Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 14, No. 3, Tahun 2026
Online: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm

ANALISIS EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK PLASMA DALAM *COMBUSTION CHAMBER*

***Rizal Burhani Ilyas[1], Susilo Adi Widyanto[2], Mochammad Ariyanto[2]**
[1]Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
[2]Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059
*E-mail: rizalburhaniilyas@gmail.com

Abstrak

Plasma combustion merupakan teknologi yang memanfaatkan gas terionisasi untuk meningkatkan efisiensi pembakaran melalui percepatan penyalaan, peningkatan stabilitas nyala api, dan perbaikan distribusi energi termal. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi tekanan udara dan diameter *outlet nozzle* terhadap karakteristik aliran udara, distribusi tekanan total, dan distribusi temperatur pada *plasma combustion chamber* menggunakan pendekatan eksperimen dan simulasi numerik. Simulasi dilakukan dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada ANSYS Fluent dengan variasi tekanan 1 hingga10 bar dan diameter *outlet nozzle* 1,5; 1,7; 2,0; 2,2; dan 2,5 mm. Model numerik divalidasi menggunakan data eksperimen panjang nyala *plasma arc cutting* melalui perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan koefisien determinasi (R^2). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan meningkatkan kecepatan aliran, tekanan total, dan panjang distribusi temperatur. Pada tekanan rendah, diameter 2,0 mm menghasilkan kecepatan maksimum, sedangkan pada tekanan tinggi diameter 2,5 mm memberikan performa terbaik dengan tekanan total lebih tinggi dan distribusi temperatur lebih panjang. Hasil validasi menunjukkan nilai MAPE sebesar 0,9% dan R^2 0,902, sehingga model numerik mampu merepresentasikan karakteristik plasma dengan baik.

Kata kunci: aliran udara; *computational fluid dynamics (cfd)*; distribusi temperatur; *plasma combustion chamber*; tekanan total

Abstract

Plasma combustion is a technology that utilizes ionized gas to improve combustion efficiency by accelerating ignition, enhancing flame stability, and improving thermal energy distribution. This study aims to analyze the effects of air pressure and outlet nozzle diameter on airflow characteristics, total pressure distribution, and temperature distribution in a plasma combustion chamber using experimental and numerical approaches. Numerical simulations were conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) in ANSYS Fluent with air pressures ranging from 1 to 10 bar and outlet nozzle diameters of 1.5, 1.7, 2.0, 2.2, and 2.5 mm. The numerical model was validated against experimental plasma arc cutting flame length data using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and the coefficient of determination (R^2). The results show that increasing air pressure enhances airflow velocity, total pressure, and temperature distribution length. At low pressure, the 2.0 mm nozzle produced the highest velocity, whereas at higher pressure the 2.5 mm nozzle achieved the best performance, providing higher total pressure and a longer temperature distribution. The validation yielded a MAPE of 0.9% and an R^2 of 0.902, indicating that the numerical model can accurately represents plasma characteristics..

Keywords **:** *airflow*; *Computational Fluid Dynamics (CFD)*; *plasma combustion chamber*; *temperature distribution*; *total pressure*

1. Pendahuluan

Batubara masih menjadi sumber energi utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) karena ketersediaannya yang melimpah, biaya pembangkitan yang relatif rendah, dan kemampuannya menyediakan *baseload power*, meskipun peningkatan efisiensi pembakaran dan pengurangan emisi masih menjadi tantangan [1]. Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah *plasma combustion*, yang memanfaatkan gas terionisasi

untuk meningkatkan proses penyalaan, stabilitas nyala api, dan distribusi energi termal [2]. Pada sistem berbasis *plasma arc cutting* (PAC), karakteristik aliran sangat dipengaruhi oleh tekanan operasi dan geometri nozzle [3]. Pengukuran distribusi aliran, tekanan, dan temperatur pada kondisi plasma sulit dilakukan secara eksperimen, sehingga metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) banyak digunakan untuk menganalisis fenomena tersebut [4]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa variasi tekanan inlet, diameter *outlet*, *throat*, dan *divergence angle nozzle* berpengaruh terhadap distribusi kecepatan, tekanan, temperatur, serta karakteristik jet plasma [5]. Namun, kajian yang mengombinasikan eksperimen dan simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan udara dan diameter *outlet nozzle* terhadap karakteristik aliran udara, distribusi tekanan total, dan distribusi temperatur pada *plasma combustion chamber* berbasis PAC masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan simulasi CFD pada ANSYS Fluent yang divalidasi dengan data eksperimen panjang nyala plasma untuk mendukung optimasi desain nozzle dan pengembangan teknologi *plasma combustion* yang lebih efisien.

2. Metode Penelitian

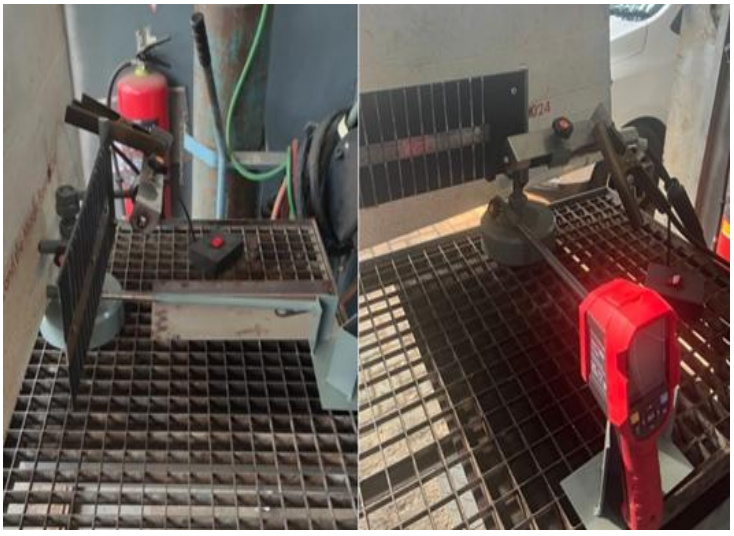
2.1 Proses Eksperimen

Data acuan simulasi diperoleh dari eksperimen menggunakan mesin *plasma arc cutting* dengann spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Dengan parameter eksperimen menggunakan arus listrik sebesar 30 A hingga 60 A, dan tekanan udara kerja sebesar 1 hingga 5 bar. Udara bertekanan yang digunakan sebagai gas kerja disuplai oleh kompresor dan diatur menggunakan regulator agar tekanan yang masuk ke *plasma torch* sesuai dengan variasi pengujian. Variasi geometri dilakukan menggunakan lima *nozzle* dengan diameter *outlet* sebesar 1,5 mm, 1,7 mm, 2,0 mm, 2,2 mm, dan 2,5 mm.

Tabel 1. Spesifikasi *Plasma Arc Cutting*

Parameter	Simbol/Satuan	Nilai
Input Voltage	V	AC 380, 3 *Phase*
Input Frequency	Hz	50/60
Current Range	A	20–60
Duty Cycle	%	60
Air Pressure	MPa	0,4–0,5
Cutting Thickness	mm	20

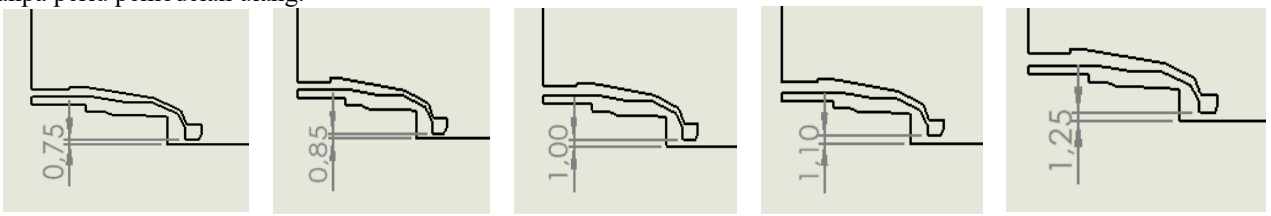
Kemudian *plasma torch* dipasang pada dudukan agar posisinya tetap selama eksperimen, sedangkan plat pengukur diposisikan sejajar dengan arah semburan plasma untuk memudahkan pengukuran panjang nyala plasma. Dokumentasi dilakukan menggunakan kamera dan *thermo gun* digital pada dudukan dengan posisi tetap agar sudut pengambilan gambar konsisten, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Panjang nyala plasma diukur dari ujung *nozzle* hingga ujung nyala yang masih terlihat jelas, dengan setiap kombinasi parameter diuji sebanyak dua kali pengulangan untuk meningkatkan konsistensi data. Data panjang nyala plasma yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam proses validasi hasil simulasi CFD.



Gambar 1. *Setup* Eksperimen

2.2 *Meshing*

Geometri *nozzle* hasil eksperimen dimodelkan ulang menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2022 mengikuti lima variasi diameter *outlet* yang digunakan pada eksperimen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Model geometri kemudian diimpor ke ANSYS DesignModeler dalam format IGES agar dapat langsung digunakan pada tahap simulasi tanpa perlu pemodelan ulang.



(a) (b) (c) (d) (e)

Gambar 2. Geometri *Nozzle* (a) 1,5mm (b) 1,7 mm (c) 2,0 mm (d) 2,2 mm (e) 2,5 mm

Selanjutnya proses *meshing* dilakukan menggunakan pendekatan *edge sizing* pada dinding *nozzle* untuk memastikan detail aliran yang krusial dapat tertangkap dengan baik sehingga akurasi simulasi tetap terjaga. Hasil *meshing* yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 3, dengan nilai *skewness* sebesar 0,632 dan jumlah elemen sebanyak 64.310, yang berdasarkan standar kualitas mesh tergolong dalam kategori baik untuk mendukung proses simulasi numerik.

Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
Min	1,3057e-010
Max	0,63185
Average	2,9481e-002
Standard Deviation	6,2415e-002
Nodes	64886
Elements	64310

Gambar 3. Hasil *Meshing*

2.3 *Setup* Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS Fluent 2022 R1 dengan solver berbasis tekanan (*pressure based*) serta asumsi aliran *axisymmetric* dan *steady state*. Model turbulensi standard k–ω dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi perilaku aliran gas kompresibel, khususnya pada kondisi dengan gradien tekanan dan kecepatan yang tinggi. Udara dimodelkan sebagai ideal gas mengingat temperatur tinggi akibat ionisasi pada plasma torch, dengan kondisi operasi tekanan atmosfer sebesar 101.325 Pa. Kondisi batas pada *inlet* menggunakan tipe *pressure inlet* sesuai dengan variasi tekanan 1 hingga 10 bar yang akan disimulasikan, sedangkan metode kalkulasi menggunakan skema *coupled* dengan pengaturan *controls* mengikuti default ANSYS. Proses inisialisasi dilakukan secara *hybrid*, dan iterasi dijalankan sebanyak 1000 kali hingga solusi numerik mencapai kondisi konvergen.

2.4 *Grid Independence Test*

Pengujian independensi grid (*Grid Independence Test*/GIT) dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi dipengaruhi oleh kerapatan grid yang digunakan. Pengujian dilakukan pada tujuh variasi ukuran *mesh* dengan parameter tinjauan berupa laju aliran massa (*mass flow rate*) pada *inlet*, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil *Grid Independence Test*

Elements (mm)	Total Nodes	Total Elements	$\dot{m}$ inlet	*Error* (%) ($\dot{m}$ inlet)
1	12149	11785	0,000337406	-
0.9	14623	14242	0,000341224	1,1
0.7	22815	22393	0,000341585	0,1
0.6	30273	29813	0,0003356	1,8
0.5	42563	42066	0,000337842	0,7
0.4	**64886**	**64310**	**0,000336128**	**0,5**
0.3	112376	111701	0,000338273	0,6

Hasil uji independensi grid menunjukkan bahwa ukuran *mesh* 0,4 mm merupakan ukuran optimal pada studi ini, dengan persentase *error* sebesar 0,5%, sehingga ukuran mesh tersebut digunakan pada seluruh simulasi selanjutnya.

2.5 Validasi

Validasi model numerik dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu validasi kuantitatif dan validasi kualitatif. Pendekatan ini digunakan karena parameter yang diperoleh dari eksperimen berupa panjang nyala plasma, sedangkan parameter hasil simulasi berupa kecepatan aliran udara (*velocity*) yang memiliki satuan berbeda sehingga tidak dapat dibandingkan secara langsung. Oleh karena itu, kedua data terlebih dahulu dinormalisasi terhadap nilai maksimum masing-masing menggunakan Persamaan (1).

$$X_{norm} = \frac{X_i}{X_{max}} \tag{1}$$

Dengan X_i adalah data yang akan dinormalisasi dan X_{maks} adalah nilai maksimum dari data yang akan dinormalisasi. Tingkat kesesuaian antara data eksperimen dan simulasi yang telah dinormalisasi selanjutnya dievaluasi menggunakan *mean absolute percentage error* (MAPE) sesuai Persamaan (2).

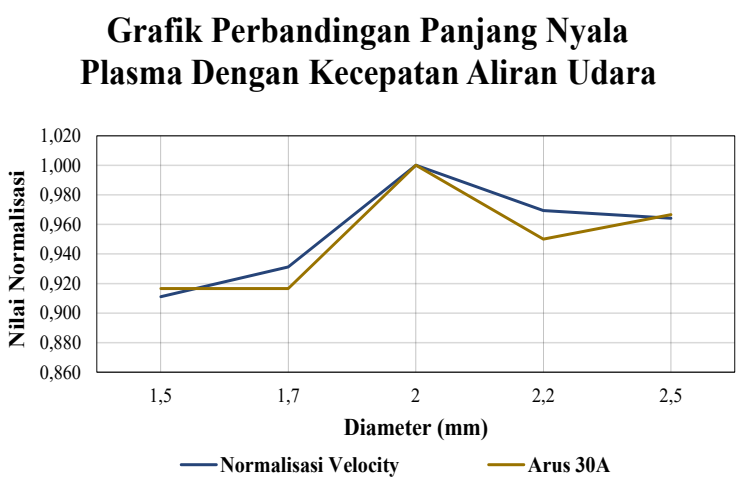
$$MAPE = \left| \frac{X_{eksperimen} - X_{simulasi}}{X_{eksperimen}} \right| \times 100\% \tag{2}$$

Hasil perhitungan pada arus 30 A menunjukkan nilai MAPE sebesar 0,9%, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap hasil eksperimen. Selain menggunakan MAPE, validasi kuantitatif juga dilakukan menggunakan koefisien determinasi (R^2) untuk mengukur kekuatan hubungan antara hasil simulasi numerik dan hasil eksperimen, dengan nilai yang diperoleh sebesar 0,902. Nilai MAPE yang relatif rendah serta nilai R^2 yang mendekati satu menunjukkan bahwa model numerik yang dikembangkan mampu menggambarkan karakteristik aliran udara pada *plasma combustion chamber* dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan MAPE

Arus Listrik 30A					
Diameter (mm)	**Simulasi**		**Eksperimen**		**Error (%)**
	***Max Velocity* (m/s)**	**Normalisasi**	**Panjang *Plasma* Primer (mm)**	**Normalisasi Nyala *Plasma* Primer**	
1,5	560,43	0,911	2,75	0,917	0,607
1,7	572,81	0,931	2,75	0,917	1,589
2	615,11	1	3	1	0
2,2	596,3	0,969	2,85	0,95	2,044
2,5	593,05	0,964	2,9	0,967	0,262
Average Error (%)					**0,90031588**

Validasi kualitatif dilakukan dengan membandingkan kecenderungan tren antara hasil eksperimen dan hasil simulasi pada tekanan operasi sebesar 1 bar, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik perbandingan menunjukkan tren yang serupa, di mana diameter *nozzle* 2,0 mm menghasilkan performa optimum, baik pada simulasi yang memberikan kecepatan aliran tertinggi maupun pada eksperimen yang menghasilkan panjang nyala plasma maksimum. Kesesuaian tren tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kesesuaian secara kualitatif terhadap fenomena aktual yang terjadi pada proses *plasma arc cutting*.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Panjang Plasma Dengan Kecepatan Aliran Udara.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi

Simulasi CFD pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan udara dan diameter outlet nozzle terhadap pola aliran udara pada plasma combustion chamber. Data yang diperoleh terdiri atas data kuantitatif berupa nilai maksimum velocity dan tekanan total pada outlet, serta data kualitatif berupa kontur distribusi velocity dan temperatur. Kombinasi kedua jenis data tersebut digunakan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai karakteristik aliran udara pada setiap variasi yang diuji. Berdasarkan hasil simulasi, berikut kontur perbandingan tekanan pada setiap surface roughness level.

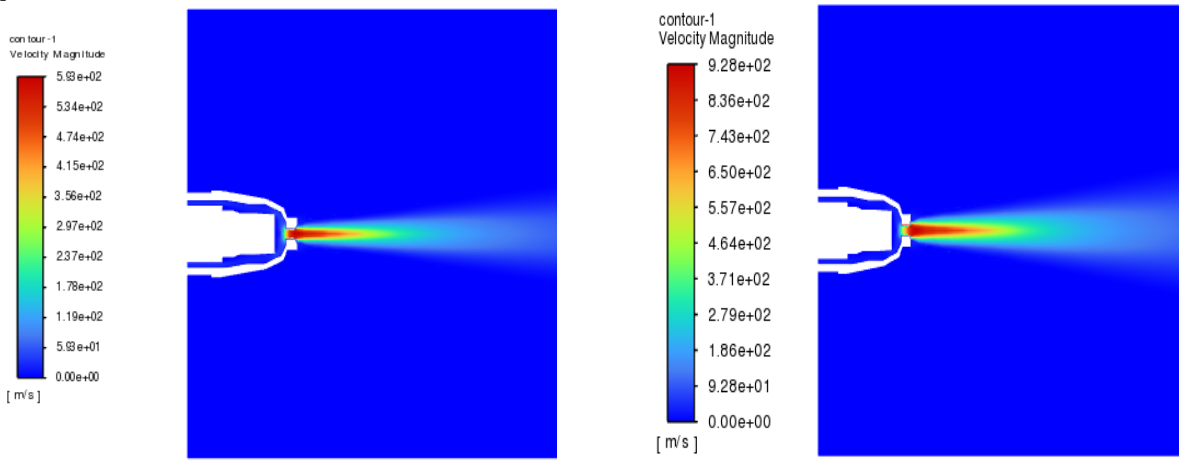
3.2 Pengaruh Variasi Tekanan *Inlet* terhadap Aliran Udara

Hasil simulasi numerik distribusi kecepatan aliran udara pada variasi tekanan udara dan diameter outlet nozzle ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan *Velocity* Dengan Tekanan *Inlet*

Variasi Tekanan (bar)	Max *Velocity* (m/s)				
	1,5 mm	1,7 mm	2,0 mm	2,2 mm	2,5 mm
1	560,43	572,81	615,11	596,3	593,05
2	707,38	728,29	749,43	744,3	735,21
3	787,76	814,33	814,99	817,62	821,97
4	838,34	874,56	856,3	868,89	883,32
5	872,74	914,44	906,36	910,83	928,38
6	911,95	943,15	937,58	913,73	962,57
7	941,56	971,71	961,88	951,95	996,79
8	965,53	995,35	980,68	976,88	1023,51
9	988,51	1013,19	1001,03	1024,01	1044,02
10	1009,7	1026,7	1051,74	1045,59	1064,96

Berdasarkan data pada Tabel 4, terdapat korelasi positif yang kuat antara tekanan yang diberikan dengan *max velocity* yang dihasilkan pada seluruh variasi diameter *nozzle*. Secara konsisten, setiap kenaikan tekanan diikuti dengan peningkatan kecepatan aliran pada semua variasi diameter. Fenomena ini sesuai dengan prinsip Bernoulli, di mana peningkatan tekanan dapat dikonversi menjadi energi kinetik sehingga kecepatan fluida meningkat [9]. Analisis lebih lanjut difokuskan pada diameter 2,5 mm karena menghasilkan max velocity tertinggi. Gambar 5 menunjukkan kontur kecepatan aliran pada diameter tersebut untuk tekanan 1 bar dan 5 bar.



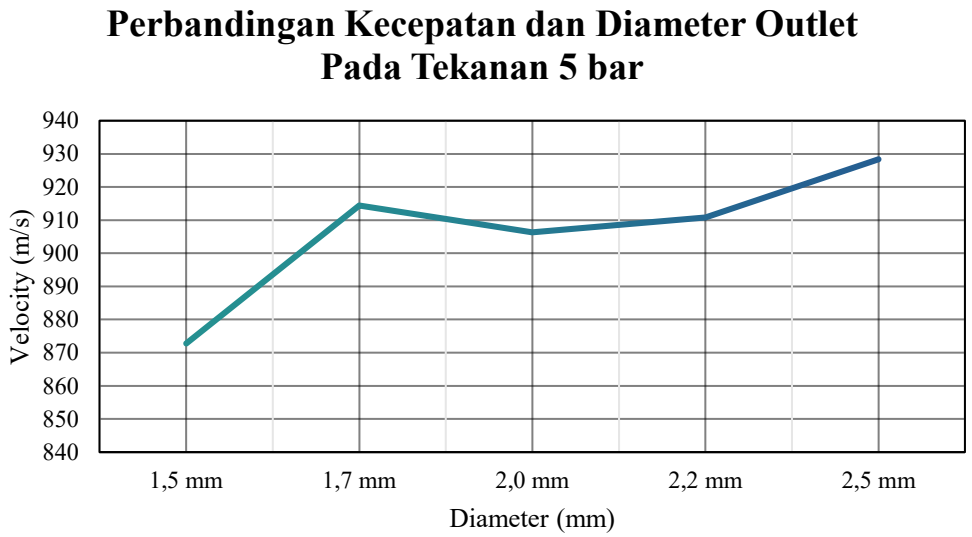
(a) (b)

Gambar 5. Kontur Kecepatan Aliran pada Diameter *Outlet* 2,5 mm: (a) Tekanan 1 bar; (b) Tekanan 5 bar

Pada Gambar 5 terlihat bahwa tekanan 5 bar menghasilkan panjang jet dan nilai velocity yang lebih besar dibandingkan tekanan 1 bar pada diameter *outlet* yang sama. Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan tekanan gas dan energi input yang menyebabkan aliran keluar *nozzle* memiliki momentum yang lebih besar, sehingga plasma menjadi lebih fokus dan mampu menjangkau jarak yang lebih panjang. Semakin tinggi energi yang diberikan, semakin besar pula kemampuan plasma mempertahankan kecepatannya sebelum bercampur dengan udara di sekitarnya [10].

3.3 Pengaruh Variasi Geometri *Nozzle* terhadap Kecepatan Aliran Udara

Perubahan geometri *nozzle* pada tekanan yang sama menghasilkan respons kecepatan aliran yang berbeda. Pada tekanan rendah seperti 1 bar, *velocity* meningkat dari 560,43 m/s pada diameter outlet 1,5 mm menjadi 615,11 m/s pada diameter outlet 2,0 mm, namun mengalami penurunan ketika diameter outlet diperbesar lebih lanjut. Hal ini terjadi karena peningkatan diameter dari 1,5 mm hingga 2,0 mm menyebabkan hambatan aliran berkurang sehingga energi tekanan dapat dikonversi menjadi energi kinetik secara lebih optimal. Akan tetapi, ketika diameter outlet diperbesar melebihi 2,0 mm, luas penampang aliran menjadi semakin besar sehingga gradien tekanan yang berperan dalam mempercepat aliran menjadi lebih kecil [8]. Kondisi yang berbeda ditunjukkan pada tekanan yang lebih tinggi, yaitu 5 bar, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Pada tekanan tersebut, kecepatan aliran udara justru meningkat seiring bertambahnya diameter outlet nozzle, dari 872,74 m/s pada diameter 1,5 mm menjadi 928,38 m/s pada diameter 2,5 mm.



Gambar 6. Grafik Perbandingan *Velocity* Dengan Perubahan Geometri *Outlet Nozzle* pada tekanan 5 bar

Perbedaan tren tersebut terjadi karena pada tekanan yang lebih tinggi, energi tekanan dan debit aliran yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan pada tekanan 1 bar sehingga karakteristik aliran berubah. Pada kondisi ini, diameter outlet yang kecil mulai bertindak sebagai pembatas aliran sehingga sebagian energi tekanan tidak dapat dimanfaatkan secara optimal. Selisih tekanan yang tinggi meningkatkan debit massa udara secara signifikan dan membutuhkan area keluaran yang lebih besar agar aliran dapat keluar dengan hambatan minimum. Diameter outlet 2,5 mm menjadi lebih efektif karena memberikan jalur pelepasan yang lebih luas, sehingga rugi tekanan akibat kontraksi dan gesekan dinding *nozzle* menurun dan udara bertekanan tinggi dapat berekspansi lebih sempurna menjadi energi kinetik [10].

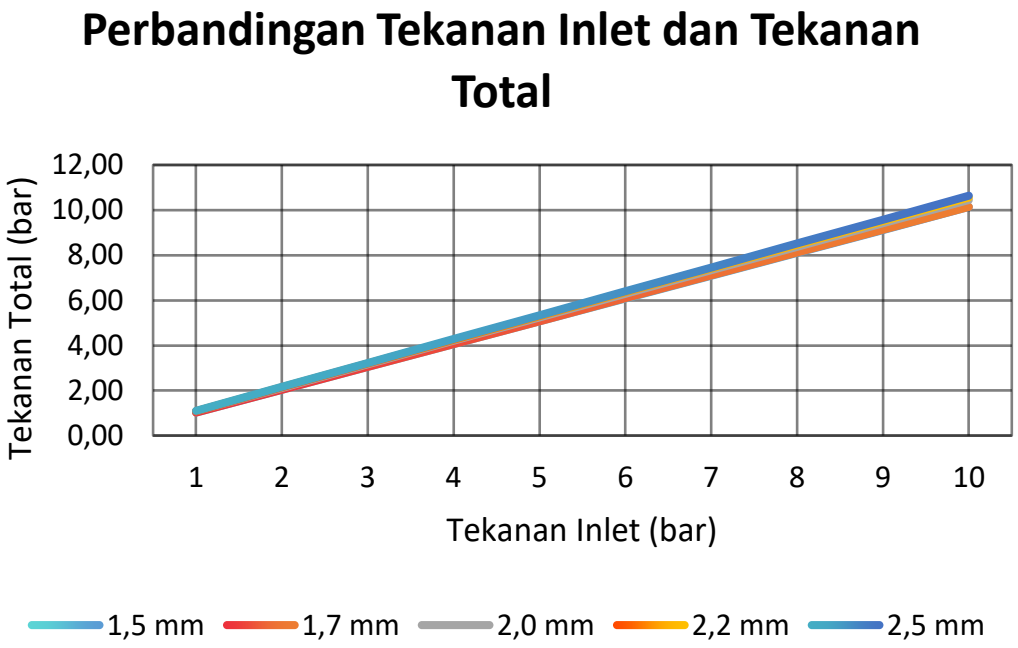
3.4 Analisis Tekanan Total

Tekanan total merepresentasikan total energi mekanik fluida, yaitu gabungan energi tekanan dan energi akibat kecepatan aliran. Data hasil simulasi tekanan total pada *outlet* untuk setiap variasi tekanan *inlet* dan diameter *nozzle* disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Tekanan *Inlet* dan Tekanan Total

Tekanan *Inlet* (bar)	Tekanan Total (bar)				
	1,5 mm	1,7 mm	2,0 mm	2,2 mm	2,5 mm
1	1,02	1,02	1,08	1,09	1,10
2	2,03	2,04	2,12	2,15	2,16
3	3,05	3,05	3,16	3,20	3,22
4	4,06	4,07	4,21	4,26	4,28
5	5,07	5,08	5,25	5,31	5,34
6	6,08	6,09	6,29	6,36	6,40
7	7,10	7,11	7,33	7,41	7,46
8	8,11	8,12	8,37	8,47	8,52
9	9,12	9,13	9,42	9,52	9,58
10	10,14	10,15	10,44	10,57	10,63

Dari Tabel 5 terlihat bahwa peningkatan tekanan *inlet* secara konsisten diikuti oleh peningkatan tekanan total pada seluruh variasi diameter *nozzle*. Pada diameter 1,5 mm, tekanan total meningkat dari 1,02 bar menjadi 10,14 bar, sedangkan pada diameter 2,5 mm meningkat dari 1,10 menjadi 10,63 bar, yang menunjukkan bahwa tekanan total memiliki ketergantungan yang sangat kuat terhadap tekanan *inlet*. Visualisasi hubungan tersebut ditunjukkan pada Gambar 7.

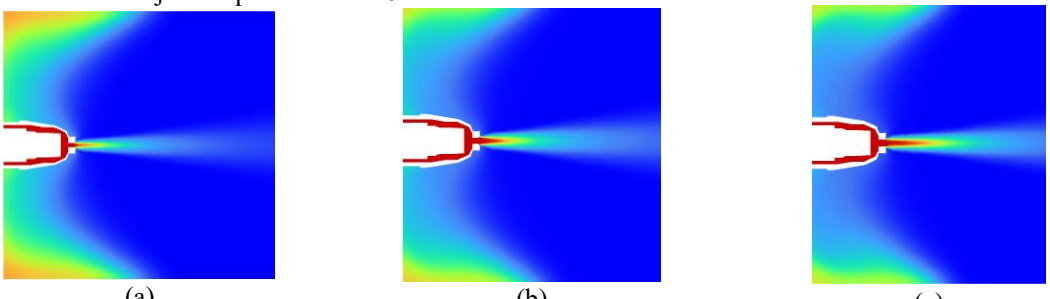


Gambar 7. Grafik Perbandingan Tekanan *Inlet* dan Tekanan Total

Berdasarkan Gambar 7, nozzle dengan diameter *outlet* yang lebih besar menghasilkan tekanan total *outlet* yang lebih tinggi dibandingkan *nozzle* dengan diameter *outlet* yang lebih kecil pada tekanan *inlet* yang sama. *Nozzle* dengan diameter 2,5 mm secara konsisten mempertahankan nilai tekanan total yang lebih besar pada setiap variasi tekanan *inlet*. Fenomena ini menunjukkan bahwa diameter *outlet* yang lebih besar menyebabkan aliran mengalami *total pressure loss* yang lebih kecil selama melewati *nozzle*, karena jalur aliran yang lebih luas mengurangi resistansi dan efek gesekan terhadap dinding *nozzle* sehingga energi total fluida dapat dipertahankan lebih baik.

3.5 Analisis Distribusi Temperatur

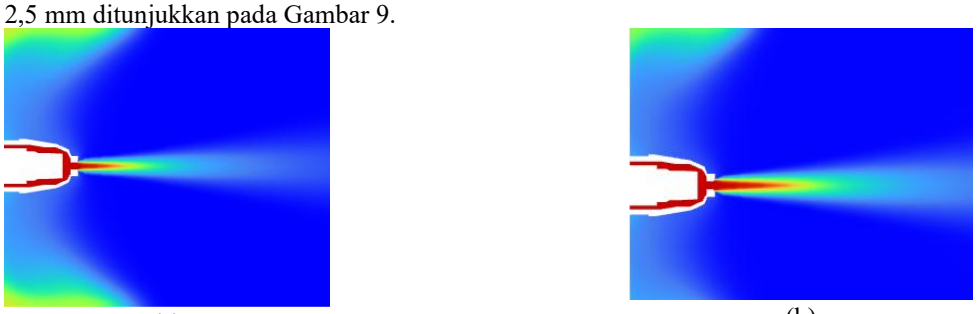
Analisis distribusi temperatur dilakukan untuk memahami karakteristik penyebaran panas yang terjadi selama proses aliran fluida di dalam sistem yang disimulasikan. Pengaruh variasi geometri *nozzle* terhadap distribusi temperatur pada tekanan 1 bar ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kontur Distribusi Temperatur pada Tekanan 1 bar: (a) Diameter 1,5 mm; (b) Diameter 2,0 mm; (c) Diameter 2,5 mm

Dari Gambar 8 terlihat bahwa pada tekanan yang sama, diameter *nozzle* yang lebih besar justru menghasilkan distribusi panas yang lebih panjang, berbeda dengan tren *max velocity* yang menurun pada diameter besar saat tekanan rendah. Hal ini terjadi karena meskipun peningkatan diameter *nozzle* menyebabkan percepatan aliran menurun akibat bertambahnya luas penampang, kondisi tersebut juga mengurangi resistansi aliran selama udara melewati *nozzle*.

Berkurangnya resistansi menyebabkan *losses* energi akibat gesekan, turbulensi, dan disipasi menjadi lebih kecil, sehingga energi termal yang dibawa aliran dapat dipertahankan lebih lama dan panas mampu menyebar lebih jauh dibandingkan *nozzle* dengan diameter yang lebih kecil. Adapun pengaruh variasi tekanan *inlet* terhadap distribusi temperatur pada diameter outlet 2,5 mm ditunjukkan pada Gambar 9.



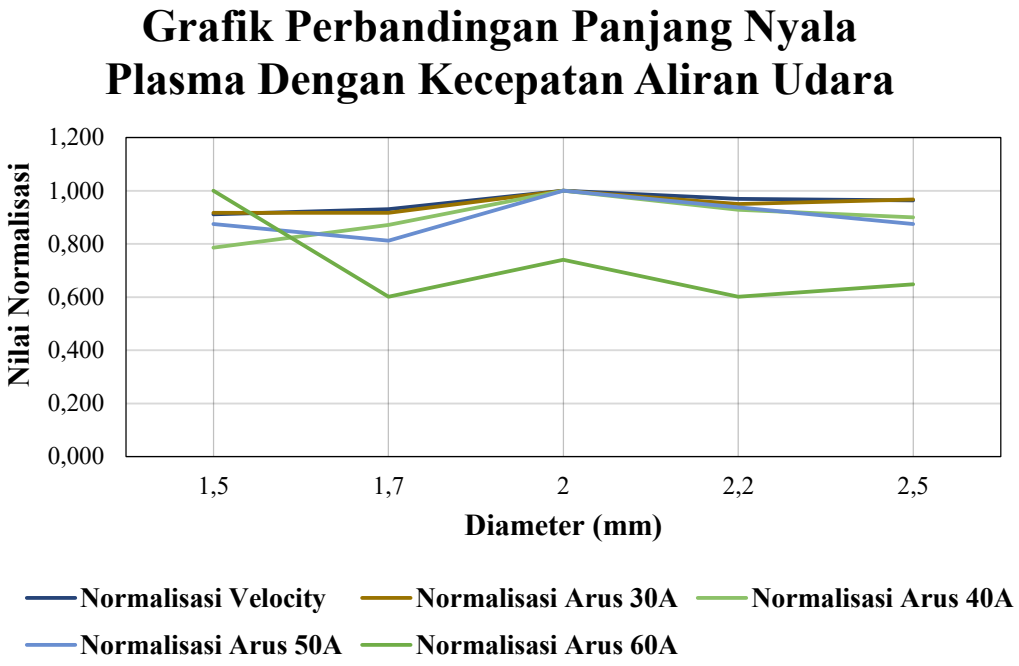
(a) (b)

Gambar 9. Distribusi Temperatur pada Diameter Outlet 2,5 mm: (a) Tekanan 1 bar; (b) Tekanan 5 bar

Berdasarkan Gambar 9, peningkatan tekanan *inlet* memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap panjang distribusi temperatur dibandingkan peningkatan diameter *outlet nozzle*. Hal ini disebabkan karena kenaikan tekanan *inlet* secara langsung meningkatkan energi yang masuk ke dalam sistem aliran, sehingga fluida bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi dan membawa energi termal lebih jauh sepanjang domain aliran. Sebaliknya, peningkatan diameter *outlet* tidak menambah energi baru ke dalam sistem, melainkan hanya mengurangi resistansi dan *losses* energi yang terjadi selama fluida melewati *nozzle*. Dengan demikian, tekanan *inlet* merupakan parameter yang lebih dominan dalam menentukan sejauh mana energi termal dapat tersebar sepanjang domain aliran, sedangkan perubahan diameter *outlet* lebih berperan dalam menjaga agar energi yang telah ada tidak banyak hilang selama proses aliran berlangsung.

3.6 Perbandingan Hasil Eksperimen Dan Simulasi Numerik

Perbandingan antara hasil simulasi dan hasil eksperimen dilakukan untuk menganalisis kemampuan model CFD dalam merepresentasikan fenomena pembentukan nyala plasma pada proses *plasma arc cutting*. Hasil simulasi direpresentasikan oleh nilai *velocity* maksimum, sedangkan hasil eksperimen direpresentasikan oleh panjang nyala plasma yang telah dinormalisasi sehingga kedua parameter dapat dibandingkan berdasarkan kecenderungan perubahannya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Panjang Nyala Plasma dengan Kecepatan Aliran Udara

Berdasarkan Gambar 10, hasil simulasi dan hasil eksperimen memiliki pola perubahan yang relatif serupa pada setiap variasi diameter *outlet nozzle*. Kedua kurva mengalami peningkatan dari diameter 1,5 mm hingga mencapai nilai maksimum pada diameter 2,0 mm, kemudian mengalami penurunan pada diameter 2,2 mm. Kesesuaian pola tersebut

menunjukkan bahwa simulasi numerik yang dilakukan cukup mampu menggambarkan pengaruh perubahan geometri *nozzle* terhadap karakteristik aliran udara yang selanjutnya memengaruhi pembentukan nyala plasma. Peningkatan kecepatan aliran udara menyebabkan momentum aliran yang membawa plasma menjadi lebih besar sehingga plasma mampu mempertahankan energinya pada jarak yang lebih panjang sebelum mengalami pencampuran dengan udara di sekitarnya, sehingga menghasilkan nyala plasma yang lebih panjang. Sebaliknya, ketika kecepatan aliran menurun, momentum plasma juga menurun sehingga pencampuran dengan udara lingkungan berlangsung lebih cepat dan panjang nyala plasma menjadi lebih pendek.

Meskipun kedua kurva menunjukkan kecenderungan yang hampir sama, masih terdapat sedikit perbedaan nilai pada beberapa variasi diameter nozzle. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh keterbatasan model simulasi maupun kondisi aktual selama pelaksanaan eksperimen. Pada simulasi, aliran dimodelkan menggunakan pendekatan *steady-state* dengan asumsi udara sebagai fluida kerja, sehingga belum mempertimbangkan fenomena ionisasi gas, pembentukan busur listrik, perpindahan panas akibat radiasi, serta fluktuasi plasma yang terjadi secara alami selama proses *plasma arc cutting* berlangsung.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi tekanan udara dan diameter *outlet nozzle* terhadap karakteristik aliran udara, distribusi tekanan total, dan distribusi temperatur pada *plasma combustion chamber* melalui pendekatan eksperimen dan simulasi numerik. Berikut merupakan kesimpulan dari penelitian ini:

1. Tepat setelah udara keluar dari outlet, fluida masih memiliki kecepatan tertinggi karena energi tekanan di dalam nozzle baru saja dikonversi menjadi energi kinetik. Pada zona ini aliran cenderung terkonsentrasi di sumbu tengah nozzle Semakin jauh dari outlet nozzle, momentum jet terus berkurang sehingga kecepatan aksial menurun secara bertahap dan aliran menjadi lebih menyebar. Pada aplikasi plasma arc cutting, distribusi aliran setelah nozzle sangat penting karena menentukan kemampuan jet udara/plasma dalam membuang logam cair dari celah potong dan menjaga kestabilan plasma arc. Jet yang sempit, lurus, dan memiliki inti panjang umumnya menghasilkan pemotongan lebih efektif dibanding jet yang cepat menyebar.
2. Berdasarkan hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa peningkatan diameter outlet nozzle menyebabkan nilai total pressure pada outlet semakin tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa diameter outlet yang lebih besar mampu meminimalkan pressure loss selama aliran berlangsung karena resistansi dan gesekan yang terjadi lebih kecil. Oleh karena itu, nozzle dengan diameter outlet yang lebih besar memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan energi total aliran dibandingkan nozzle dengan diameter yang lebih kecil.
3. Berdasarkan hasil simulasi numerik, peningkatan tekanan inlet terbukti memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap distribusi temperatur dibandingkan variasi diameter outlet nozzle. Peningkatan tekanan inlet meningkatkan energi total fluida yang masuk ke sistem sehingga kemampuan aliran untuk mentransfer energi termal menjadi lebih besar. Sebaliknya, peningkatan diameter outlet hanya mengurangi hambatan aliran dan losses energi, sehingga efeknya terbatas pada kemampuan mempertahankan energi yang telah ada. Dengan demikian, tekanan inlet merupakan parameter yang lebih dominan dalam menentukan sejauh mana energi termal dapat tersebar sepanjang domain aliran.

5. Daftar Pustaka

[1] Nugraheni, D.T., Purwana, R., Hamzah, U.S. (2023) Environmental Impact Assessment of Co-firing Implementation at X Steam Power Plant, West Java. Jurnal Presipitasi Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan, 20(2), 334–344. https://doi.org/10.14710/presipitasi.v20i2.334-344.

[2] Samosir, Y.O., Widayatno, R.L., Yanto, S. (2025) Implementation of CCUS Technology in the Development of Steam Power Plants: Challenges and Opportunities in the Era of Energy Transition. Formosa Journal of Science and Technology, 4(3), 925–934. https://doi.org/10.55927/fjst.v4i3.41.

[3] Kechagias, J., Petousis, M., Vidakis, N., Mastorakis, N. (2017) Plasma Arc Cutting Dimensional Accuracy Optimization Employing the Parameter Design Approach. ITM Web of Conferences, 9, 03004. https://doi.org/10.1051/itmconf/20170903004.

[4] Gorokhovski, M.A. et al. (2007) Enhancement of Pulverized Coal Combustion by Plasma Technology. Combustion Science and Technology, 179(10), 2065–2090. https://doi.org/10.1080/00102200701386115.

[5] Khan, S.A., Ibrahim, O.M., Aabid, A. (2021) CFD Analysis of Compressible Flows in a Convergent-Divergent Nozzle. Materials Today Proceedings, 46, 2835–2842. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.074.

[6] Anderson, J. (2020) Modern Compressible Flow: With Historical Perspective. McGraw-Hill Education, New York.

[7] Tuladhar, U. et al. (2024) Numerical Analysis and Schlieren Visualization of Gas Flow Dynamics Inside the Plasma Arc Cut Kerf with Curved Cutting Fronts. International Communications in Heat and Mass Transfer, 159, 108075. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108075.

[8] Zhang, B. et al. (2024) Optimization Study on Nozzle Selection Based on the Influence of Nozzle Parameters on Jet Flow Field Structure. Applied Sciences, 14(19), 9098. https://doi.org/10.3390/app14199098.

[9] Wang, J. et al. (2021) Numerical Study of the Effect of Geometric Parameters on the Internal Flow of a Pressure Nozzle for Dustfall. Advanced Powder Technology, 32(5), 1561–1572. https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.03.014.

[10] Jiang, T. et al. (2022) Experimental Investigation of Internal and External Flow Fields of Jetting Nozzles with Different Structures. Journal of Petroleum Science and Engineering, 217, 110891. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110891.