanan 1,5 mbar, 1,75 mbar dan 2,0 mbar menghasilkan penyebaran temperatur yang sama yaitu 450,04 °C tetapi dengan tekanan 2,0 mbar penyebaran panas pada sampel lebih merata yang ditandai dengan dominasi warna merah pada permukaan sampel hingga dinding sampel dibandingkan dengan menggunakan tekanan 1,5 mbar dan 2,0 mbar.

3. Penggunaan gas nitrogen dengan variasi temperatur dan tekanan menunjukkan perubahan signifikan pada karakteristik gas nitrogen. Pada tekanan gas 2.0 mbar menghasilkan distribusi yang lebih merata pada sampel dibandingkan dengan tekanan 1,5 mbar dan 1,75 mbar. Pada tekanan dan temperatur yang lebih tinggi, distribusi gas nitrogen lebih seragam, memberikan efisiensi difusi yang lebih baik ke dalam permukaan baja. Model simulasi ini memperhatikan kondisi batas geometri yang difokuskan kepada sampel baja yang diberikan *inlet*, *outlet*, dan *wall* untuk mendapatkan ilustrasi berupa densitas, laju alir, temperatur hingga tekanan.

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya dari simulasi plasma nitridasi yaitu melakukan hasil simulasi dengan variabel yang lebih beragam seperti penggunaan temperatur yang berbeda dan melakukan penambahan waktu pada proses plasma nitridasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. N. D. Yahya, D. I. Rudyardj, and J. Ady, "Diamond Like Carbon (Dlc) Coating on Carbon Steel With Plasma Techniques for Gas Pipes," *Indones. Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, no. 2, p. 51, 2020, doi: 10.20473/iapl.v1i2.23446.
- [2] F. P. Fadli Hanafi Siregar, Mohamad Sofitra and Jurusan, "STUDI KELAYAKAN BISNIS PENDISTRIBUSIAN GAS MELALUI MODA TRANSPORTASI PIPA PADA KABUPATEN MEMPAWAH, KABUPATEN KUBU RAYA, DAN KOTA PONTIANAK," vol. 8, no. 1, pp. 8–20, 2024.
- [3] U. E. all Wahyuningsih, "Penanggulangan Korosi Pada Pipa Gas Dengan Metode Catodic Protection (Anoda Korban) Pt Pgn Solution Area Tangerang," *Power Plant*, vol. 5, no. 1, pp. 40–50, 1970, doi: 10.33322/powerplant.v5i1.109.
- [4] M. D. Manfrinato, M. R. Danelon, L. S. De Almeida, R. C. Cozza, and L. S. Rossino, "Plasma Nitriding Effect on Tribological Behavior of AISI D2 tool steel: Understanding of Wear Rate," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 22, no. 11, pp. 178–185, 2022, doi: 10.9790/9622-1211178185.
- [5] F. Czerwinski, *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*. 2012. doi: 10.5772/2798.
- [6] T. Rahardjo, "Proses Nitriding Untuk Peningkatan Sifat Mekanik Permukaan Material Dies," *J. Flywheel*, vol. 1, no. 2, pp. 50–60, 2008.
- [7] S. Suprpto, B. Tenaga, and N. Nasional, *Buku Pengembangan Teknologi Plasma untuk Nitridasi Lengkap ISBN Barcode*, no. November. 2018.

[Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/337274853>

- [8] P. T. Akselerator, D. Proses, and B. Abstrak, "Suprpto, Lely Susita RM, Sukidi," *Ilm. Teknol. Akselerator dan Apl.*, vol. 9, pp. 234–240, 2007.
- [9] J. Jalaluddin, S. Akmal, N. ZA, and I. Ibrahim, "Analisa Laju Korosi Baja Karbon ST-37 dalam Larutan Asam Sulfat dengan Penambahan Inhibitor Ekstrak Daun Tembakau," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 8, no. 2, p. 53, 2020, doi: 10.29103/jtku.v8i2.2682.
- [10] D. Pye, *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*. 2003.
- [11] A. B. Setiawan and W. Purwadi, "Pengaruh Temperatur Dan Waktu Proses Nitridasi Terhadap Kekerasan Permukaan Fcd 700 Dengan Media Nitridasi Urea," *Semin. Nas. Kluster Ris. Tek. Mesin 2009*, pp. 35–40, 2009.
- [12] T. Trisbenheiser, "Pengaruh Proses Nitriding Terhadap Perubahan Kekerasan Dan Keausan Permukaan Baja St 40 Dengan Variasi Waktu Dan Suhu," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 18, no. 2, pp. 182–188, 2020, doi: 10.31963/sinergi.v18i2.2310.
- [13] U. Rumendi and H. Hermawan, "Analisis Pengerasan Permukaan Dan Struktur Mikro Baja Aisi 1045 Melalui Proses Nitridasi Menggunakan Media Urea," *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 1, no. 2, pp. 104–109, 2014, doi: 10.21009/jkem.1.2.7.
- [14] M. KRBAŤA, P. MIKÚŠ, and O. PILCH, "Analysis of Processes and Properties of Plasma Nitriding.," *Univ. Rev.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–3, 2016.
- [15] D. Priyantoto, B. Pribadi, S. Lutfi, and T. Sujitno, "Nitridasi Plasma Temperatur 423 K pada Permukaan AlMgSi sebagai Bahan Struktur Reaktor

Riset,” *Pros. SNFA (Seminar Nas. Fis. dan Apl.*, pp. 10–18, 2022.

- [16] A. L. S. & Mujiyono, “Meningkatkan Efektivitas Arang Bakau Pada Proses Karburising Padat Baja Karbon Rendah Menggunakan Barium Karbonat (Improving Bakau’s Charcoal Effectiveness on Pack Carburizing of Low-Carbon Steel Using Barium Carbonat),” *J. Ilm. Semesta Tek.*, vol. 12, no. 2, pp. 123–131, 2009.
- [17] B. Waluyo Febriantoko, “Studi variasi suhu terhadap kuat mekanik sambungan antara baja dengan tembaga pada proses furnace brazing,” *Media Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 35–42, 2008.
- [18] J. William D. Callister, *Materials Science and Engineering An Introduction*, vol. 26, no. 14. 1991. doi: 10.1007/BF01184995.
- [19] L. S. R.M., B. Siswantor, I. Aziz, and Taufik, “Deposisi lapisan nitrida pada permukaan pin dan ring piston dengan metoda dc sputtering,” *Pros. Pertem. dan Present. Ilm. Teknol. Akselerator dan Apl.*, vol. 13, no. 1, pp. 70–78, 2012.
- [20] W. Purwadi, D. Idamayanti, P. Manufaktur, and N. Bandung, “Peningkatan Kekerasan Permukaan Ferro Casting Ductile ( Fcd ) 700 Melalui Proses Nitridasi Dengan Media Urea Increasing of Surface Hardness of Ferro Casting Ductile ( Fcd ) 700 Through Nitriding in Urea Medium,” vol. 1, no. 1, pp. 64–78, 2015.
- [21] L. Trisnaliani and A. Harianto, “Produksi Gas Nitrogen Dengan Metode Pressure Swing Adsorption (Psa) Menggunakan Carbon Molecular Sieve (Cms) Sebagai Penyerap Oksigen Nitrogen Gas Production By Pressure Swing Adsorption (Psa) Method Using Carbon Molecular Sieve (Cms) As Oxygen Adsorption,” *J. Kinet.*, vol. 9, no. 01, pp. 45–50, 2018, [Online].

Available: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>

- [22] M. Jordi, H. Yudo, and S. Jokosisworo, “Analisa Pengaruh Proses Quenching Dengan Media Berbeda Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja St 36 Dengan Pengelasan SMAW,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 4, pp. 272–281, 2017, [Online]. Available: <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [23] S. H. Sardjono, Eri, “Studi Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja Din 1 . 7223,” *Jur. Mesin, Univ. Muhammadiyah Jakarta*, pp. 42–50, 2009.
- [24] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Material Science and Engineering*. 2003.
- [25] J. Carvill, “Mechanical Engineer’s Data Handbook,” *Mech. Eng. Data Handb.*, pp. 1–342, 2012, doi: 10.1016/C2009-0-24207-3.
- [26] S. Ibrahim, “Kajian Perbandingan Komposisi Kimia, Sifat Mekanik dan Ketahanan Aus terhadap Baja Perkakas AISI D2 pada Aplikasi DIES,” *J. Vokasi Teknol. Ind.*, vol. 1, no. 1, pp. 23–28, 2019, doi: 10.36870/jvti.v1i1.42.
- [27] ASTM International, “ASTM A 681-08 Standard Specification for Tool Steels Alloy,” *ASTM Int.*, vol. 94, no. Reapproved 2004, pp. 1–14, 2005.
- [28] T. E. R. Syahputra, S. A. Widyanto, and Sulardjaka, “Analisa Karakteristik Material Stempel Mesin Ekstruder Pada Proses Ekstrusi Collapsible Tube,” *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 11, no. 3, pp. 179–188, 2023.
- [29] M. Mačák, P. Vyroubal, T. Kazda, D. Capková, and J. Maxa, “Numerical Modelling of Discharging the Lithium-Sulphur Batteries in Ansys Fluent,” *Adv. Mil. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 163–177, 2022, doi: 10.3849/aimt.01525.

- [30] ANSYS Inc., “ANSYS Manual,” *Theory Reference*, no. November. pp. 1–1286, 1999. [Online]. Available: <http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>
- [31] H K Versteeg and W Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, vol. 10, no. 01. 2020. doi: 10.4236/ojfd.2020.101005.
- [32] M. Nawawi, *Analisa Computational Fluid Dynamics (Cfd) Terhadap Pengaruh Inclining Keel Pada Hambatan Dan Kecepatan Kapal Ikan*. 2015. [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/59684/1/4110100702-Undergraduate Thesis.pdf>
- [33] S. Maulana, “Pemanfaatan Computational Fluid Dynamics (Cfd) Dalama Strategi Penelitian Simulasi Model Pada Teknologi Penghawaan Ruang,” *Educ. Build.*, vol. 2, no. 2, pp. 10–13, 2016, doi: 10.24114/eb.v2i2.4393.
- [34] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, “Introduction to Numerical Methods BT - Computational Methods for Fluid Dynamics.” pp. 23–40, 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6_2)
- [35] I. Hinkov, K. Pashova, and S. Farhat, “Modeling of plasma-enhanced chemical vapor deposition growth of graphene on cobalt substrates,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 93, no. November 2018, pp. 84–95, 2019, doi: 10.1016/j.diamond.2019.02.001.
- [36] I. Hinkov *et al.*, “Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes,” *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.*, vol. 04, no. 04, pp. 196–209, 2014, doi: 10.4236/jsemat.2014.44023.
- [37] S. A. Konakov and V. V. Krzhizhanovskaya, “A mathematical model and simulation results of plasma enhanced chemical vapor deposition of silicon

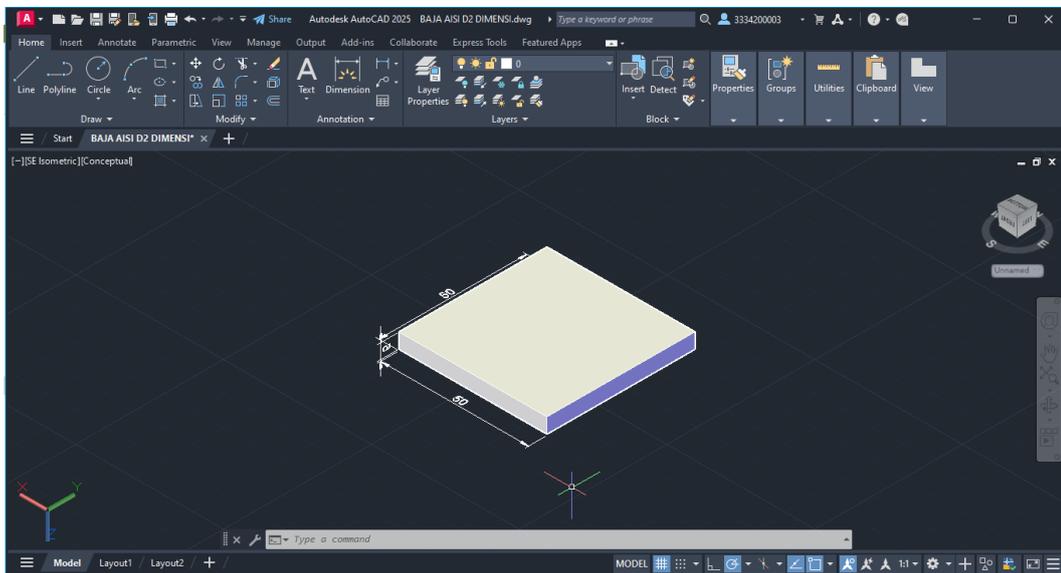
nitride films,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 574, no. 1, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/574/1/012144.

[38] G. Kim *et al.*, “Two dimensional radial gas flows in atmospheric pressure plasma-enhanced chemical vapor deposition,” *AIP Adv.*, vol. 7, no. 12, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1063/1.4996797.

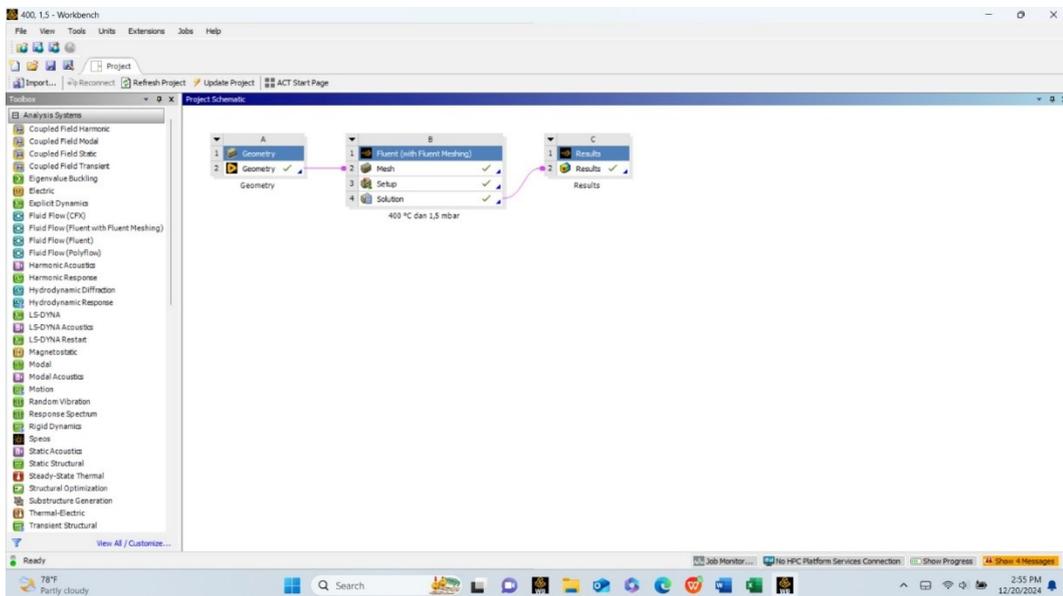
[39] F. F. Chen and S. E. Von Goeler, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion Volume 1: Plasma Physics, Second Edition*, vol. 38, no. 5. 1985. doi: 10.1063/1.2814568.

## **LAMPIRAN**

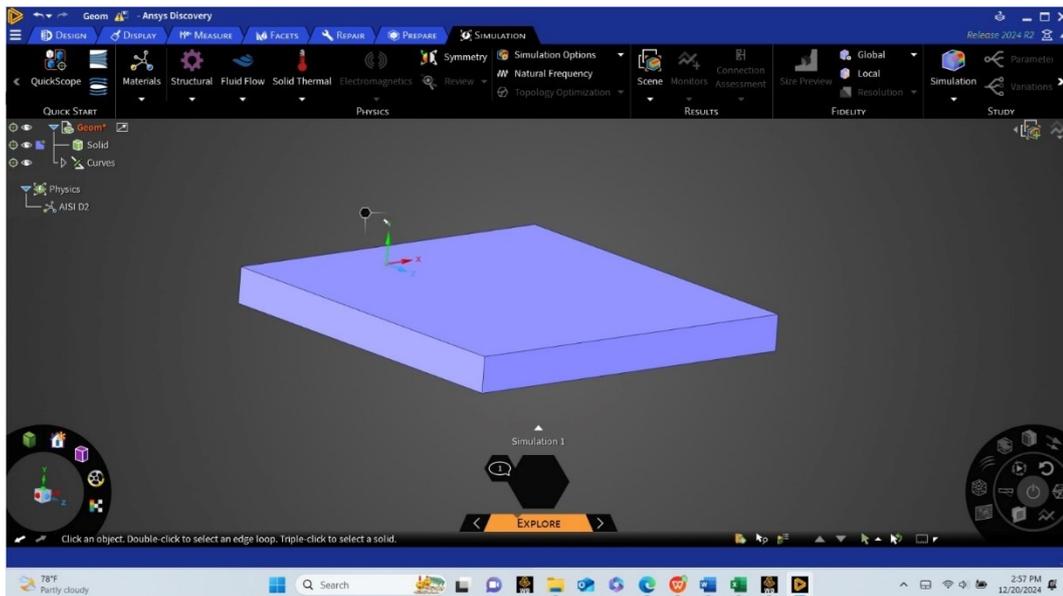
## Lampiran A. *Input Data dan Langkah Simulasi*



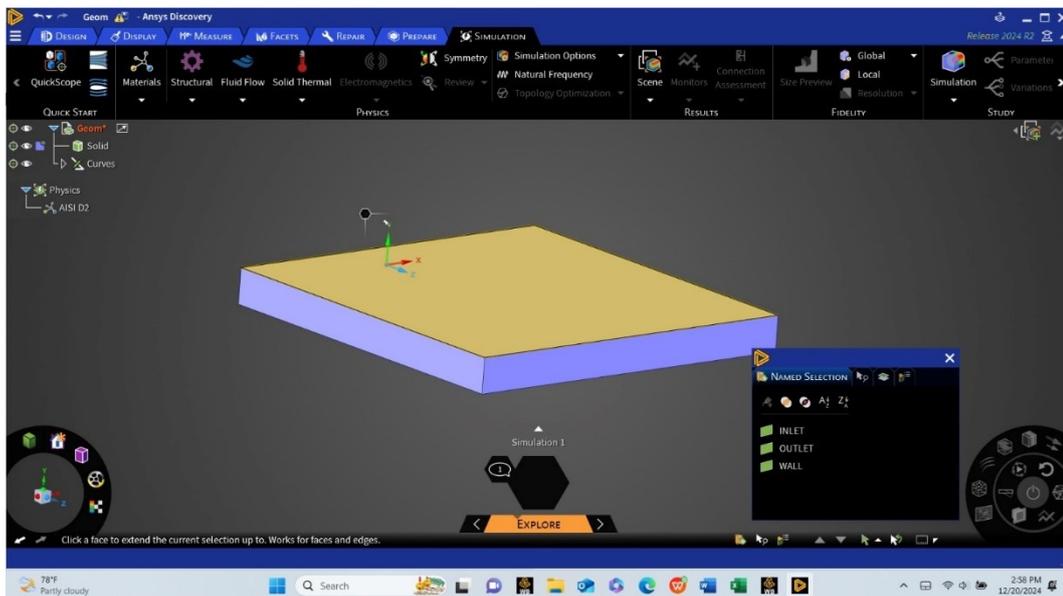
**Gambar A.1** Dimensi Geometri pada AutoCAD



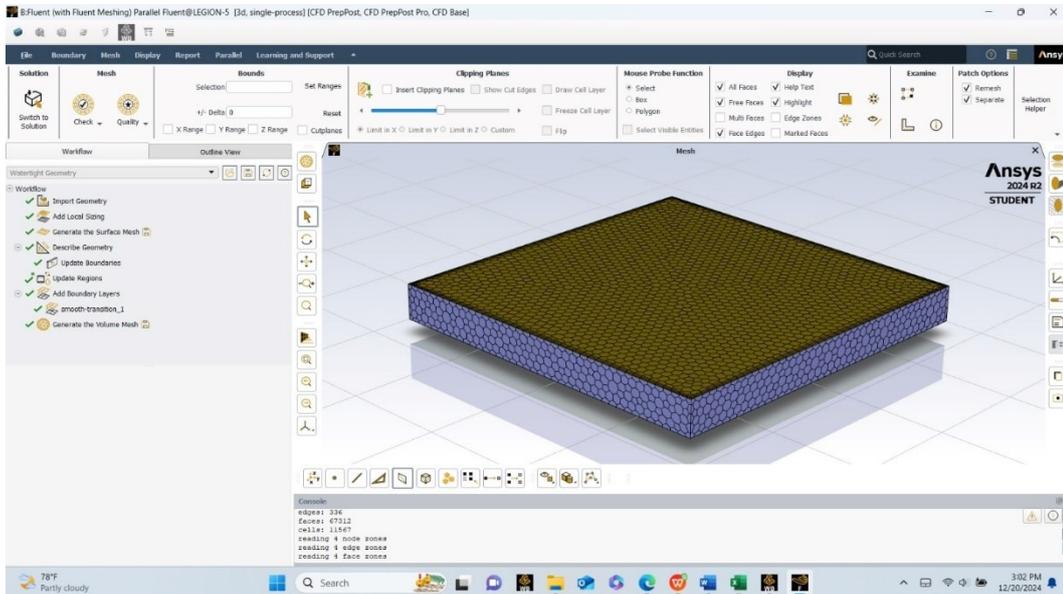
**Gambar A.2** Set Up Workbench Ansys



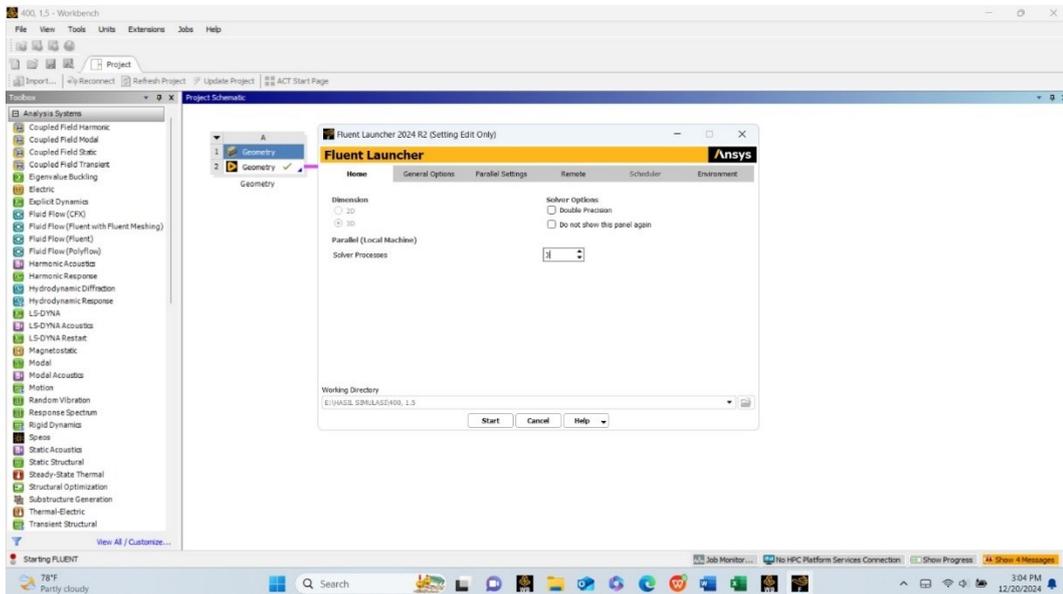
**Gambar A.3** *Input Geometri dari AutoCAD*



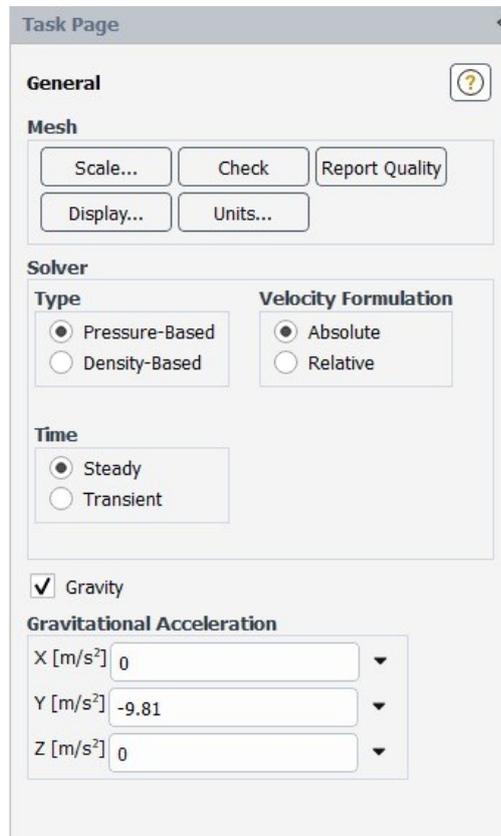
**Gambar A.4** *Input Bagian Geometri*



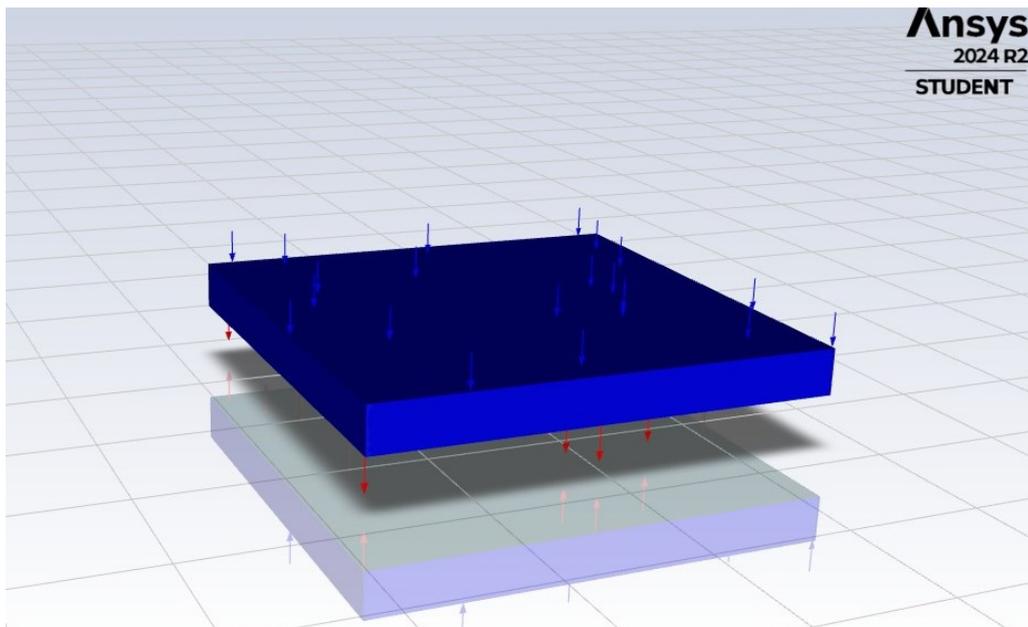
Gambar A.5 Proses Meshing pada Geometri



Gambar A.6 Setting Solver pada CFD



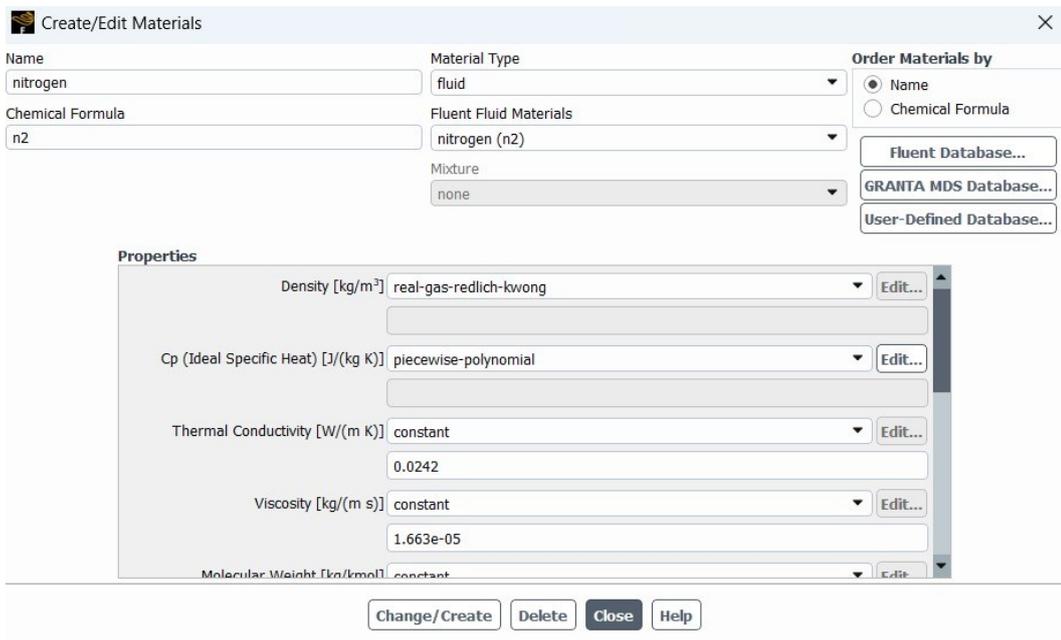
**Gambar A.7** Pengaturan Standar Gravitasi dan Tipe Penyelesaian



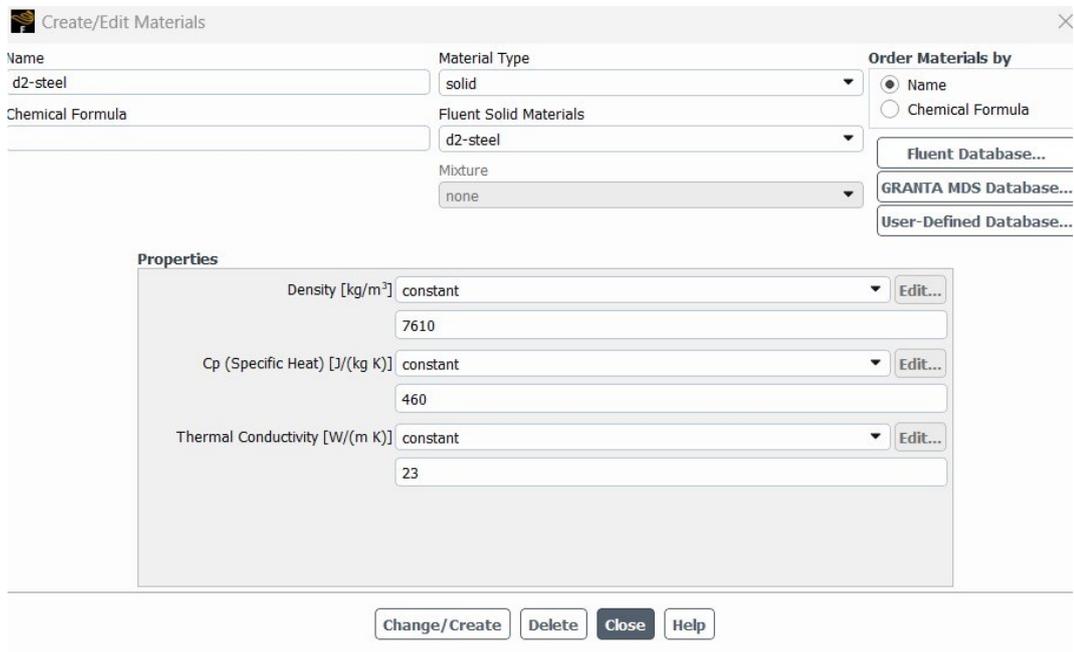
**Gambar A.8** Sistem *Inlet* pada Sampel



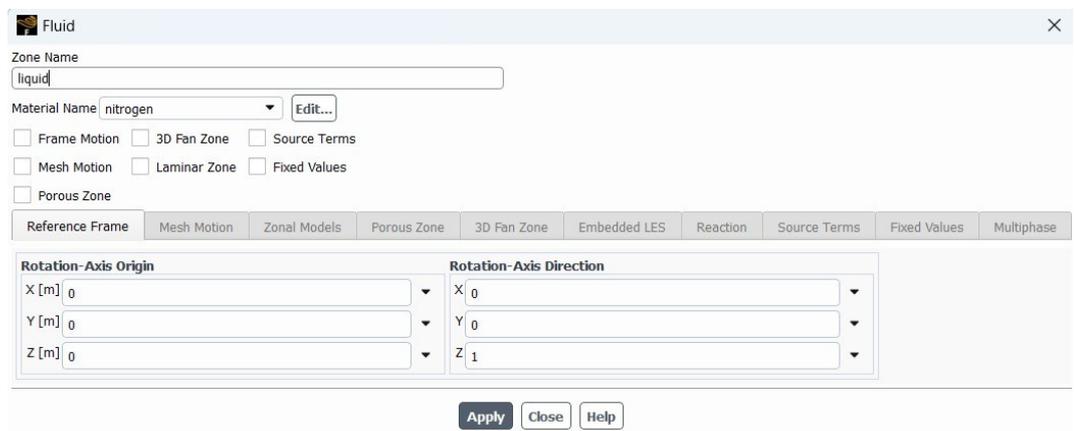
**Gambar A.9** Pengaturan Temperatur



**Gambar A.10** Standar Fisik Gas Nitrogen Pada ANSYS



**Gambar A.11** Standar Sifat Fisik Baja AISI D2 pada ANSYS



**Gambar A.12** Setting Zona Aliran

**Pressure Inlet** [X]

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Reference Frame Absolute

Gauge Total Pressure [Pa] 150

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] 0

Direction Specification Method Direction Vector

Coordinate System Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction 0

Y-Component of Flow Direction -1

Z-Component of Flow Direction 0

Prevent Reverse Flow

**Turbulence**

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%] 5

Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

**Gambar A.13** *Input Data Inlet*

**Pressure Outlet** [X]

Zone Name  
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 100

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Direction Vector

Coordinate System Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction 0

Y-Component of Flow Direction -1

Z-Component of Flow Direction 0

Backflow Pressure Specification Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

**Turbulence**

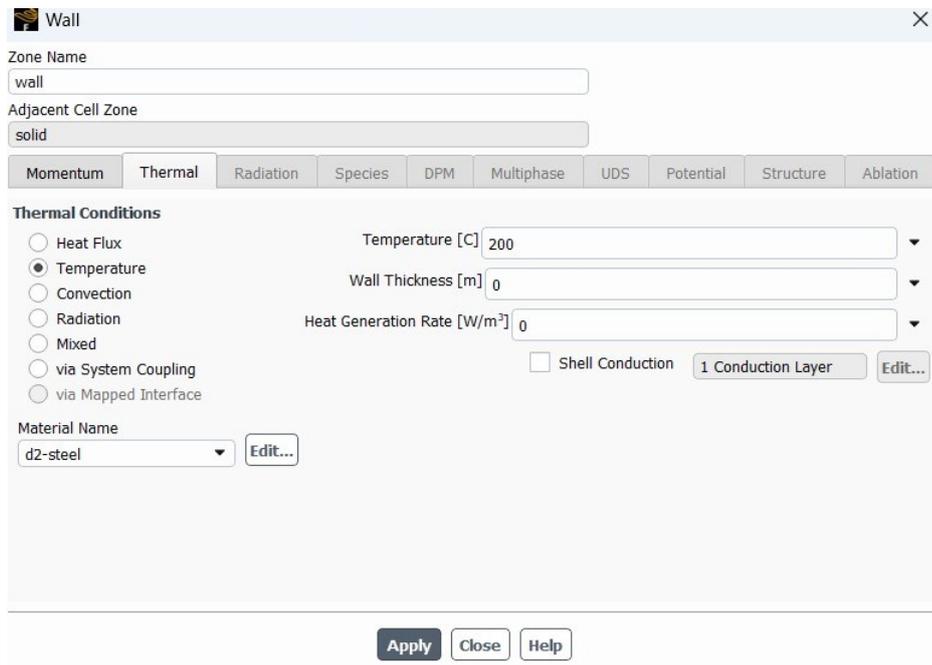
Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%] 5

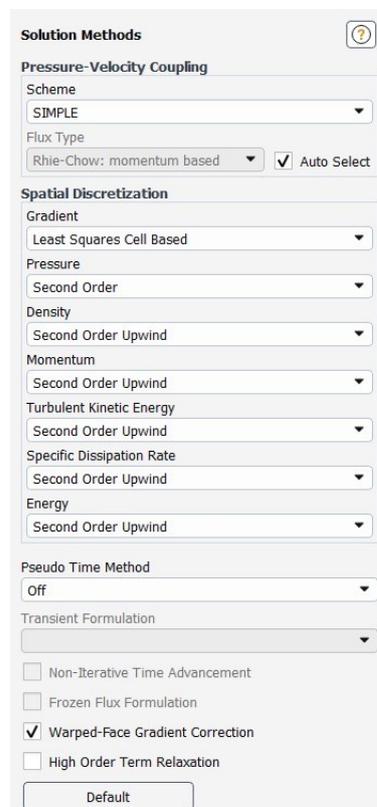
Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

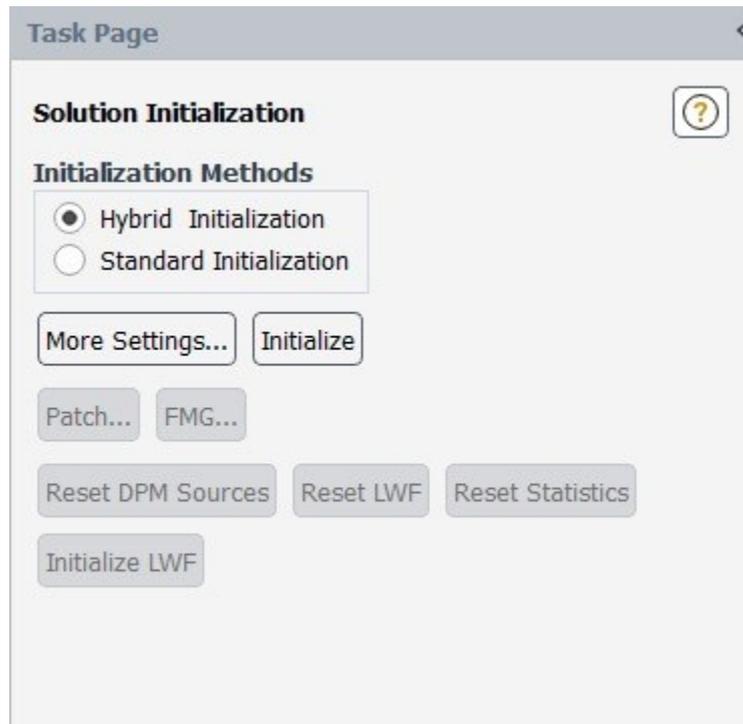
**Gambar A.14** *Input Data Outlet*



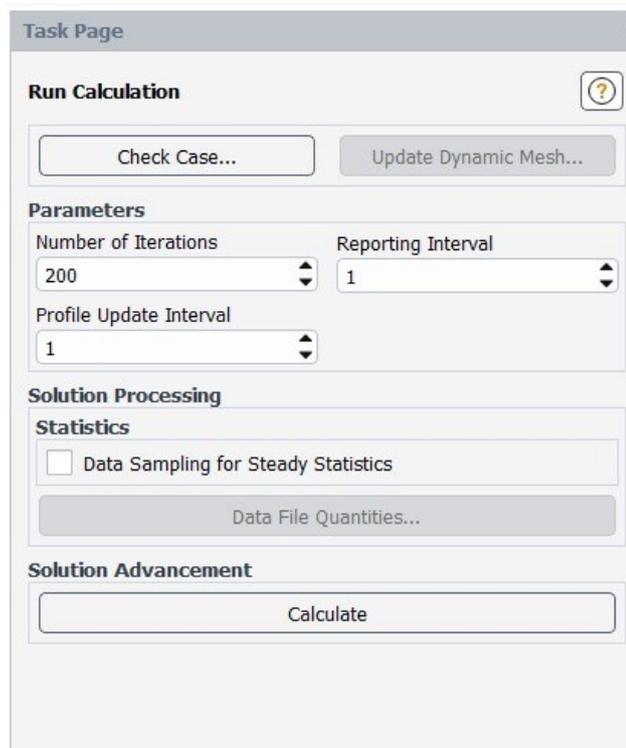
**Gambar A.14** *Input Data Wall*



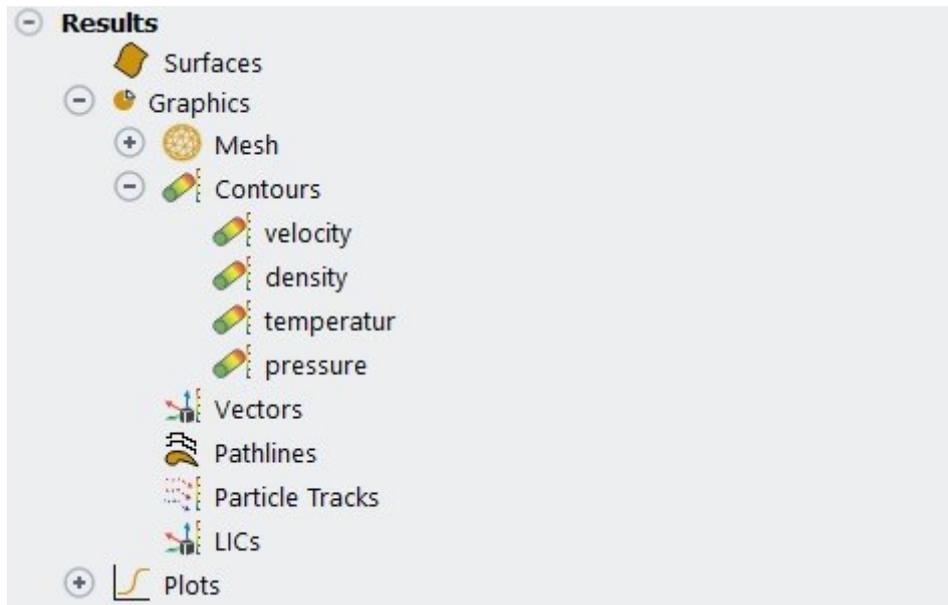
**Gambar A.15** Pengaturan Metode Penyelesaian Simulasi



**Gambar A.16** Pengaturan Metode Inisiliasi



**Gambar A.17** Pengaturan Jumlah Iterasi dan Interval



**Gambar A.18** Hasil Simulasi