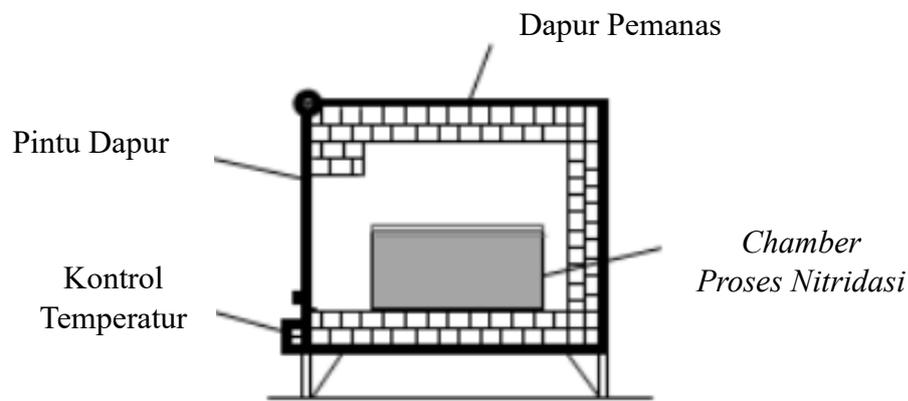


BAB II

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.

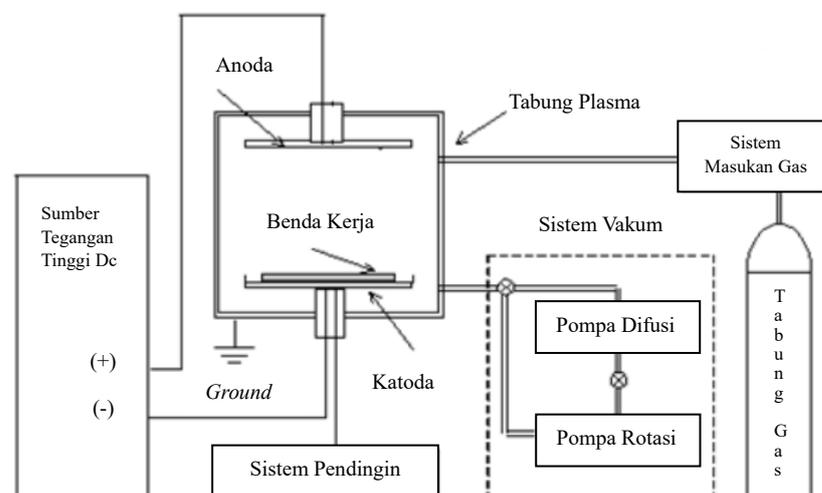
b. Nitridasi Gas

Proses nitridasi gas merupakan salah satu metode nitridasi yang dilakukan dengan cara mengalirkan gas yang mengandung nitrogen seperti gas amonia (NH_3) dan nitrogen murni (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]

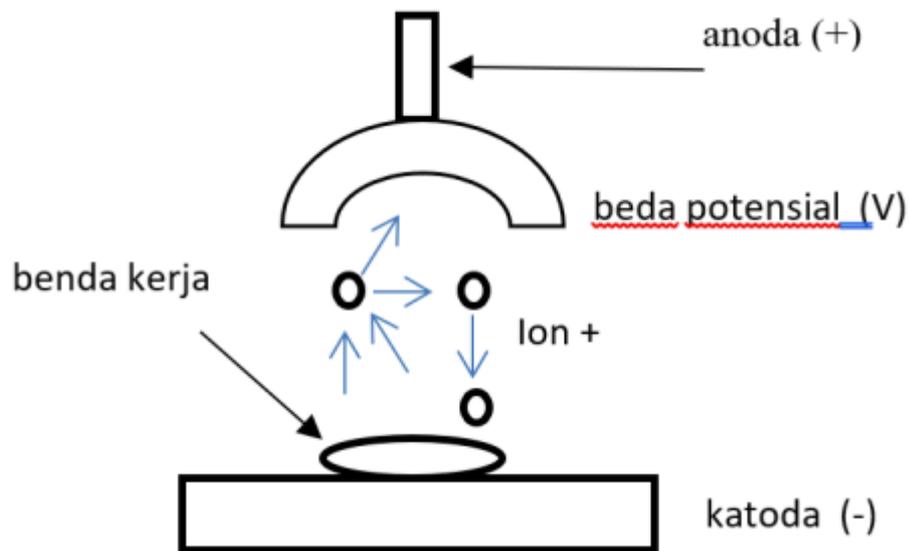
Seiring dengan perkembangan teknologi, nitridasi gas mengalami inovasi dengan diperkenalkannya plasma nitridasi. Plasma nitridasi ialah pengembangan dari nitridasi gas yang memanfaatkan plasma untuk meningkatkan efektivitas proses penyerapan nitrogen pada permukaan logam. Berikut merupakan skematik reaktor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



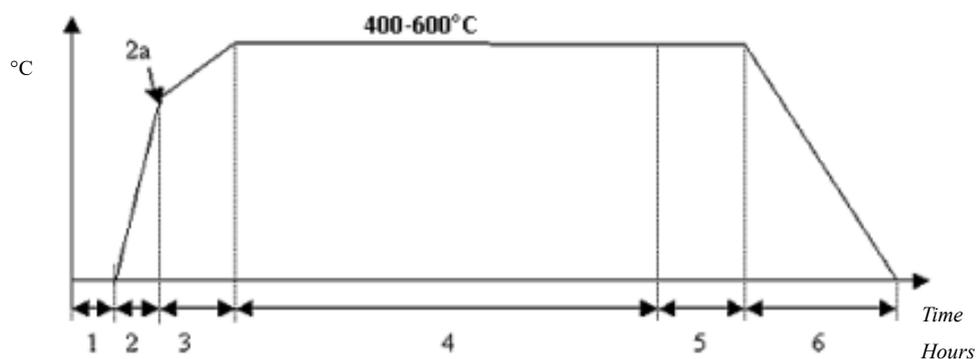
Gambar 2.3 Penyisipan Ion ke Benda Kerja [15]

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

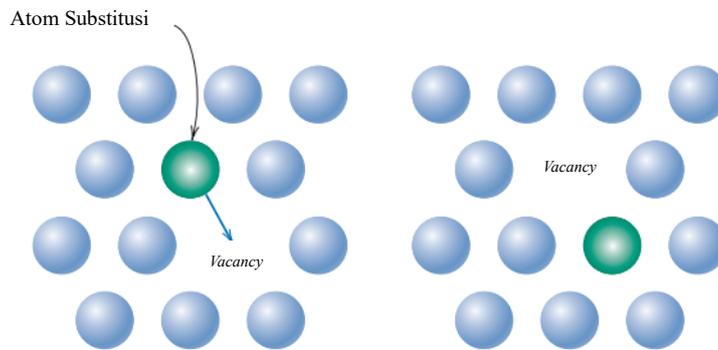
- b. Temperatur yang digunakan yaitu 350 hingga 600 °C
- c. Tekanan gas yang digunakan yaitu 50 hingga 500 Pa
- d. Konsumsi gas yang digunakan yaitu 20 l/h (skala laboratorium) hingga 1/h (skala industri)
- e. Waktu pemanasan yang digunakan yaitu 0,5 hingga 60 jam

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*

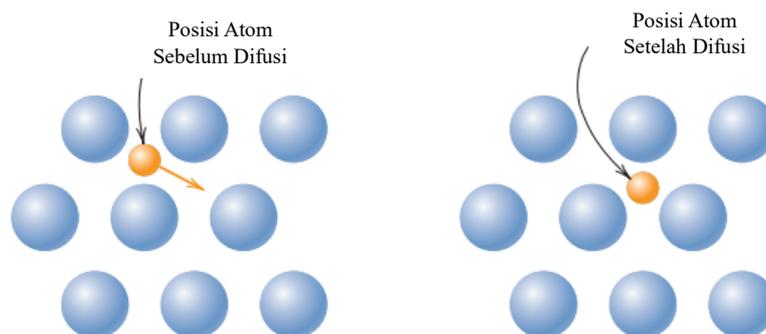
Difusi *vacancy* merupakan salah satu mekanisme perpindahan atom dalam material yang terjadi karena adanya kekosongan pada struktur atom. Kekosongan ini berperan sebagai jalur perpindahan bagi atom-atom yang berada di sekitarnya. Ketika material berada pada temperatur tinggi, energi termal yang dihasilkan 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:

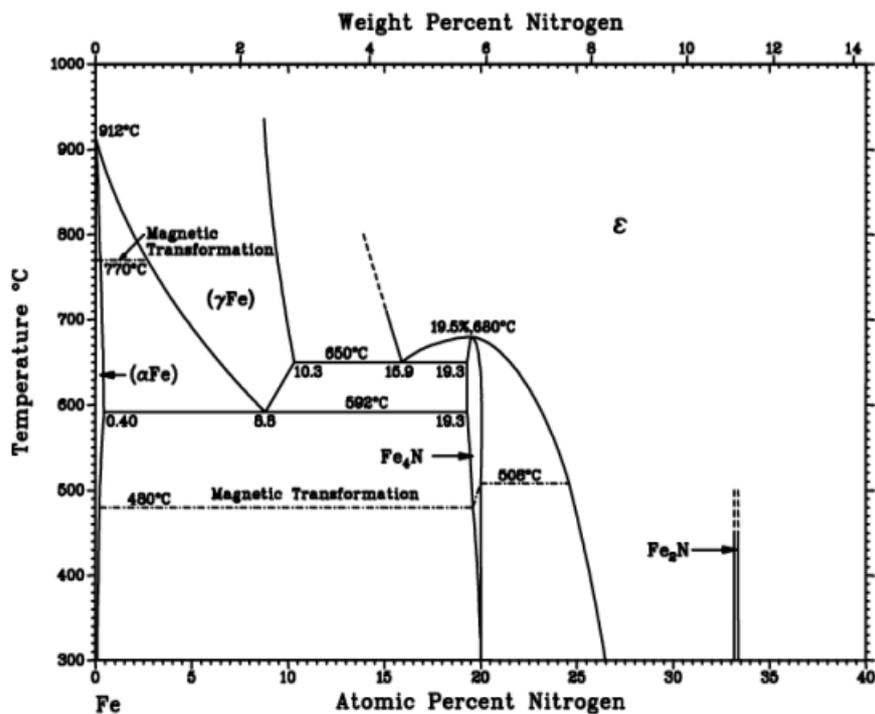
J = aliran atom (jumlah atom)

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 γ' (Fe_4N). Jika kelarutan nitrogen pada besi melebihi 6 %, nitrida γ' (Fe_4N) akan berubah menjadi ϵ (Fe_{2-3}N). Pada temperatur dibawah 500 °C dengan kadar nitrogen lebih dari 11 % maka nitrida (Fe_2N) akan segera terbentuk dan diatas 650 °C Fe_4N akan terurai. Nitrida γ' dan ϵ 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

Sifat	Nilai
Rumus Kimia	N ₂
Berat Molekul	28,01
Densitas	0,072 lb/ft ³
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 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*)

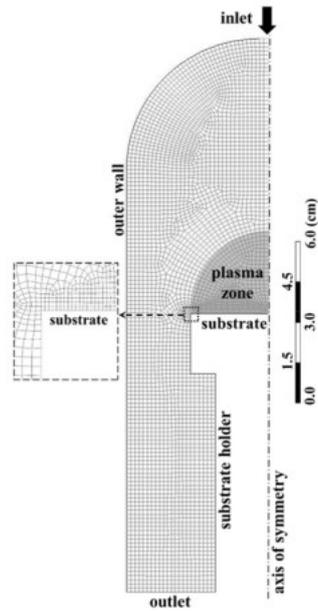
Metode SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*) adalah penyempurnaan dari metode SIMPLE yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses iterasi. Metode ini menerapkan modifikasi pada tahapan penyesuaian tekanan dan kecepatan untuk menurunkan tingkat keterkaitan antar variabel, sehingga mempercepat konvergensi 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

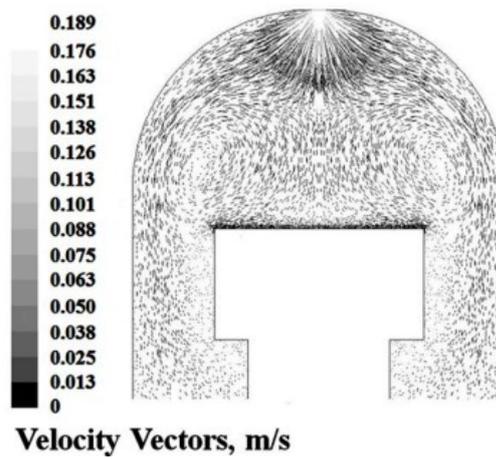
Metode COUPLED atau Algoritma Kopel adalah metode yang menyelesaikan persamaan momentum dan kontinuitas secara bersamaan dalam satu sistem persamaan aljabar. Penyelesaian ini memungkinkan metode COUPLED untuk mengatasi keterkaitan yang kuat antara kecepatan dan tekanan dalam aliran fluida kompresibel 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]