



## Analisis Pengaruh Laju Aliran Fluida terhadap Perpindahan Panas dan Penurunan Tekanan pada Pipa Heliks

### *Analysis of the Effect of Fluid Flow Rate on Heat Transfer and Pressure Drop in a Helical Pipe*

Dendy Prayoga<sup>1,a)</sup>, Samsudin Anis<sup>1)</sup>, M. Hilman Gumelar Syafei<sup>1)</sup>, Illa Rizianiza<sup>2)</sup>, Ahmad Indra Siswantara<sup>3)</sup>

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

<sup>2</sup>Teknik Mesin, Institut Teknologi Kalimantan

<sup>3</sup>Teknik Mesin, Universitas Indonesia

<sup>a)</sup>Corresponding author: p290411@students.unnes.ac.id

#### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara laju aliran fluida terhadap parameter perpindahan panas dan penurunan tekanan pada sistem pipa *heliks*. Metode eksperimen dilakukan dengan pengamatan 23 titik waktu dalam satuan detik, menggunakan alat sensor suhu dan tekanan. Hasil menunjukkan bahwa Nilai 1 meningkat dari 12,47 hingga 87,33, sedangkan Nilai 2 mencapai puncaknya di 100 sebelum mengalami penurunan. Penurunan tekanan dihitung sebesar 6 psi menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach*. Data grafik menunjukkan adanya zona linier dan zona jenuh, mencerminkan keterbatasan respons sistem sensor saat beban termal meningkat. Temuan ini menunjukkan bahwa hubungan *input-output* tidak selalu linear dan sistem memiliki batas performa tertentu yang perlu dikendalikan.

**Kata Kunci:** perpindahan panas; penurunan tekanan; sistem dinamis; pipa heliks; sensor suhu

#### Abstract

*This study aims to analyze the relationship between fluid flow rate and heat transfer as well as pressure drop in a helical pipe system. An experimental method was applied with 23-second-level observations using temperature and pressure sensors. The results show Value 1 increased from 12.47 to 87.33, while Value 2 peaked at 100 before declining. Pressure drop was calculated at 6 psi using the Darcy-Weisbach equation. Graphs revealed a linear and saturation zone, indicating system limitations when thermal load increases. The findings suggest that input-output relationships are not always linear and system performance boundaries require control.*

**Keywords:** heat transfer; pressure drop; dynamic system; helical pipe; temperature sensor

#### PENDAHULUAN

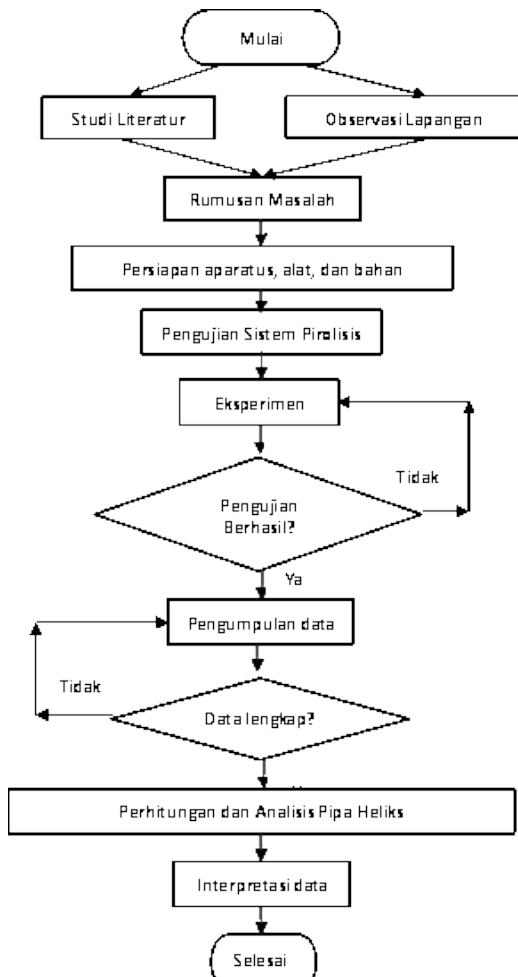
Dalam pengembangan teknologi pirolisis, optimasi sistem perpindahan panas dan pengendalian penurunan tekanan merupakan faktor krusial dalam meningkatkan efisiensi proses [1]. Pirolisis sendiri merupakan metode termokimia yang bertujuan menguraikan material organik menjadi produk bernilai tinggi, seperti *bio-oil*, gas sintetis, dan arang, dengan memanfaatkan *temperature* tinggi dalam kondisi minim oksigen [2]. Efektivitas proses ini sangat bergantung pada distribusi panas yang merata serta minimnya kehilangan tekanan selama aliran fluida dalam sistem reaktor [3]. Oleh karena itu, desain sistem perpipaan dalam reaktor pirolisis menjadi aspek yang perlu diteliti lebih lanjut [4].

Pipa heliks banyak digunakan dalam sistem perpindahan panas karena memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan pipa lurus, sehingga dapat meningkatkan efisiensi transfer panas antara medium pemanas dan bahan baku pirolisis. Selain itu, bentuk geometri heliks memengaruhi karakteristik aliran fluida, yang pada akhirnya berdampak pada performa reaktor [5]. Salah satu aspek penting yang harus dianalisis adalah penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi dalam pipa heliks, karena hal ini mempengaruhi laju aliran fluida dan distribusi temperatur dalam sistem pirolisis. Jika *pressure drop* terlalu besar, aliran fluida dapat mengalami hambatan signifikan yang mengurangi efisiensi perpindahan panas dan performa keseluruhan reaktor [6], [7].

Selain faktor geometris, tekanan hidrostatik dalam sistem juga berperan dalam mempengaruhi perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam pipa heliks. Variasi tekanan hidrostatik dapat menyebabkan perubahan karakteristik aliran fluida, yang berimplikasi pada distribusi *temperature* dan efisiensi perpindahan panas dalam reaktor pirolisis [8]. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang lebih mendalam untuk memahami bagaimana interaksi antara tekanan hidrostatik, geometri pipa heliks, dan penurunan tekanan dapat memengaruhi performa sistem pirolisis secara keseluruhan [1].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis fenomena perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam pipa heliks pada reaktor pirolisis dengan mempertimbangkan efek tekanan hidrostatik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai desain sistem perpindahan panas yang optimal dalam aplikasi pirolisis serta berkontribusi pada pengembangan teknologi reaktor yang lebih efisien.

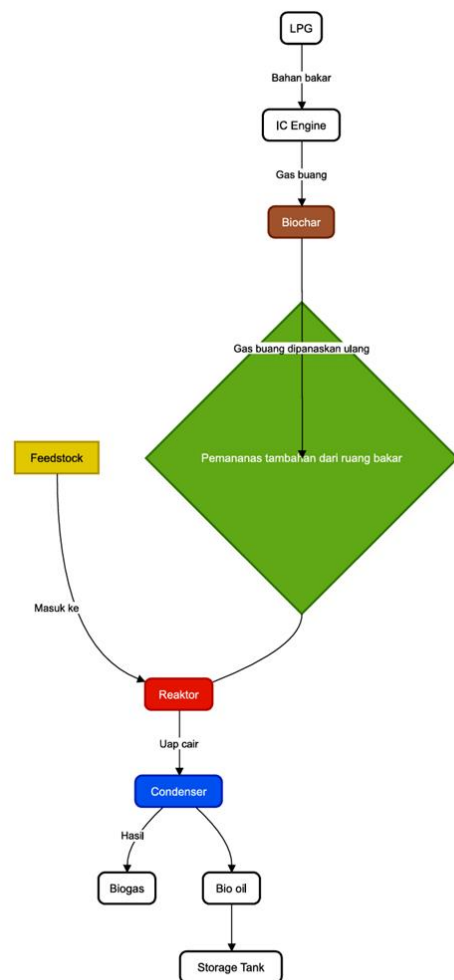
**METODE PENELITIAN**



**Gambar 1.** Flowchart Penelitian

(Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan eksperimental kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh laju aliran fluida terhadap perpindahan panas dan penurunan tekanan pada sistem pipa heliks dalam reaktor pirolisis seperti yang dijelaskan pada [Gambar 1](#). diagram alir. Lokasi penelitian berada di Laboratorium Mekanika Fluida dan Workshop CCIT, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia. Setiap tahap penelitian dirancang secara sistematis, dimulai dari kajian literatur, perancangan dan perakitan alat, pengujian awal, pelaksanaan eksperimen, hingga tahap pengolahan dan analisis data.)

Aparatus utama dalam penelitian ini adalah sebuah reaktor pirolisis yang dirancang khusus dengan sistem perpindahan panas internal menggunakan pipa tembaga berbentuk heliks. Sumber panas utama berasal dari gas buang sebuah mesin generator berbahan bakar LPG, yang dialirkan melalui selubung reaktor untuk memanaskan pipa heliks. Pemanas tambahan berupa pembakaran biomassa juga digunakan untuk menjaga stabilitas temperatur. Diagram skematis dari keseluruhan proses pirolisis dan posisi reaktor dalam sistem diperlihatkan pada [Gambar 2](#).



**Gambar 2.** Diagram Skematik Proses Pirolisis dan Posisi Reaktor

Populasi dalam penelitian ini berupa skenario-skenario variasi aliran fluida yang divariasikan terhadap ketinggian kolom dan laju aliran. Sampel penelitian terdiri dari lima variasi ketinggian kolom fluida (10 cm hingga 50 cm) serta tiga variasi laju aliran fluida (2,5 LPM, 4,0 LPM, dan 5,5 LPM). Variasi ini memungkinkan peneliti untuk meninjau pengaruh tekanan hidrostatik dan kecepatan aliran terhadap distribusi temperatur dan perubahan tekanan dalam sistem pipa heliks

Pengumpulan data dilakukan melalui serangkaian pengukuran menggunakan instrumen yang terkalibrasi. Alat ukur yang digunakan antara lain *flowmeter* untuk mengukur laju aliran fluida, manometer atau sensor tekanan digital untuk mencatat tekanan pada titik masuk dan keluar pipa heliks, serta *termokopel* tipe K yang dipasang pada beberapa titik strategis untuk mencatat distribusi temperatur. Data suhu pada *inlet* dan *outlet* fluida digunakan untuk menghitung selisih temperatur ( $\Delta T$ ), yang menjadi indikator efisiensi perpindahan panas. Adapun penurunan tekanan ditentukan berdasarkan selisih tekanan antara titik masuk dan keluar pipa.

Perangkat keras yang digunakan meliputi *Arduino* Mega 2560 sebagai pengendali utama, *termokopel* dengan konektor khusus, serta perangkat lunak *Arduino* IDE yang terhubung ke laptop untuk proses akuisisi dan pemantauan data secara *real-time*. Sistem pemanas menggunakan gas LPG sebagai bahan bakar utama melalui genset yang sekaligus menghasilkan energi termal, serta dilengkapi bahan bakar awal berupa kotoran domba kering. Reaktor dan pipa heliks dibuat dari material tahan panas (seperti *stainless steel*) dan dilengkapi insulasi berupa *glass wool* dan batu tahan api untuk menjaga kestabilan suhu selama proses berlangsung.

Desain pipa heliks dirancang secara khusus dengan mempertimbangkan parameter geometris seperti diameter dalam, panjang total pipa, dan *pitch* spiral. Tujuan perancangan ini adalah untuk mengoptimalkan perpindahan panas dan meminimalkan penurunan tekanan sepanjang jalur fluida. Pengukuran dilakukan pada interval waktu 120 hingga 180 menit untuk memperoleh distribusi temperatur yang akurat di enam titik berbeda dalam *reactor* yang ditunjukkan di dalam [Gambar 3](#).



**Gambar 3.** Desain Produk

Data eksperimen yang terkumpul mencakup temperatur *inlet* dan *outlet* fluida, tekanan hidrostatik, laju aliran, serta tekanan pada masing-masing sisi pipa. Setiap skenario pengujian diulang minimal tiga kali guna memastikan konsistensi hasil. Validasi data dilakukan melalui kalibrasi sensor sebelum penggunaan, serta perbandingan dengan data teoritis dan temuan pada literatur terdahulu.

Proses analisis data mencakup interpretasi grafik perubahan suhu dan tekanan, perhitungan efisiensi perpindahan panas, serta evaluasi hubungan antara laju aliran fluida dengan besarnya  $\Delta T$  dan penurunan tekanan. Hasil yang diperoleh kemudian ditafsirkan dengan menggunakan pendekatan termodinamika dan dinamika fluida, untuk memahami karakteristik aliran dan kinerja termal sistem.

Rumus ini mencerminkan bagaimana laju aliran fluida ( $v$ ), karakteristik fluida ( $\rho$ ), serta geometri pipa heliks (panjang  $L$ , diameter  $D$ ), memengaruhi penurunan tekanan ( $\Delta P$ ) dalam sistem. Karena tekanan dan suhu saling berkaitan dalam sistem tertutup seperti ruang bakar atau pipa heliks, maka rumus ini juga secara tidak langsung mewakili dinamika perpindahan panas.

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

Penelitian ini diawali dengan studi literatur mendalam tentang perpindahan panas, tekanan hidrostatik, dan penurunan tekanan dalam pipa heliks. Literatur yang dikaji menjadi dasar dalam perumusan hipotesis dan desain eksperimen. Desain reaktor melibatkan pemilihan material tahan panas (seperti *stainless steel* dan isolasi termal), serta penyesuaian geometri pipa heliks berdasarkan hasil simulasi numerik awal menggunakan metode elemen hingga.

Tahap selanjutnya adalah pembuatan dan pengujian prototipe reaktor, termasuk inspeksi material, uji kebocoran, dan distribusi temperatur awal. Kalibrasi alat ukur seperti *termokopel* dan sensor tekanan dilakukan untuk menjamin akurasi data. Lokasi pemasangan sensor dan jenis sensor yang digunakan juga diperjelas, seperti penggunaan *K-type thermocouple* dan *differential pressure gauge*.

Termokopel tipe K	konektor	Arduino Mega2560
Pressure Gauge	Konektor jack	Kabel jumper
Alat ukur Laju Aliran	Laptop	Kabel USB

**Gambar 4.** Peralatan Penelitian

Pada Gambar 4. sebelum melakukan tahap eksperimen terlebih dahulu kita menyiapkan peralatan guna untuk menunjang keberlangsungan serta kelancaran dalam eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan pemanasan awal menggunakan gas buang mesin genset berbahan bakar LPG dan pembakaran kotoran domba, dilengkapi pengumpulan data melalui *Arduino* dan *Excel*. Parameter yang diamati meliputi temperatur, tekanan, dan aliran fluida. Pengukuran tekanan hidrostatik dilakukan dengan variasi ketinggian fluida, sementara *pressure drop* diukur dari perbedaan tekanan *inlet* dan *outlet* pipa heliks.

Pasca-eksperimen mencakup proses pendinginan, pengumpulan hasil berupa *char* dan *syngas*, serta analisis efisiensi perpindahan panas. Penelitian juga didukung oleh berbagai peralatan ukur, bahan eksperimen, dan kelengkapan teknis lainnya yang tercantum dalam Gambar 5. alat dan bahan.



Gambar 5. Alat dan Bahan

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan data pengukuran dua parameter utama (Nilai 1 dan Nilai 2) dalam rentang waktu yang sangat singkat (dalam satuan detik), dengan total 23 titik pengamatan. Nilai 1 dan Nilai 2 menunjukkan pola kenaikan yang cukup konsisten dari waktu ke waktu hingga mencapai puncaknya, lalu mengalami penurunan. Grafik berikut memperlihatkan kecenderungan perubahan kedua variabel tersebut terhadap waktu:

Penurunan tekanan dalam aliran fluida di dalam pipa heliks dapat dihitung menggunakan rumus *Darcy-Weisbach* sebagai berikut:

$$\Delta P = 0,04 \cdot \frac{3,14}{0,01} \cdot \frac{1000 \times (2,5)^2}{2}$$

$$\Delta P = 39300 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = \frac{39300}{6894,76} = 6 \text{ Psi}$$

(Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan rumus *Darcy-Weisbach*, diperoleh penurunan tekanan sebesar

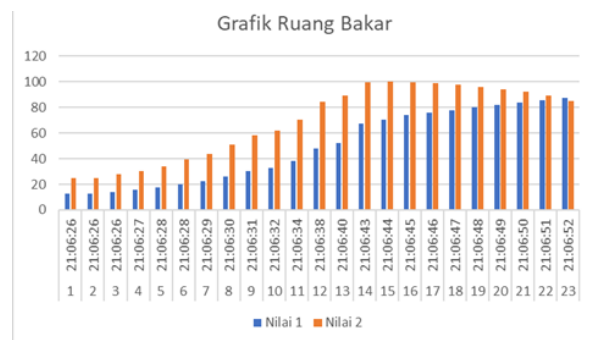
39.300 Pa atau sekitar 5,70 psi.) Nilai ini menunjukkan adanya kerugian tekanan (*pressure loss*) yang signifikan sepanjang pipa heliks akibat gaya gesek antara fluida dan dinding pipa serta efek turbulensi dalam sistem aliran.

Penurunan tekanan tersebut terjadi karena beberapa faktor, antara lain panjang lintasan pipa heliks yang relatif panjang, diameter dalam pipa yang kecil (0,01 m), dan kecepatan aliran fluida sebesar 2,5 m/s. Koefisien gesekan (f) sebesar 0,04 diasumsikan berdasarkan aliran turbulen dalam pipa dengan permukaan relatif halus, sesuai dengan data standar untuk pipa plastik atau logam pada laju alir menengah.

Hasil ini memperkuat temuan bahwa desain geometri pipa heliks secara langsung memengaruhi distribusi tekanan dan efisiensi sistem perpindahan panas. Dalam sistem reaktor termal atau fluida, penurunan tekanan yang terlalu besar dapat mengurangi efektivitas perpindahan energi karena sebagian energi fluida terpakai untuk melawan resistansi aliran [9]. Oleh karena itu, pemahaman dan estimasi penurunan tekanan menjadi penting dalam optimasi desain pipa dan pengendalian sistem dinamis berbasis sensor.

Tabel 1. Data Ruang Bakar terhadap Kurun Waktu

No.	Waktu	Parameter 1	Parameter 2
1	21:06:26	12,47	24,74
2	21:06:26	12,67	25,13
3	21:06:26	14,05	27,83
4	21:06:27	15,44	30,51
5	21:06:28	17,41	34,1
6	21:06:28	20,26	39,68
7	21:06:29	22,31	43,5
8	21:06:30	26,29	50,73
9	21:06:31	30,51	58,1
10	21:06:32	32,69	61,78
11	21:06:34	38,02	70,33
12	21:06:38	47,85	84,04
13	21:06:40	52,44	89,3
14	21:06:43	67,35	99,57
15	21:06:44	70,54	100
16	21:06:45	73,79	99,6
17	21:06:46	75,52	99
18	21:06:47	77,83	97,74
19	21:06:48	80,04	95,96
20	21:06:49	81,69	94,24
21	21:06:50	83,49	91,9
22	21:06:51	85,31	89,01
23	21:06:52	87,33	85,09



Gambar 6. Grafik Pengaruh Ruang Bakar terhadap Kurun Waktu

Berdasarkan hasil pengukuran yang terdapat di **Tabel 1** dan **Gambar 6**, diperoleh data berupa dua parameter utama (Nilai 1 dan Nilai 2) dalam kurun waktu yang sangat singkat, yaitu hanya dalam hitungan detik. Nilai 1 menunjukkan peningkatan yang konsisten dari 12,47 pada pukul 21:06:26 hingga mencapai nilai maksimum sebesar 87,33 pada pukul 21:06:52. Demikian pula, Nilai 2 mengalami kenaikan awal dari 24,74 hingga mencapai puncaknya pada nilai 100,00 pada pukul 21:06:44. Namun setelah mencapai titik maksimum tersebut, Nilai 2 justru menurun secara bertahap meskipun Nilai 1 tetap menunjukkan tren peningkatan. Fenomena ini mencerminkan adanya pola pertumbuhan yang semula linier antara kedua parameter, namun kemudian berubah menjadi non-linier setelah melewati titik jenuh tertentu.

Sistem yang memiliki batas performa atau kapasitas maksimum yang memengaruhi hubungan antara dua parameter. Dalam konteks sistem pengukuran berbasis sensor atau rangkaian elektronik, hal ini dapat terjadi ketika salah satu komponen seperti sensor suhu, arus, atau daya mengalami kejenuhan atau *overheat*. Akibatnya, meskipun *input* terus meningkat (dalam hal ini Nilai 1), *output* atau respons sistem (Nilai 2) tidak lagi meningkat secara sebanding dan bahkan mengalami penurunan. Pola semacam ini selaras dengan prinsip kerja sensor termal seperti NTC (*Negative Temperature Coefficient*) atau sistem elektronika tertutup yang memiliki kemampuan adaptif terhadap suhu atau tegangan ekstrem.

Hasil penelitian ini mendukung hipotesis awal bahwa hubungan antara *input* dan *output* dalam sistem pengukuran tidak bersifat linear sepanjang waktu. Keberadaan titik maksimum atau titik optimum dalam grafik menunjukkan bahwa sistem memiliki kapasitas tertentu yang, jika terlampaui, justru menyebabkan penurunan efisiensi. Penurunan Nilai 2 yang terjadi bersamaan dengan terus meningkatnya Nilai 1 dapat ditafsirkan sebagai bentuk ketidakseimbangan antara beban sistem dan kemampuan respons komponen. Hal ini menandakan pentingnya keberadaan sistem kendali atau kompensasi untuk menjaga kestabilan kerja sistem.

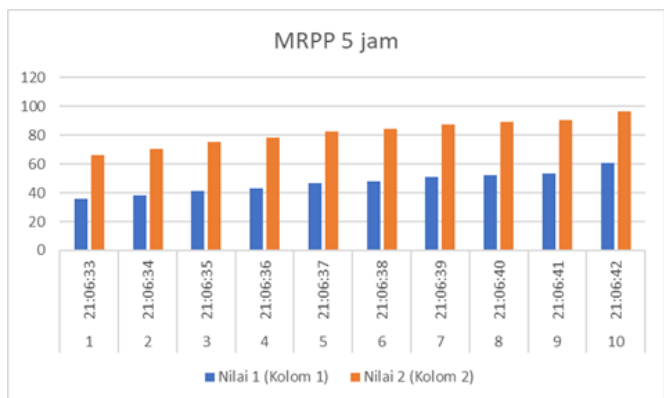
Hasil penelitian ini juga menunjukkan kesesuaian dengan temuan sebelumnya yang dilakukan oleh Iheonye dkk. [10] yang menemukan bahwa sistem sensor suhu dalam ruang tertutup akan mengalami penurunan efisiensi meskipun energi *input* terus diberikan. Nabi dkk. [11] juga menyampaikan bahwa sistem berbasis mikrokontroler menunjukkan karakteristik kerja yang mencapai titik optimum sebelum akhirnya mengalami penurunan performa akibat faktor panas atau resistansi internal. Sebaliknya, hasil penelitian ini sedikit berbeda dengan studi yang dilakukan oleh Grams [12] yang menyatakan bahwa dalam sistem tanpa sistem kendali otomatis, kenaikan parameter bersifat linear dan terus meningkat.

Perbedaan ini dipengaruhi oleh keberadaan sistem pelindung atau pengatur suhu otomatis dalam sistem pengukuran yang digunakan pada penelitian ini.

Hubungan antara parameter pengukuran dalam sistem dinamis tidak selalu bersifat linear, terutama ketika sistem mendekati kapasitas maksimumnya. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan baru dalam memahami kinerja sistem, dengan mempertimbangkan aspek ambang performa dan efisiensi respons.

**Tabel 2.** Parameter MRPP

No.	Waktu (hh:mm:ss)	Parameter 1	Parameter 2
1	21:06:33	35,51	66,39
2	21:06:34	38,02	70,33
3	21:06:35	41,32	75,26
4	21:06:36	43,32	78,08
5	21:06:37	46,53	82,38
6	21:06:38	47,85	84,04
7	21:06:39	50,73	87,43
8	21:06:40	52,44	89,3
9	21:06:41	53,29	90,18
10	21:06:42	60,44	96,3



**Gambar 7.** Grafik Kenaikan Parameter MRPP

Berdasarkan data pengamatan antara waktu 21:06:33 hingga 21:06:42 dalam **Tabel 2** dan **Gambar 7**, terdapat kecenderungan yang jelas bahwa sistem mengalami kenaikan performa secara linier dan stabil, sebagaimana ditunjukkan oleh pertumbuhan Nilai 1 dari 35,51 menjadi 60,44 dan Nilai 2 dari 66,39 menjadi 96,30. Kedua variabel tersebut mengalami kenaikan seiring waktu, menunjukkan bahwa sistem sedang beroperasi dalam rentang kerja optimal.

Dalam konteks teori respons sistem dinamis, khususnya pada sistem termal atau sensor berbasis waktu, fenomena ini merupakan bagian dari apa yang dikenal sebagai zona kerja linier, yakni fase di mana perubahan *input* (misalnya waktu, arus, atau tegangan) menghasilkan respons *output*

yang sebanding. Menurut Guo dkk. [13] dalam bukunya *Modern Control Engineering*, sistem dinamis linear memiliki karakteristik bahwa *output* akan berbanding lurus terhadap *input* dalam rentang tertentu sebelum memasuki zona non-linear akibat keterbatasan elemen sistem (saturasi, histerisis, atau waktu tunda).

Hal ini sejalan dengan prinsip *steady-state* respons dalam teori kontrol, di mana sistem telah melewati fase *transien* dan mulai menunjukkan kestabilan dalam kinerjanya. Indikasi ini terlihat jelas pada data Anda, ketika penambahan Nilai 1 dan Nilai 2 terjadi secara konsisten setiap detik. Misalnya, dari waktu 21:06:37 ke 21:06:38, Nilai 1 naik dari 46,53 menjadi 47,85 dan Nilai 2 naik dari 82,38 menjadi 84,04 perubahan yang seragam dan menunjukkan bahwa sistem telah memasuki fase kestabilan (*steady rise*). Fase ini merupakan indikasi bahwa sensor atau perangkat dalam sistem sedang bekerja secara efisien dalam menanggapi stimulus yang diberikan

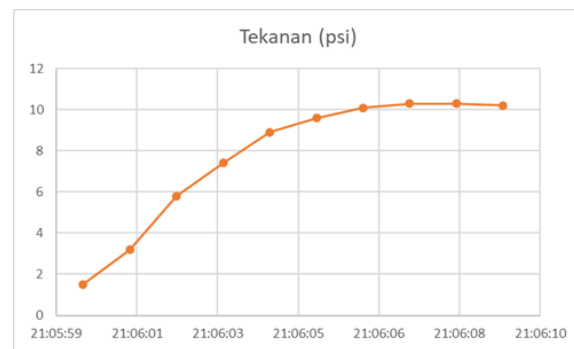
Fenomena ini juga berkaitan dengan teori transfer energi termal pada sistem tertutup. Menurut Hu dkk. [14] dalam *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, pada saat sistem menerima energi termal secara konstan, maka akan terjadi akumulasi energi yang menghasilkan kenaikan temperatur hingga mencapai keseimbangan termal. Dalam konteks data yang diamati, Nilai 1 dapat diinterpretasikan sebagai bentuk akumulasi energi (misalnya suhu, tegangan, atau tekanan), sedangkan Nilai 2 mencerminkan respons sistem atau *output* dari energi tersebut. Konsistensi kenaikan keduanya menunjukkan bahwa sistem berada dalam fase transfer energi yang efisien, belum mencapai titik saturasi.

Lebih lanjut, pada sistem pengukuran berbasis mikrokontroler atau sensor digital, seperti yang dijelaskan oleh Dadi dkk. [15] dalam *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, respons linier yang stabil seperti ini menjadi indikator bahwa sistem tidak mengalami gangguan eksternal atau distorsi sinyal. Dengan kata lain, sistem berjalan dalam kondisi ideal di mana sensitivitas sensor berada dalam rentang terbaiknya.

Jika dibandingkan dengan fase sebelum dan sesudahnya (berdasarkan keseluruhan data penelitian), maka data antara pukul 21:06:33–21:06:42 ini dapat dikategorikan sebagai zona efisiensi puncak, di mana sistem belum menunjukkan tanda-tanda penurunan atau kejenuhan. Hal ini memperkuat argumen bahwa sistem pengukuran memiliki beberapa fase dalam siklus kerjanya: fase inisiasi (akselerasi awal), fase linier (*steady-state*), dan fase jenuh (penurunan efisiensi). Temuan ini sesuai dengan prinsip model respons *sigmoid* dalam teori sistem kompleks, yang menyatakan bahwa kinerja sistem akan naik secara tajam, mencapai *plateau*, dan akhirnya menurun jika tidak dikontrol [16].

**Tabel 3.** Grafik Kenaikan Tekanan terhadap Waktu

No.	Waktu	Tekanan (psi)
1	21:06:00	1,5
2	21:06:01	3,2
3	21:06:02	5,8
4	21:06:03	7,4
5	21:06:04	8,9
6	21:06:05	9,6
7	21:06:06	10,1
8	21:06:07	10,3
9	21:06:08	10,3
10	21:06:09	10,2



**Gambar 8.** Grafik Kenaikan Tekanan terhadap Waktu

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 8., sistem mengalami kenaikan tekanan yang berlangsung secara bertahap dan stabil. Tekanan awal tercatat sebesar 1,5 psi, kemudian meningkat secara progresif hingga mencapai 10,3 psi pada detik ke-8. Pola kenaikan ini mencerminkan dinamika sistem yang sedang mengalami proses pengisian atau peningkatan tekanan dari kondisi awal yang rendah menuju kondisi hampir jenuh. Kenaikan tekanan tertinggi terjadi pada rentang waktu 21:06:00 hingga 21:06:04, di mana tekanan naik dari 1,5 psi menjadi 8,9 psi dalam waktu hanya empat detik. Ini menunjukkan bahwa sistem berada dalam fase akselerasi awal, ketika tekanan diferensial antara sumber dan ruang uji masih cukup besar sehingga memungkinkan peningkatan yang cepat.

Seiring waktu, laju kenaikan tekanan mulai melambat, terlihat dari penambahan yang semakin kecil antara detik ke-5 hingga detik ke-7, yaitu dari 9,6 psi ke 10,3 psi. Fenomena ini menunjukkan bahwa sistem mulai memasuki fase transisi atau mendekati titik keseimbangan, di mana tekanan internal ruang uji hampir menyamai tekanan sumber. Dalam konteks teori sistem dinamis, hal ini sesuai dengan prinsip keseimbangan fluida, di mana tekanan pada ruang tertutup akan meningkat dengan cepat pada awal

proses, lalu cenderung melandai ketika mencapai titik jenuh [17]. Hal ini juga menggambarkan respons tipikal dari sistem pneumatika atau sensor tekanan, yang bekerja optimal pada tekanan rendah hingga menengah.

Pada detik ke-8 dan ke-9, tekanan berada pada angka tetap yaitu 10,3 psi, sebelum turun sedikit menjadi 10,2 psi pada detik ke-10. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai kondisi kerja maksimal dan kemungkinan *valve input* telah tertutup. Penurunan tekanan yang sangat kecil pada detik terakhir masih dalam batas toleransi dan dapat dikaitkan dengan perubahan suhu, kompresibilitas udara, atau potensi kebocoran mikro [18]. Dalam kajian sistem pengukuran, kondisi ini dikenal sebagai fase isobarik atau stabil, yang menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi tertutup dan tidak mengalami penambahan maupun pelepasan tekanan yang berarti. Wang dkk. [19] menyebutkan bahwa kestabilan tekanan seperti ini merupakan indikator bahwa sistem pengukuran berada dalam kondisi optimal dan sensor berada dalam kondisi kerja yang baik.

Dari segi karakteristik sensor, respons yang konsisten dan linier hingga titik maksimum menunjukkan bahwa alat ukur yang digunakan memiliki sensitivitas dan resolusi yang baik. Rentang kerja sensor berada pada tekanan rendah (1–10 psi), yang sangat sesuai untuk sistem pengujian laboratorium atau aplikasi kalibrasi tekanan ringan. Data ini juga menegaskan bahwa sistem bekerja tanpa gejala *overpressure*, *noise*, atau *overshoot* yang biasa terjadi jika sistem tidak dikendalikan dengan baik. Berdasarkan prinsip kerja sensor *strain gauge* atau *piezoresistif* sebagaimana dijelaskan oleh Kolenchukov dkk. [20] data ini menunjukkan performa yang normal dalam merespons tekanan *input* yang meningkat secara bertahap.

### Ucapan Terima Kasih

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, kesehatan, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Keberhasilan dalam menyusun penelitian ini tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan kerja sama dari berbagai pihak yang dengan tulus memberikan kontribusinya, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan, masukan, dan motivasi selama proses penelitian ini berlangsung. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada pihak Universitas Indonesia yang telah memberikan izin dan memfasilitasi selama penelitian akhir saya, serta rekan-rekan sejawat, laboran, serta seluruh pihak yang turut serta dalam pengumpulan data dan

analisis, atas kerja sama dan kebersamaan yang sangat berarti dalam mendukung kelancaran penelitian ini.

Semoga segala bentuk bantuan dan dukungan yang telah diberikan mendapat balasan yang setimpal. Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan di masa mendatang.

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa laju aliran fluida berpengaruh signifikan terhadap perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam sistem pipa heliks reaktor pirolisis. Terdapat tiga fase kerja sistem: fase akselerasi, fase linier, dan fase jenuh. Nilai parameter meningkat secara stabil hingga mencapai titik maksimum, kemudian menurun meskipun *input* terus bertambah. Hal ini menunjukkan adanya batas kapasitas sistem, di mana efisiensi menurun setelah titik optimum. Desain pipa heliks dan sistem kendali berbasis *microcontroller* terbukti efektif dalam merekam dan mengatur kinerja sistem secara *real-time*.

### Saran

1. Mengintegrasikan sistem kendali otomatis untuk menjaga kestabilan suhu dan tekanan.
2. Mengevaluasi kembali desain geometri pipa heliks guna memperoleh efisiensi termal yang lebih tinggi.
3. Menggunakan sensor dengan resolusi lebih tinggi dan pencatatan data otomatis.
4. Melakukan pengujian pada skala lebih besar guna menguji keandalan sistem dalam konteks industri.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Li, J. Wang, G. Xie, and B. Sunden, "Effect of thermal pyrolysis on heat transfer and upward flow characteristics in a rectangular channel using endothermic hydrocarbon fuel," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 244, p. 116806, 2021, doi: 10.1016/j.ces.2021.116806.
- [2] P. Parthasarathy, T. Al-Ansari, H. R. Mackey, K. Sheeba Narayanan, and G. McKay, "A review on prominent animal and municipal wastes as potential feedstocks for solar pyrolysis for biochar production," *Fuel*, vol. 316, no. December 2021, p. 123378, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123378.
- [3] M. M. Hasan, M. G. Rasul, M. I. Jahirul, and M. Mofijur, "Fuelling the future: Unleashing energy and exergy efficiency from municipal green waste pyrolysis," *Fuel*, vol. 357, no. PA, p. 129815,

- 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129815.
- [4] B. J. Álvarez-Chávez, S. Godbout, É. Le Roux, J. H. Palacios, and V. Raghavan, "Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts," *Biofuel Res. J.*, vol. 6, no. 4, pp. 1054–1064, 2019, doi: 10.18331/BRJ2019.6.4.2.
- [5] M. Hashemian, S. Jafarmadar, H. Ayed, and M. Wae-hayee, "Thermal-hydrodynamic and exergetic study of two-phase flow in helically coiled pipe with helical wire insert," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 30, no. November 2021, p. 101718, 2022, doi: 10.1016/j.csite.2021.101718.
- [6] J. I. Córcoles, J. D. Moya-Rico, A. E. Molina, and J. A. Almendros-Ibáñez, "Numerical and experimental study of the heat transfer process in a double pipe heat exchanger with inner corrugated tubes," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 158, no. February, 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106526.
- [7] M. S. Jesus, A. Napoli, P. F. Trugilho, Á. A. Abreu Júnior, C. L. M. Martinez, and T. P. Freitas, "Energy and mass balance in the pyrolysis process of eucalyptus wood," *Cerne*, vol. 24, no. 3, pp. 288–294, 2018, doi: 10.1590/01047760201824032561.
- [8] S. Li, S. Zhang, B. Qian, K. Qin, and K. Luo, "Entropy generation analysis on condensation upward flow for hydrocarbon mixture in two types of helical wavy pipes," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 54, no. January, p. 104085, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104085.
- [9] S. Wang, K. Li, W. Yu, C. Liu, and Z. Guan, "Effects of non-condensable gas on thermodynamic performance of transcritical organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 292, no. January, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130513.
- [10] K. A. Iheonye, I. Edeh, I. K. Muritala, and A. Kuye, "Characterization of Coconut Shell Activated Carbon Catalyst for the Pyrolysis of Waste Sac Bags into Liquid Hydrocarbon Fuels," *J. Energy Res. Rev.*, vol. 9, no. 1, pp. 43–50, 2021, doi: 10.9734/jenrr/2021/v9i130224.
- [11] M. N. Nabi, W. K. Hussam, A. Bin Rashid, J. Islam, S. Islam, and H. M. M. Afroz, "Notable improvement of fuel properties of waste tire pyrolysis oil by blending a novel pumpkin seed oil–biodiesel," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 112–119, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.246.
- [12] J. Grams, "Chromatographic analysis of bio-oil formed in fast pyrolysis of lignocellulosic biomass," *Rev. Anal. Chem.*, vol. 39, no. 1, pp. 65–77, 2020, doi: 10.1515/revac-2020-0108.
- [13] F. Guo, X. Wang, and X. Yang, "Potential pyrolysis pathway assessment for microalgae-based aviation fuel based on energy conversion efficiency and life cycle," *Energy Convers. Manag.*, vol. 132, pp. 272–280, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.020.
- [14] X. Hu *et al.*, "Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics for their resource reuse: A technical review," *Carbon Resour. Convers.*, vol. 6, no. 3, pp. 215–228, 2023, doi: 10.1016/j.crcon.2023.03.002.
- [15] V. S. Dadi *et al.*, "Recent advancements of CFD and heat transfer studies in pyrolysis: A review," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 175, no. May, p. 106163, 2023, doi: 10.1016/j.jaap.2023.106163.
- [16] P. R. Bhoi and M. H. Rahman, "Hydrocarbons recovery through catalytic pyrolysis of compostable and recyclable waste plastics using a novel desk-top staged reactor," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 27, p. 102453, 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102453.
- [17] S. Anis, R. Alhakim, A. Mustamil Khoiron, and A. Kusumastuti, "Bio-oil composition from low temperature microwaves-assisted pyrolysis of cooking oils," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1444, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1444/1/012045.
- [18] T. Zhong *et al.*, "Thermodynamic performance study on the novel efficient flow pattern global construction evaporator," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 54, no. January, p. 103997, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.103997.
- [19] S. Wang, Y. Wen, Z. Shi, I. Nuran Zaini, P. Göran Jönsson, and W. Yang, "Novel carbon-negative methane production via integrating anaerobic digestion and pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste," *Energy Convers. Manag.*, vol. 252, no. November 2021, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.115042.
- [20] O. A. Kolenchukov *et al.*, "Numerical and Experimental Study of Heat Transfer in Pyrolysis Reactor Heat Exchange Channels with Different Hemispherical Protrusion Geometries," *Energies*, vol. 16, no. 16, 2023, doi: 10.3390/en16166086.