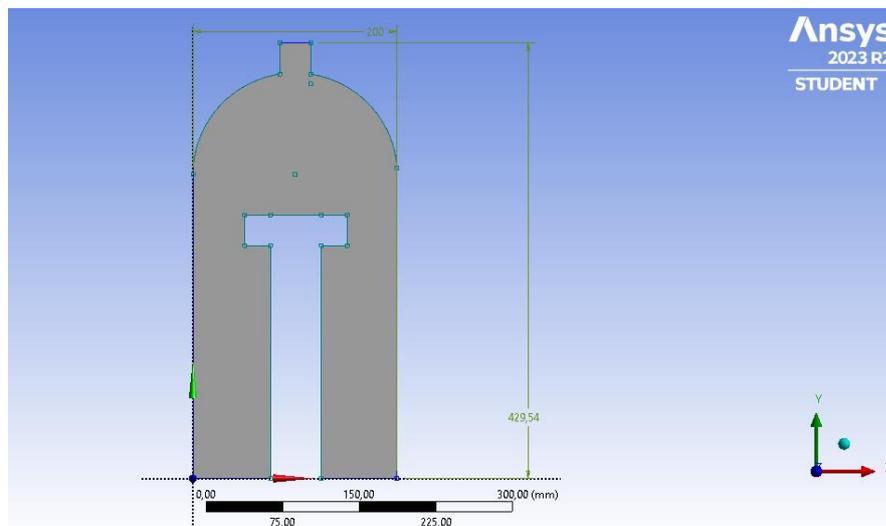


## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Penelitian

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

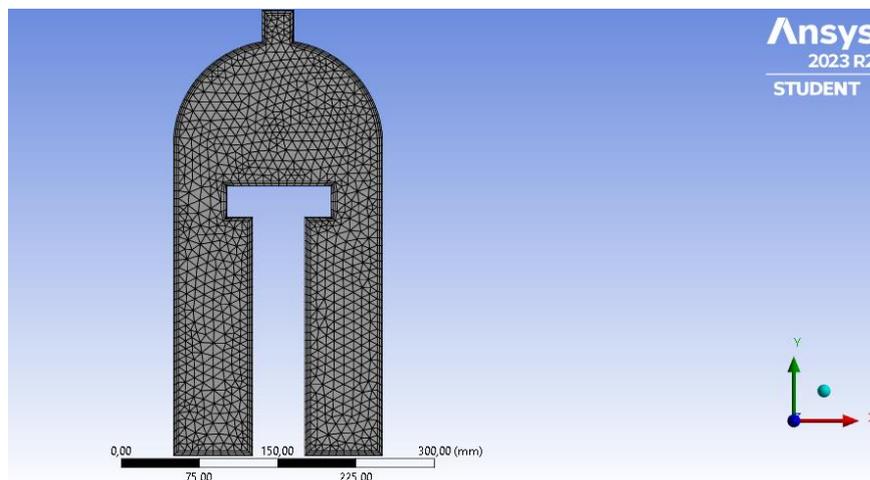


**Gambar 4.1** Model Geometri *Plasma Chamber*

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

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

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



**Gambar 4.2** Hasil *Meshing* Model *Plasma Chamber*

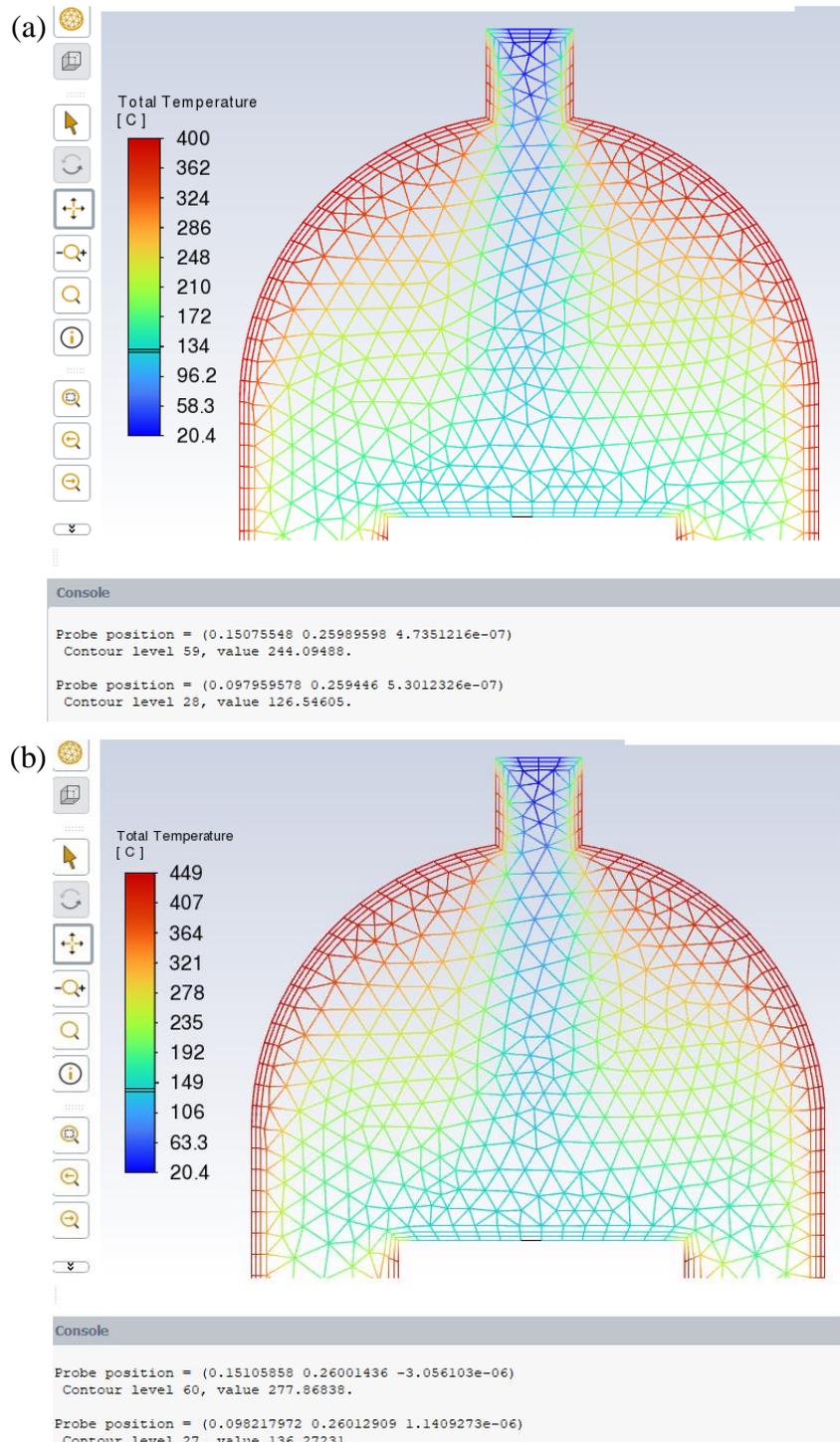
Model yang telah melalui proses *meshing* kemudian dimasukkan parameter simulasinya. Parameter ini bekerja di setiap bagian pada model yang telah ditentukan sebelumnya, seperti area fluida, *inlet*, *outlet*, dinding reaktor, dan

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

#### **4.2 Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Gas**

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

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



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

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

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

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

### **4.3 Pengaruh Temperatur terhadap Laju Alir Gas**

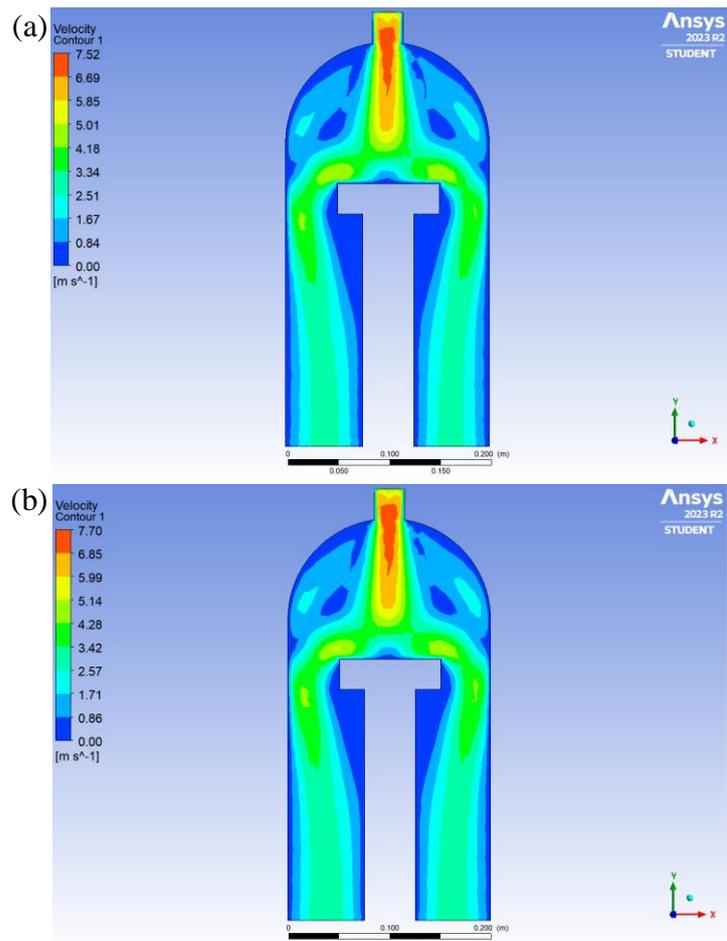
Perbedaan penggunaan temperatur di dalam reaktor ini tidak hanya mempengaruhi temperatur substrat, melainkan beberapa aspek lainnya. Gas yang diinjeksikan dengan kecepatan 5 m/dtk akan mengalami perubahan laju alir selama di dalam reaktor karena adanya perubahan temperatur gas prekursor. Gas prekursor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

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

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

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

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

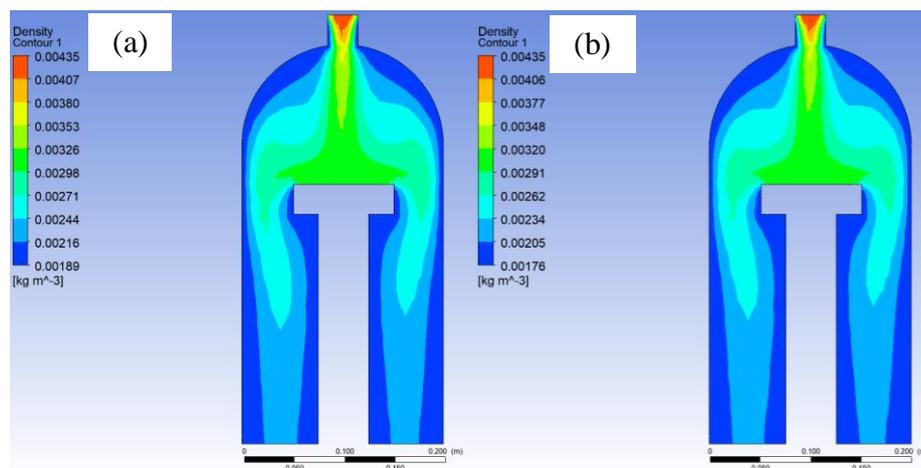


**Gambar 4.4** Kontur Kecepatan Alir Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C

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

#### 4.4 Pengaruh Temperatur terhadap Densitas Gas

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

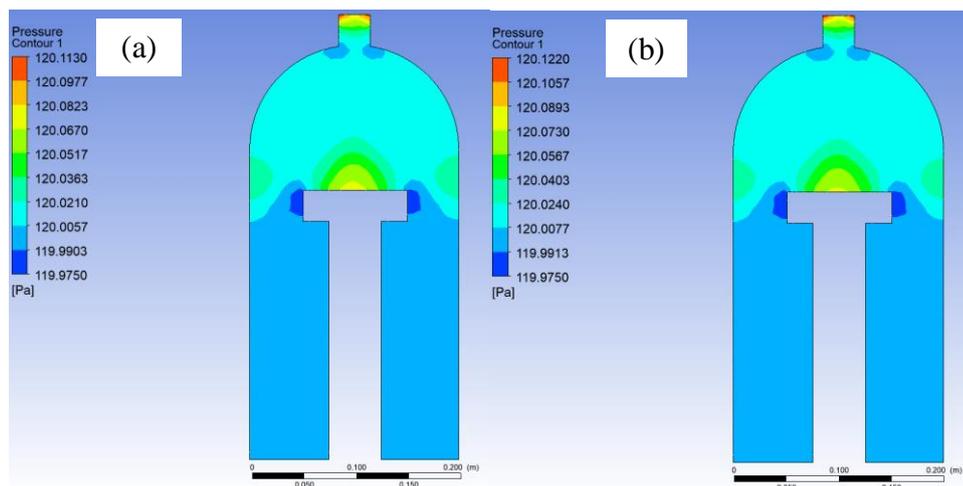


**Gambar 4.5** Kontur Perubahan Densitas Gas Propana pada Temperatur Gas (a) 400°C, dan (b) 450°C

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

#### 4.5 Pengaruh Temperatur terhadap Tekanan Gas

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

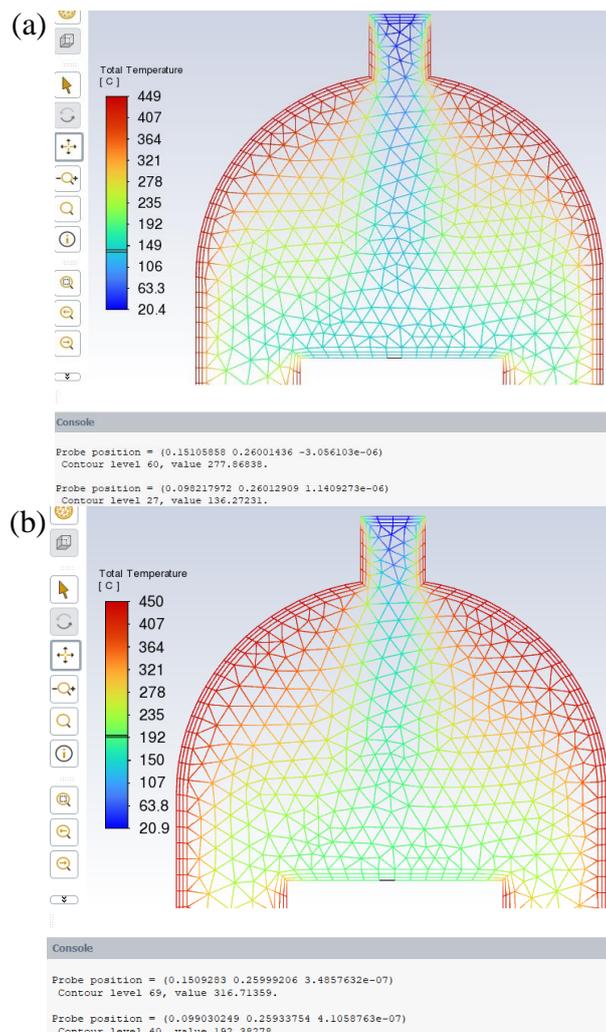
$$P_c V_c = 0,333 RT_c \dots\dots\dots(31)$$

#### 4.6 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Distribusi Temperatur

Penggunaan gas hidrokarbon berbeda sebagai gas prekursor pada model simulasi juga dianalisis pada penelitian ini, di mana hasil menunjukkan perbedaan pada variabel yang diamati. Simulasi pengaruh jenis gas hidrokarbon dilakukan dengan penggunaan gas propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) dan asetilena (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), Kedua jenis pengujian simulasi dijalankan pada temperatur 450°C dengan kecepatan alir gas 5

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

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



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

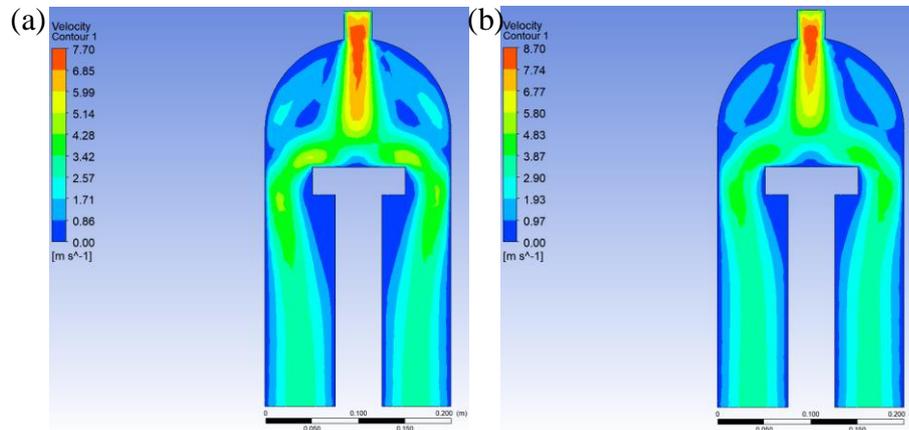
Pada peta distribusi temperatur yang ditunjukkan Gambar 4.7 dapat dilihat temperatur pada area substrat berada pada titik yang berbeda-beda. Penggunaan gas hidrokarbon propana dan gas asetilena pada temperatur pemanasan gas 450°C menunjukkan temperatur substrat yang berbeda. Temperatur substrat pada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

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

#### **4.7 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Laju Alir Gas**

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

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



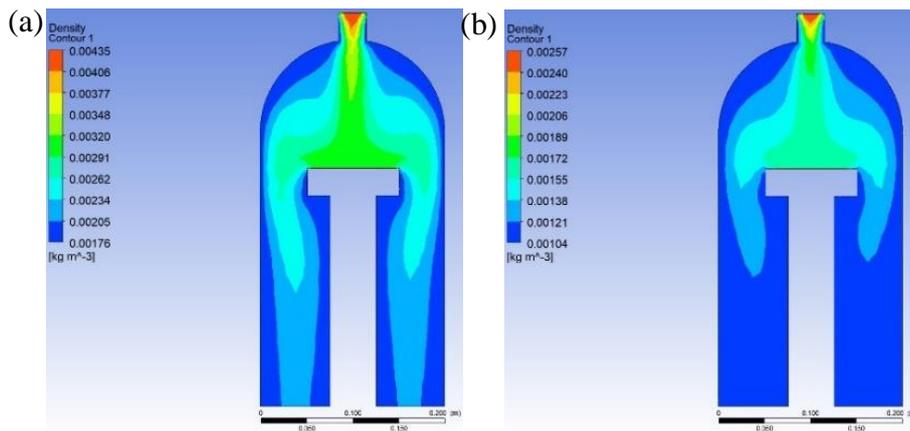
**Gambar 4.8** Kontur Laju Alir Gas dengan Parameter Gas Prekursor (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

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

#### 4.8 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Perubahan Densitas Gas

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

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



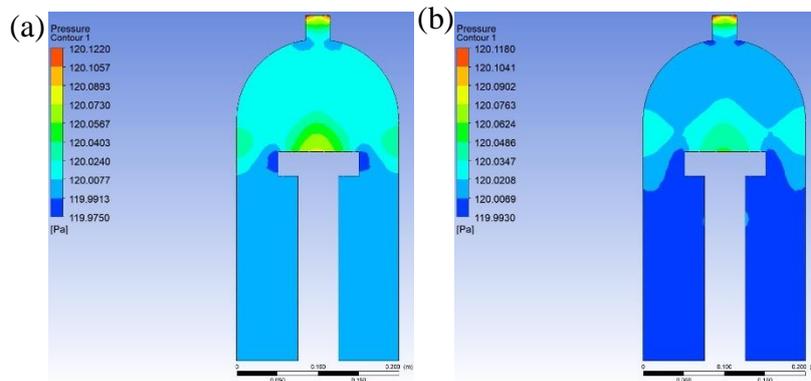
**Gambar 4.9** Kontur Densitas Gas dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

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

#### 4.9 Pengaruh Jenis Gas Hidrokarbon terhadap Perubahan Tekanan Gas

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

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



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

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

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

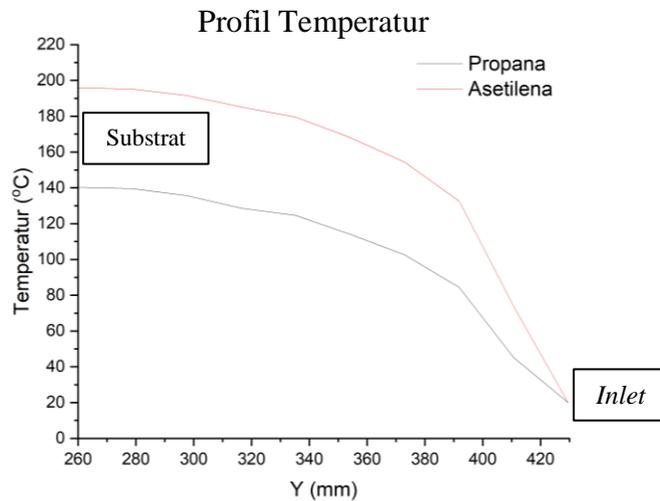
tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan tekanan pada gas propana. Hal ini dikarenakan jumlah molekul gas atau densitas memiliki dampak yang lebih langsung terhadap jumlah benturan dengan dinding reaktor yang menciptakan tekanan, sehingga penurunan densitas memiliki efek yang lebih besar pada tekanan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

#### **4.10 Profil Temperatur Hubungan Jenis Gas Hidrokarbon**

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

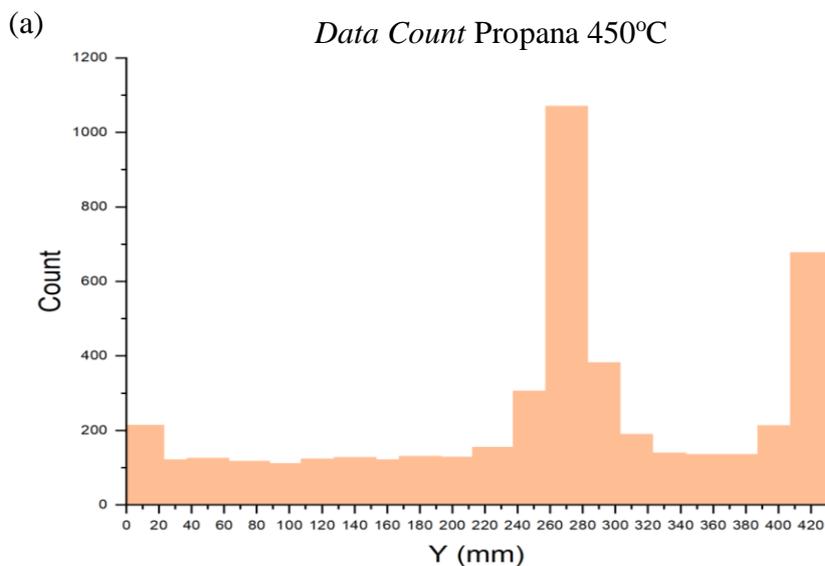
Perubahan temperatur dapat diamati dalam bentuk grafik profil temperatur. Pada profil temperatur, masing-masing gas mengalami kenaikan yang cukup tinggi. Perbedaan antar temperatur yang berbeda pada gas prekursor yang sama tidak terlalu besar. Sedangkan penggunaan gas prekursor yang berbeda menunjukkan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

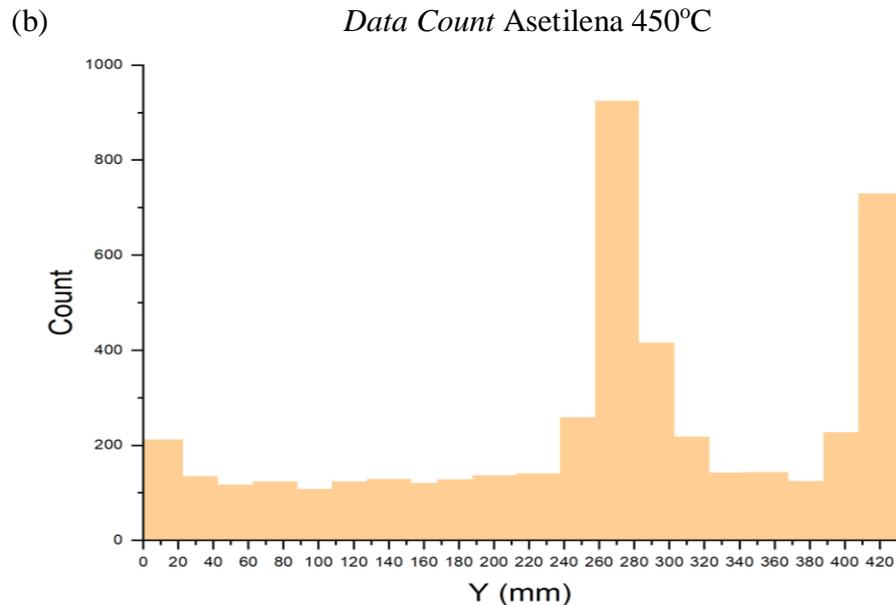
menunjukkan nilai yang berbanding terbalik, sehingga sesuai dengan persamaan gas Redlich-Kwong pada persamaan (31) tentang karakteristik gas sebenarnya.



**Gambar 4.11** Profil Temperatur Sepanjang *Inlet* ke Substrat

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





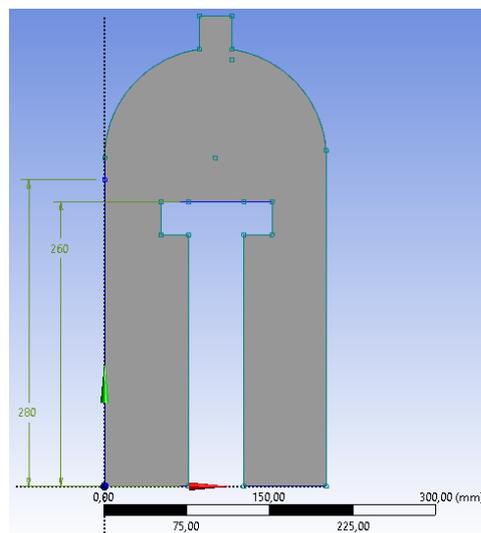
**Gambar 4.12** *Data Count* Simulasi dengan Parameter Gas (a) Propana pada 450°C, dan (b) Asetilena pada 450°C

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

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

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

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



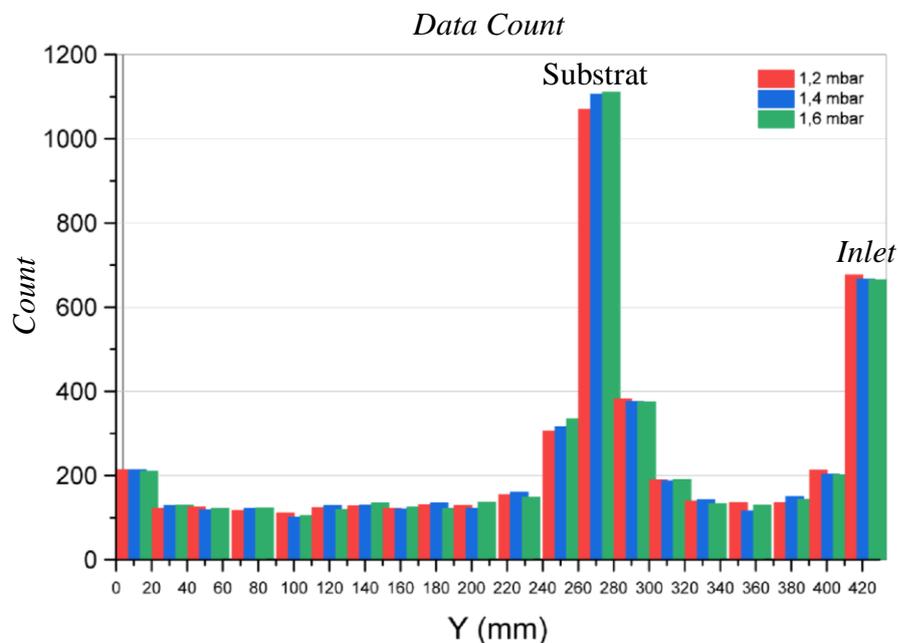
**Gambar 4.13** Koordinat Nilai Optimal pada Reaktor

#### 4.11 Perbandingan Variabel Utama pada Tekanan Berbeda

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

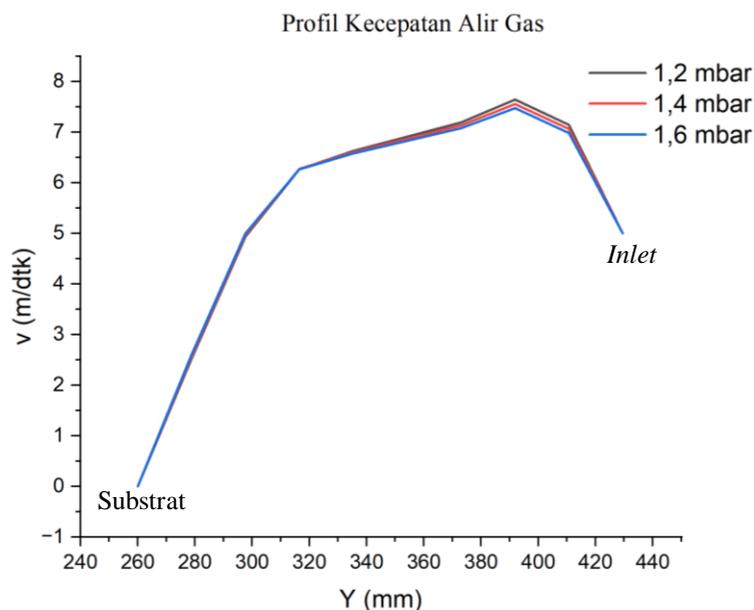
*count*. Pemilihan *data count* tertinggi sebagai sampel ini dengan pertimbangan bahwa banyaknya sel yang terkalkulasi pada satu model simulasi mewakili hasil simulasi yang terbaik pada variabel utama yaitu temperatur dan jenis gas hidrokarbon pada temperatur 1,2 mbar (120 Pa). Berdasarkan hasil simulasi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

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



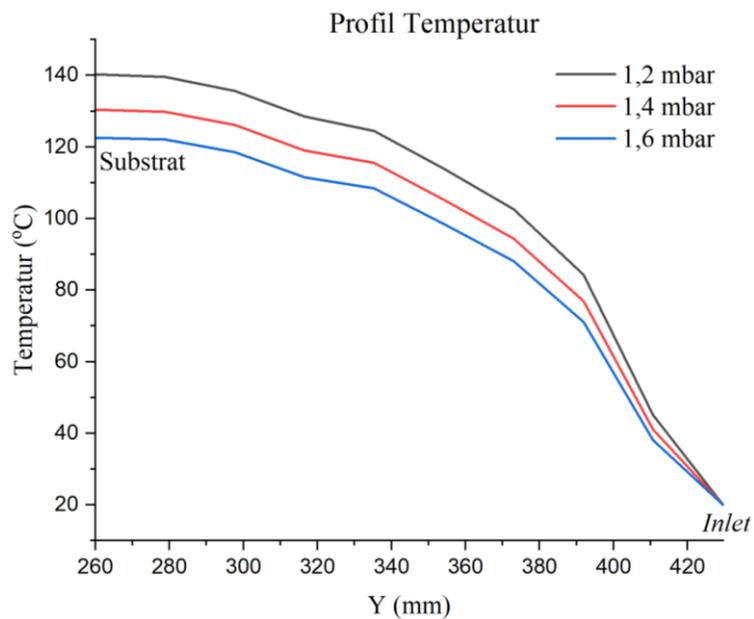
**Gambar 4.14** Pengaruh Perbedaan Tekanan terhadap *Data Count*

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



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

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



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