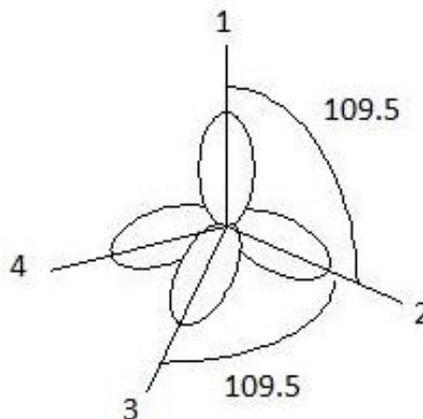


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Diamond-Like Carbon (DLC)*

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



**Gambar 2.1** Sudut orbital  $sp^3$  [12]

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

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

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

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

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

## **2.2 Chemical Vapour Deposition (CVD)**

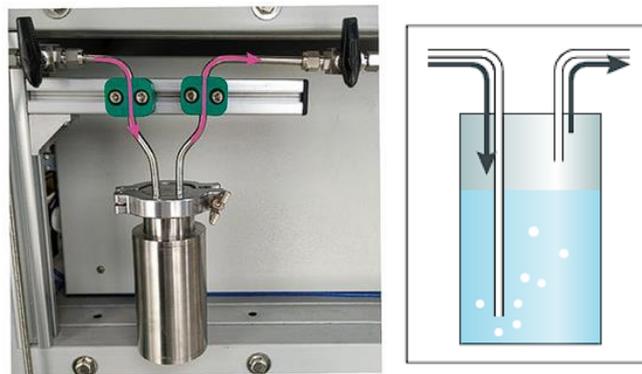
*Chemical vapour deposition* (CVD) merupakan teknologi yang efisien untuk memproduksi lapisan tipis padat berkualitas tinggi. Meskipun banyak digunakan dalam industri modern, teknologi CVD semakin dikembangkan karena disesuaikan dengan material baru. Pada industri terkini sintesis CVD didorong ke tingkat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

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

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

### 2.2.1 Sistem Pengiriman Gas

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



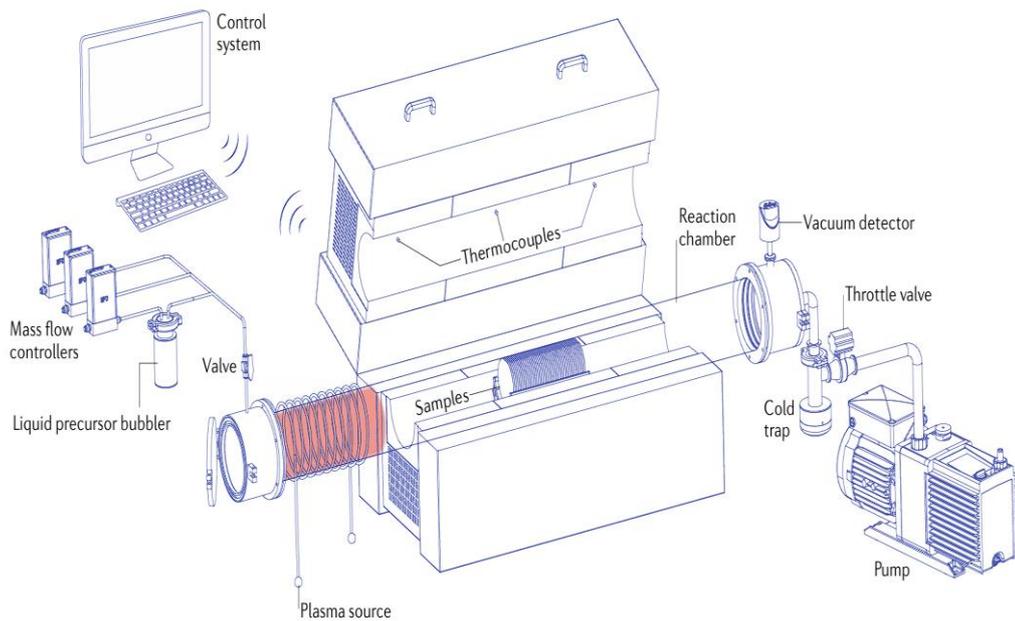
**Gambar 2.2** *Liquid precursor bubbler*[4]

### 2.2.2 Ruang Reaksi

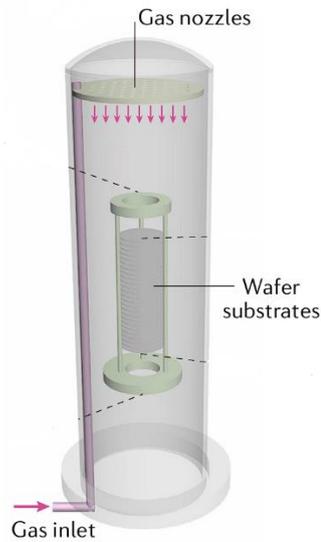
Konfigurasi horizontal yang ditunjukkan Gambar 2.3 dan vertikal pada Gambar 2.4 merupakan dua konfigurasi utama ruang reaksi. Ruang

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

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



**Gambar 2.3** Konfigurasi Horizontal CVD [4]



**Gambar 2.4** Konfigurasi Vertikal CVD [20]

### 2.2.3 Sistem Vakum

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



**Gambar 2.5** Pengukur Bourdon [20]



**Gambar 2.6** Manometer Kapasitansi [20]

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

#### **2.2.4 Sistem Energi**

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

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

### **2.2.5 Sistem Pengolahan Gas Buang**

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

## **2.3 Jenis dan Metode CVD**

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

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

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

c) *Oxidative CVD*, menggunakan uap oksidan dan monomer yang mengalami reaksi spontan setelah adsorpsi ke substrat. CVD oksidatif menghasilkan polimerisasi pertumbuhan bertahap dan biasanya menghasilkan lapisan polimer konduksi dan semikonduktor.

2. Berdasarkan pemanasan substrat

a) *Hot-wall CVD*, pada metode ini seluruh ruang reaksi dipanaskan oleh tungku eksternal dengan temperatur yang seragam.

b) *Cold-wall CVD*, dalam metode dinding dingin ini hanya substrat dan sekitarnya yang dipanaskan. Sedangkan itu, dinding reaktornya tetap dibiarkan dingin pada temperatur kamar sehingga memungkinkan pemanasan dan pendinginan secara cepat.

3. Berdasarkan tekanan operasi

a) *Atmospheric-pressure CVD*, proses CVD yang dilakukan pada tekanan atmosfer. Proses ini tidak memerlukan pompa vakum dan menghasilkan laju aliran gas reaktif yang lambat.

b) *Low-pressure CVD* merupakan proses CVD dengan tekanan rendah. Pengurangan tekanan ini dilakukan dengan tujuan untuk memperbaiki distribusi lapisan pada target substrat dan mengurangi reaksi fasa gas yang tak diinginkan. Metode ini menggunakan pompa vakum untuk menggerakkan aliran gas.

a) *Ultra-high vacuum CVD*, merupakan metode CVD yang dilakukan pada tekanan yang sangat rendah di bawah  $10^{-6}$  Pa, sehingga transportasi gas dicapai dengan aliran molekuler dan tidak memiliki efek hidrodinamika seperti lapisan batas.

4. Metode dengan penggunaan plasma

a) *Microwave plasma CVD*, adalah metode untuk memproduksi lapisan tipis dengan menggunakan gelombang mikro untuk

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

- b) *Plasma-enhanced CVD*, adalah proses deposisi uap kimia yang digunakan untuk mendeposisikan lapisan tipis dari bentuk gas ke bentuk padat di atas substrat. Salah satu keuntungan utama PECVD dibandingkan CVD konvensional adalah temperatur deposisi yang lebih rendah sehingga menciptakan lebih sedikit tekanan di antara lapisan tipis yang memiliki koefisien ekspansi atau kontraksi termal yang berbeda.
- c) *Remote plasma-enhanced CVD*, metode ini serupa dengan PECVD terkecuali pada pembentukan plasma, di mana dalam RPECVD plasma dihasilkan di ruang terpisah yang dikenal sebagai sumber plasma dan kemudian diangkut ke ruang pengendapan.

5. Berdasarkan konfigurasi reaktor CVD

- a) *Horizontal CVD*, merupakan konfigurasi CVD dengan reaktor horizontal. Konfigurasi ini memungkinkan aliran gas sejajar dengan substrat. Reaktor horizontal mudah dibuat dan dimodifikasi untuk tujuan eksperimental, bersih dari sudut pandang kemurnian semikonduktor, dan pengoperasiannya cukup efisien.
- b) *Vertical CVD*, reaktor dengan desain vertikal di mana aliran gas biasanya tegak lurus dengan substrat. Keuntungan sebenarnya dari desain aliran gas vertikal adalah gas reaktan yang dapat dipasok secara terus-menerus sehingga menghilangkan masalah penipisan hilir. Karena kemampuan beban wafernya, desain ini sering digunakan di laboratorium atau jalur fabrikasi kecil

6. *Metal-organic CVD (MOCVD)*, menggunakan prekursor logam-organik berupa cairan beracun yang diuapkan untuk membentuk lapisan tipis. MOCVD banyak digunakan untuk melakukan sintesis semikonduktor senyawa III – V yang terbuat dari unsur-unsur dari golongan III dan V dalam tabel periodik.

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

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

## 2.4 Tipe Reaksi CVD

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

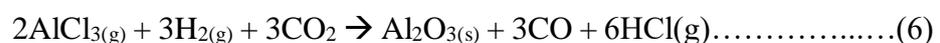
- a) Pirolisis, merupakan proses dekomposisi atau penguraian senyawa dalam fase gas dengan pemanasan pada temperatur tinggi. Proses ini dapat mendepositkan juga Al, Ti, Pb, Mo, Fe, B, Zr, C, Si, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub> [23][24].



- b) Reduksi, proses ini menggunakan gas hidrogen yang berfungsi untuk mengurangi halida, oksihalida, dan karbonil halida. Pada propana dan asetilena, proses ini dapat membentuk senyawa hidrokarbon lain. Selain itu, proses ini dapat mendepositkan juga Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, dan ZnO.



- c) Oksidasi, oksida dihasilkan dengan menggunakan gas oksigen. Proses ini dapat mendepositkan juga TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SnO<sub>2</sub>, dan ZnO. Proses ini tidak terlibat dalam pembentukan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.



- d) Pembentukan senyawa, proses ini melibatkan reaksi kimia untuk pembentukan senyawa baru. Dalam proses CVD, pembentukan senyawa berpotensi mengarah pada pembentukan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> atau C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.



- e) Disproporsionasi, salah satu jenis reaksi redoks, di mana logam padat dapat terdeposit jika terdapat dua valensi atom untuk logam dengan temperatur stabil yang berbeda. Proses ini tidak terlibat dalam pembentukan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.



- f) Perpindahan reversibel, dapat terjadi proses deposisi bergantung pada temperatur dan arah aliran gas. Meskipun reaksi ini dapat terjadi pada metode CVD, proses ini tidak terlibat secara langsung dalam pembentukan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.



## 2.5 Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)

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

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

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

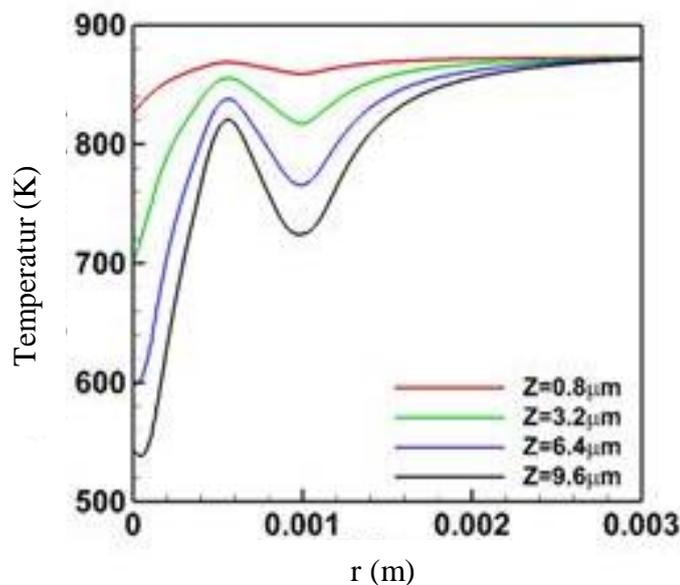


Keuntungan penting dari proses PECVD yaitu kemampuan untuk memasukkan bahan prekursor yang berbeda selama proses pelapisan, di mana kemampuan tersebut dapat mengubah komposisi lapisan atau memasukkan beberapa lapisan material selama pertumbuhan. Hal ini memungkinkan pembentukan lapisan adhesi pada antarmuka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

Gas hidrokarbon seperti asetilena ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) dan propana ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) dapat digunakan sebagai gas prekursor dalam PECVD untuk mendepositkan lapisan karbon amorf terhidrogenasi (a-C:H). Pemilihan gas hidrokarbon dapat

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

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



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

## 2.6 Gas Hidrokarbon

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

### 2.6.1 Asetilena

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

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

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

**Tabel 2.1** Sifat Kimia Asetilena

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

### 2.6.2 Propana

Propana merupakan jenis hidrokarbon dengan rumus molekul C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> yang berupa gas pada temperatur dan tekanan standar, tetapi dapat dimampatkan menjadi cairan yang dapat dialirkan. Propana merupakan produk sampingan dari pemrosesan gas alam dan penyulingan minyak bumi yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar. Propana termasuk salah satu dari sekelompok *liquefied petroleum gas* (LPG), dari jenis lainnya seperti butana, propilena, butadiena, butilena, isobutilena, dan campurannya.

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

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

**Tabel 2.2** Sifat Kimia Propana

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

## 2.7 Simulasi Proses

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

- a. Pengembangan teknologi baru berkelanjutan yang bertujuan untuk

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

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

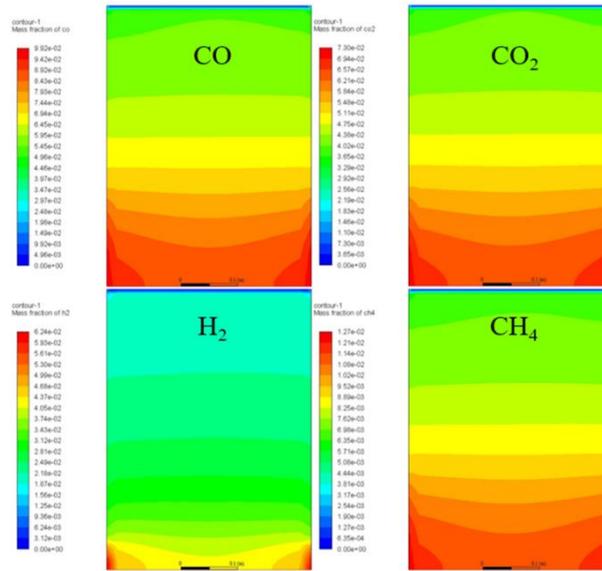
Simulasi proses yang didasarkan pada model ini harus mencerminkan realitas pada tingkat akurasi yang dibutuhkan oleh aplikasi. Memiliki pengetahuan yang baik tentang latar belakang pemodelan sangat penting untuk mendapatkan hasil yang dapat diandalkan dan menggunakan perangkat lunak secara efektif. Perbedaan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

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

## 2.8 ANSYS 2023 R2

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

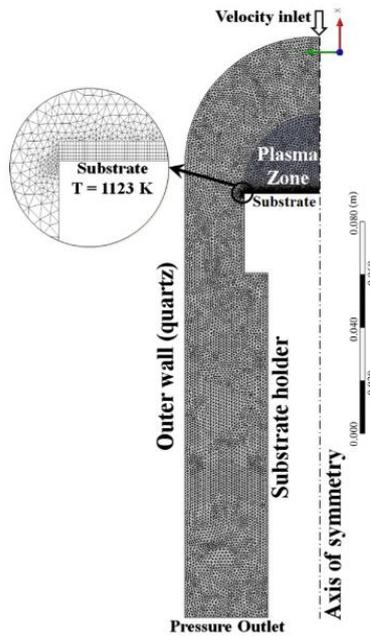
Penggunaan *software* ANSYS *Fluent* dapat menjadi pendekatan terbaik yang menampilkan prediksi yang jelas. Dengan menggunakan teknik *computational fluid dynamics* (CFD), aliran fluida dan fenomena yang terkait seperti perilaku momentum perpindahan panas dan massa dapat diprediksi dengan menggunakan metode penyelesaian numerik. Model matematis tersebut meliputi konservasi massa, momentum, energi, spesies, dan efek gaya internal dan eksternal. Simulasi CFD terbukti menjadi alat yang cukup berpengaruh untuk penelitian dan pengembangan saat ini untuk simulasi perpindahan panas dan pemodelan penukar panas, khususnya pada sistem yang melibatkan aliran multifase. ANSYS *Fluent* dikenal sebagai perangkat lunak yang canggih untuk menganalisis pengaruh sifat fluida dan aliran gas yang melalui sistem. Kelebihan lain dari ANSYS *Fluent* adalah gambar yang dikembangkan untuk perilaku aliran di dalam benda seperti pipa dapat dengan mudah divisualisasikan dengan gambar penuh warna sehingga dapat dianalisis dengan baik [37]. ANSYS *Fluent* mampu menyelesaikan persamaan diferensial parsial nonlinier yang menggambarkan kekekalan massa, momentum, dan energi. Sebagai contohnya pada Gambar 2.12 menampilkan komposisi syngas dan distribusi dari masing-masing gas sintesis di dalam reaktor yang terdiri dari CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub>. Distribusi gas dalam reaktor sangat terkonsentrasi di bagian bawah dan tengah reaktor.



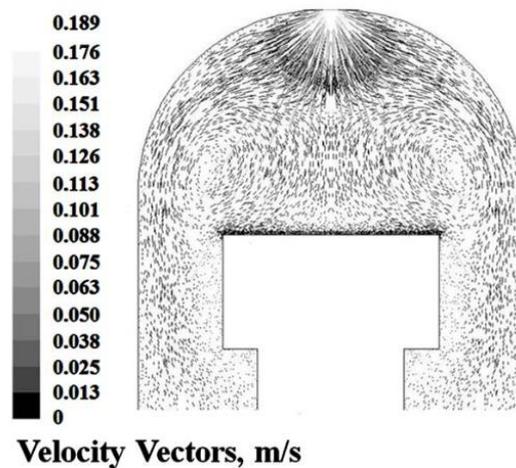
**Gambar 2.8** Distribusi Gas dalam Reaktor pada 7200s [38]

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

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



**Gambar 2.9** Domain Komputasi Dua Dimensi [10]



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

## 2.9 Pemodelan Matematika

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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