

STRATEGI PENGENDALIAN TEMPERATUR DAN TEKANAN UNTUK MENINGKATKAN KINERJA PROSES PIROLISIS

Riny Yolandha Parapat*, Ngainul Khodarrohmah, Silfi Ama Della, Sulistya Nurul Fitri

Department of Chemical Engineering, Institut Teknologi Nasional Bandung

*Corresponding email: rinyyolandha@itenas.ac.id

Abstrak: Proses pirolisis adalah konversi termokimia bahan organik melalui pemanasan dalam kondisi minim oksigen untuk menghasilkan produk seperti bio-oil, biochar, dan gas sintetis, di mana parameter operasi seperti temperatur dan tekanan sangat menentukan distribusi produk serta efisiensi proses. Pengendalian temperatur dan tekanan yang tepat penting karena dapat meningkatkan hasil produk yang diinginkan dan mengoptimalkan stabilitas proses, namun kedua parameter ini sering kali tidak dikaji secara komprehensif dalam literatur kontrol proses. Artikel ini bertujuan untuk meninjau secara sistematis strategi pendekatan pengendalian temperatur dan tekanan dalam meningkatkan kinerja proses pirolisis, termasuk strategi kontrol yang digunakan, pengaruh parameter operasi terhadap hasil pirolisis, serta tantangan dan peluang penelitian lanjutan. Metode yang digunakan adalah review literatur, dengan menelaah artikel ilmiah dari jurnal internasional bereputasi yang dapat diakses secara bebas serta yang mencakup penelitian kontrol dan parameter pirolisis. Literatur yang direview dipilih berdasarkan relevansi dengan tema pengendalian proses, pirolisis, dan pengaruh temperatur serta tekanan sebagai variabel utama dalam pirolisis. Hasil kajian menunjukkan bahwa variasi temperatur pirolisis memiliki pengaruh dominan terhadap komposisi produk pirolisis, termasuk perubahan yield bio-oil, biochar, dan gas serta sifat kimia biochar. Selain itu, tekanan operasi juga mempengaruhi distribusi produk dengan tekanan yang meningkat cenderung menurunkan konsentrasi hidrokarbon aromatik polisiklik yang tidak diinginkan dalam biochar. Dari sisi kontrol proses, penggunaan algoritma seperti PID untuk pengaturan temperatur terbukti dapat meningkatkan stabilitas suhu piroliser dan mendukung pengoperasian yang lebih konsisten dan produktif. Secara keseluruhan, integrasi strategi kontrol yang efektif dengan pemahaman parameter operasi seperti temperatur dan tekanan merupakan landasan penting dalam upaya meningkatkan efisiensi dan kualitas proses pirolisis.

Kata kunci: pirolisis; pengendalian temperatur; tekanan operasi; kontrol proses; PID; parameter proses.

Abstract: Pyrolysis is a thermochemical conversion of organic materials through heating under limited oxygen conditions to produce products such as bio-oil, biochar, and syngas, in which operating parameters such as temperature and pressure play a crucial role in determining product distribution and process efficiency. Proper control of temperature and pressure is important because it can enhance the yield of desired products and optimize process stability; however, these two parameters are often not comprehensively examined in the process control literature. This article aims to systematically review strategies for controlling temperature and pressure to improve the performance of the pyrolysis process, including the control strategies applied, the influence of operating parameters on pyrolysis outcomes, as well as challenges and opportunities for future research. The method employed is a literature review, examining scientific articles from reputable international journals that are freely accessible and that address control studies and pyrolysis parameters. The reviewed literature was selected based on its relevance to process control, pyrolysis, and the influence of temperature and pressure as the main variables in pyrolysis. The results indicate that variations in pyrolysis temperature have a dominant effect on the composition of pyrolysis products, including changes in the yield of bio-oil, biochar, and gas, as well as the chemical properties of biochar. In addition, operating pressure also affects product distribution, where increased pressure tends to reduce the concentration of undesirable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar. From a process control perspective, the use of algorithms such as PID for temperature regulation has been shown to improve the thermal stability of the pyrolyzer and support more consistent and productive operation. Overall, the integration of effective control strategies with a sound understanding of operating parameters such as temperature and pressure constitutes an essential foundation for improving the efficiency and quality of the pyrolysis process.

Keywords: pyrolysis; temperature control; operating pressure; process control; PID; process parameters

PENDAHULUAN

Pengendalian proses merupakan elemen fundamental dalam industri kimia karena berperan langsung dalam menjamin stabilitas operasi, konsistensi kualitas produk, efisiensi energi, serta keselamatan proses. Proses-proses kimia industri umumnya beroperasi dalam kondisi ekstrem, seperti temperatur dan tekanan tinggi, serta melibatkan reaksi nonlinier yang

sensitif terhadap gangguan. Tanpa sistem pengendalian yang memadai, perubahan kecil pada kondisi operasi dapat berkembang menjadi fluktuasi besar yang mengganggu kinerja proses secara keseluruhan. Literatur klasik pengendalian proses menegaskan bahwa tujuan utama pengendalian bukan hanya menjaga variabel proses pada titik operasi tertentu, tetapi juga memastikan sistem mampu merespons gangguan internal maupun eksternal secara stabil dan aman. Oleh karena itu, pengendalian proses menjadi kebutuhan mutlak dalam perancangan dan pengoperasian fasilitas industri kimia modern (Supanto et al., 2022).

Dalam konteks proses termal, pengendalian temperatur dan tekanan memiliki peran yang sangat krusial. Temperatur secara langsung memengaruhi laju reaksi, kinetika dekomposisi, serta selektivitas produk, sedangkan tekanan memengaruhi keseimbangan fase, waktu tinggal, dan distribusi produk gas maupun cair. Ketidakterkendalian dua variabel ini sering kali menjadi sumber utama instabilitas proses di industri. menjelaskan bahwa proses dengan karakteristik nonlinier dan dinamika cepat, seperti reaktor kimia dan proses termokimia, sangat rentan terhadap osilasi dan ketidakstabilan jika strategi pengendalian yang diterapkan tidak tepat (Hakiki, 2022).

Pirolisis merupakan salah satu contoh proses industri yang sangat bergantung pada pengendalian temperatur dan tekanan. Proses ini melibatkan dekomposisi termal material organik pada kondisi terbatas oksigen untuk menghasilkan bio-oil, gas, dan residu padat. Pirolisis banyak dikembangkan dalam pengolahan biomassa dan limbah sebagai bagian dari upaya menuju sistem energi berkelanjutan. Namun demikian, proses pirolisis dikenal memiliki kompleksitas tinggi karena melibatkan berbagai reaksi paralel dan berurutan yang sangat sensitif terhadap kondisi operasi. Perubahan temperatur beberapa derajat saja dapat menggeser jalur reaksi dominan, sehingga berdampak signifikan terhadap yield dan komposisi produk yang dihasilkan (Iskandar et al., 2021).

Dalam praktik industri, berbagai permasalahan nyata sering muncul akibat pengendalian temperatur dan tekanan yang kurang optimal pada proses pirolisis. Salah satu masalah utama adalah instabilitas proses, yang ditandai dengan fluktuasi temperatur reaktor dan variasi tekanan gas hasil pirolisis. Instabilitas ini dapat menyebabkan kualitas produk yang tidak konsisten, penurunan konversi, serta pembentukan produk samping yang tidak diinginkan. Studi-studi eksperimental menunjukkan bahwa temperatur pirolisis yang tidak terkontrol dengan baik dapat menghasilkan bio-oil dengan kandungan air tinggi dan nilai kalor rendah, sehingga menurunkan nilai ekonomis produk (Balikan et al., 2021).

Selain instabilitas, pemborosan energi merupakan tantangan besar dalam operasi pirolisis. Proses ini membutuhkan suplai panas yang signifikan, dan tanpa pengendalian temperatur yang presisi, energi sering kali digunakan secara berlebihan untuk mempertahankan kondisi operasi. Pemanasan berlebih tidak hanya meningkatkan biaya operasi, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca. Literatur menunjukkan bahwa strategi pengendalian yang efektif dapat menurunkan konsumsi energi secara signifikan dengan menjaga temperatur operasi pada rentang optimum yang sesuai dengan karakteristik bahan baku dan tujuan proses (Arianto et al., 2024).

Aspek keselamatan (safety) juga menjadi isu kritis dalam proses pirolisis. Gas hasil pirolisis umumnya mengandung komponen mudah terbakar seperti hidrogen, metana, dan karbon monoksida. Jika tekanan sistem tidak dikendalikan dengan baik, akumulasi gas tersebut dapat meningkatkan risiko kebocoran, kebakaran, atau ledakan. Tekanan berlebih juga dapat menyebabkan kegagalan mekanik pada peralatan reaktor dan sistem perpipaan. Oleh karena itu, pengendalian tekanan yang andal menjadi bagian integral dari sistem keselamatan proses, sejalan dengan prinsip-prinsip keselamatan industri kimia yang dibahas dalam literatur pengendalian proses dan keselamatan proses industri (Sa'diyah et al., 2021)

Seiring meningkatnya tuntutan terhadap efisiensi energi, keberlanjutan, dan standar keselamatan yang lebih ketat, pendekatan pengendalian proses dalam sistem pirolisis terus

mengalami perkembangan. Berbagai strategi pengendalian telah diterapkan, mulai dari pengendalian konvensional seperti Proportional Integral Derivative (PID) hingga metode lanjutan berbasis model dan optimasi (Novia, 2021). Namun, efektivitas strategi-strategi tersebut sangat bergantung pada pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik dinamik proses serta interaksi antara variabel temperatur dan tekanan. Menekankan bahwa pemilihan struktur kendali yang tepat sangat penting untuk proses multivariat dan nonlinier, seperti pirolisis, agar sistem dapat beroperasi secara stabil dan efisien.

Berdasarkan latar belakang tersebut, paper ini menyajikan suatu review literatur yang berfokus pada pendekatan pengendalian temperatur dan tekanan dalam meningkatkan kinerja proses pirolisis. Ruang lingkup review ini mencakup pembahasan peran fundamental temperatur dan tekanan terhadap mekanisme reaksi dan distribusi produk pirolisis, identifikasi permasalahan operasional yang umum terjadi di industri terkait instabilitas, konsumsi energi, dan keselamatan, serta tinjauan terhadap berbagai pendekatan pengendalian proses yang telah dilaporkan dalam literatur ilmiah. Dengan mengintegrasikan perspektif teknik kimia dan teori pengendalian proses, paper ini diharapkan dapat memberikan landasan konseptual yang kuat bagi pengembangan dan penerapan sistem pengendalian yang lebih efektif pada proses pirolisis di masa depan.

Dinamika Proses Pirolisis

Pirolisis merupakan sebuah proses dekomposisi termokimia di mana bahan organik seperti biomassa, limbah plastik, atau material karbon-*rich* dipanaskan pada suhu tinggi dalam lingkungan tanpa atau sangat minim oksigen, sehingga ikatan kimia dalam material terurai menjadi fragmen molekul yang lebih kecil tanpa terjadi pembakaran lengkap seperti pada oksidasi. Secara umum, pirolisis berlangsung pada rentang temperatur menengah hingga tinggi ($\pm 300 - 800$ °C), dan karena tidak ada oksigen yang cukup untuk mendukung reaksi pembakaran, reaksi yang terjadi murni berupa pemutusan ikatan kimia oleh panas (*thermal decomposition*) tanpa pembentukan CO₂ dan H₂O secara dominan sebagaimana pada pembakaran biasa. Melalui proses ini terbentuk tiga produk utama: (1) gas pirolisis yang terdiri dari gas ringan dan syngas, (2) cairan pirolisis atau bio-oil, dan (3) residu padat berupa biochar atau arang, masing-masing dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti temperatur, laju pemanasan, dan waktu tinggal umpan dalam reaktor. Pirolisis juga dicirikan oleh reaksi yang kompleks dan nonlinier, karena sejumlah besar jalur reaksi kimia berlangsung secara simultan dan bersaing misalnya devolatilisasi, *cracking*, dan reaksi sekunder fragmen yang hasil akhirnya sangat bergantung pada parameter operasi tersebut dan tidak dapat dijelaskan sebagai hubungan linier sederhana antara variabel input dan output proses (Hidayat & Kusmiyati, 2025).

Gambar 1 menunjukkan skema reaksi pirolisis, yaitu proses dekomposisi termokimia biomassa melalui pemanasan pada kondisi tanpa oksigen. Panas menyebabkan struktur molekul kompleks terurai menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui tahapan seperti penguapan air, devolatilisasi, dan reaksi *cracking*. Dari proses ini dihasilkan tiga fraksi utama, yaitu gas pirolisis, cairan bio-oil hasil kondensasi uap volatil, serta residu padat berupa char. Perbandingan jumlah ketiga produk tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, terutama temperatur dan tekanan, sehingga pengendalian kedua parameter ini penting untuk menjaga kestabilan proses dan kualitas produk (Casnan, 2019).

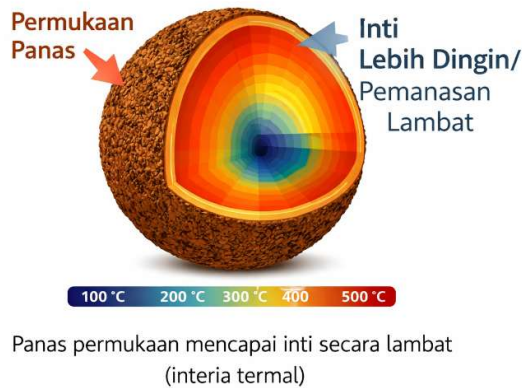


Gambar 1 Skema Reaksi Pirolisis

Setelah biomassa dipanaskan dalam reaktor pirolisis, pemecahan molekul kompleks tidak terjadi melalui satu jalur tunggal, tetapi melalui banyak jalur reaksi yang berjalan secara paralel dan berurutan, sehingga karakter kinetik pirolisis menjadi nonlinier dan kompleks. Pada temperatur tinggi, komponen utama biomassa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin masing-masing mengalami devolatilisasi pada rentang suhu yang berbeda, diikuti oleh reaksi sekunder seperti *cracking*, *reforming*, dan rekombinasi radikal yang membentuk gas, cairan, dan residu padat. Perubahan kecil pada parameter operasi seperti temperatur, laju pemanasan, atau waktu tinggal dalam reaktor dapat mempengaruhi cepat atau lambatnya jalur reaksi ini dan secara drastis mengubah distribusi produk akhir. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara variabel masukan dan keluaran proses tidak linier sederhana, melainkan dipengaruhi oleh interaksi reaksi primer dan sekunder yang saling kompetitif sepanjang proses pirolisis. Studi mekanisme pirolisis biomassa mengakui bahwa pirolisis berlangsung melalui berbagai tahapan seperti depolimerisasi, fragmetasi, dan reaksi sekunder yang menghasilkan berbagai senyawa volatil dan residu, yang keseluruhannya berkontribusi pada sifat kinetik nonlinier proses (Mau, 2018).

Gambar 2 menunjukkan profil distribusi temperatur di dalam satu partikel biomassa selama proses pirolisis. Warna merah, oranye di bagian luar menandakan bahwa permukaan partikel menerima panas terlebih dahulu karena kontak langsung dengan sumber panas di dalam reaktor. Sementara itu, warna biru, hijau di bagian tengah menunjukkan bahwa inti partikel memiliki temperatur lebih rendah dan mengalami pemanasan lebih lambat. Perbedaan temperatur antara permukaan dan inti ini terjadi karena panas harus merambat dari luar ke dalam melalui mekanisme konduksi. Material biomassa umumnya memiliki konduktivitas termal rendah, sehingga panas tidak langsung menyebar merata. Fenomena ini disebut thermal inertia (inersia termal), yaitu kecenderungan bahan untuk menahan perubahan suhu sehingga terdapat time lag antara pemanasan permukaan dan inti partikel. Dalam konteks pirolisis, kondisi ini sangat penting karena menyebabkan reaksi di permukaan dapat terjadi lebih cepat dibanding bagian dalam partikel. Akibatnya, devolatilisasi dan pembentukan gas atau bio-oil bisa dimulai di luar sementara inti masih dalam tahap pemanasan awal. Gradien temperatur ini berpengaruh langsung pada laju reaksi, distribusi produk, serta stabilitas pengendalian temperatur di dalam reaktor (Asari et al., 2015).

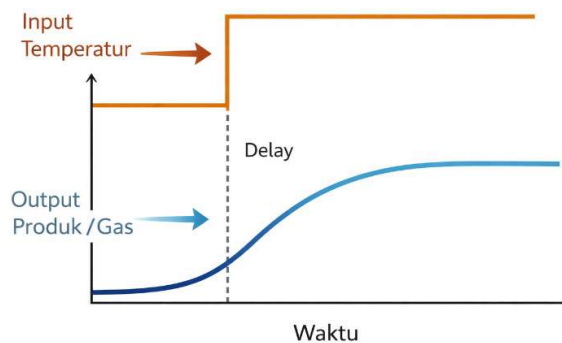
Profil Distribusi Temperatur dalam Partikel



Gambar 2 Profil Distribusi Temperatur dalam partikel

Fenomena time delay merupakan karakteristik dinamis sistem termal dan reaksi, di mana perubahan pada variabel input tidak langsung menghasilkan respons pada variabel output. Dalam konteks sistem perpindahan panas dan reaksi kimia, time delay terjadi karena adanya waktu yang dibutuhkan energi panas atau massa untuk berpindah, tersimpan, dan memicu perubahan fisik maupun kimia pada sistem. Secara teoritis, time delay sering dikaitkan dengan konsep *dynamic response* dan *transport phenomena*, di mana sistem memiliki memori terhadap kondisi sebelumnya (Asari & Alharis dan Elita R, 2015).

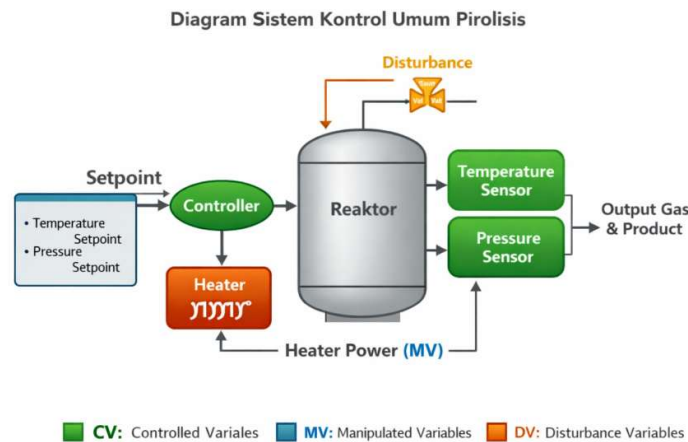
Gambar 3 menunjukkan grafik time delay dalam proses pirolisis. Pada sumbu X ditunjukkan waktu, sedangkan kurva oranye merepresentasikan input temperatur yang dinaikkan secara tiba-tiba (step input). Namun, kurva biru yang menunjukkan output produk/gas tidak langsung naik pada saat temperatur dinaikkan, melainkan baru meningkat setelah selang waktu tertentu yang ditandai sebagai delay. Fenomena ini terjadi karena panas membutuhkan waktu untuk merambat ke dalam partikel biomassa (thermal inertia) serta waktu yang dibutuhkan reaksi kimia untuk menghasilkan uap volatil yang kemudian keluar sebagai produk gas. Selain itu, terdapat pengaruh residence time, yaitu waktu tinggal material dan produk di dalam reaktor sebelum terdeteksi sebagai keluaran. Akibatnya, respons output selalu tertinggal dibanding perubahan input. Grafik ini menegaskan bahwa sistem pirolisis memiliki karakter dinamika lambat dan time delay, sehingga dalam perancangan sistem pengendalian temperatur dan tekanan perlu dipertimbangkan efek keterlambatan ini agar tidak terjadi overshoot, osilasi, atau ketidakstabilan proses.



Gambar 3 Grafik time delay

Variabel Pengendalian Proses pada Pirolisis

Gambar 4 menunjukkan diagram sistem kontrol umum pada proses pirolisis yang digunakan untuk menjaga kondisi operasi reaktor agar tetap stabil dan sesuai dengan nilai yang diinginkan. Sistem ini terdiri atas reaktor pirolisis sebagai unit utama, sensor suhu dan tekanan sebagai alat pengukuran, heater sebagai sumber energi panas, serta valve tekanan sebagai pengendali aliran dan tekanan di dalam sistem. Diagram ini disusun untuk memvisualisasikan hubungan antara controlled variable (CV), manipulated variable (MV), dan disturbance variable (DV) dalam satu kesatuan sistem kontrol tertutup (closed-loop control system). Pada diagram tersebut, controlled variables (CV) ditunjukkan oleh suhu dan tekanan di dalam reaktor pirolisis. Kedua variabel ini merupakan parameter proses yang harus dipertahankan pada nilai setpoint tertentu karena sangat memengaruhi laju reaksi pirolisis, komposisi produk, serta pembentukan gas dan biochar. Sensor suhu dan sensor tekanan berfungsi mengukur kondisi aktual di dalam reaktor dan mengirimkan sinyal umpan balik ke pengendali (controller), sehingga sistem dapat memantau apakah kondisi operasi sudah sesuai dengan setpoint yang ditentukan (Sugiarto et al., 2024).



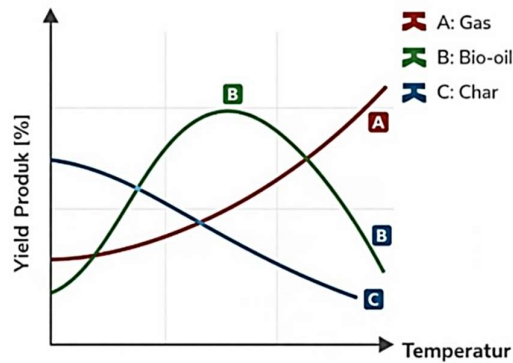
Gambar 4 Diagram sistem kontrol umum pirolisis

Pengaruh Temperatur dalam Pirolisis

Temperatur operasi merupakan salah satu variabel proses paling dominan dalam pirolisis, karena ia secara langsung mempengaruhi jalur reaksi termal, laju pembentukan produk, dan komposisi fraksi yang dihasilkan. Penelitian eksperimental pada variasi temperatur pirolisis limbah batang tembakau menunjukkan bahwa variasi temperatur secara signifikan memengaruhi karakteristik bio-oil, seperti pH, total padatan, dan komposisi kimia, yang berarti perubahan suhu akan berpengaruh pada kualitas serta kuantitas produk cair yang dihasilkan. Selain itu, kajian internasional terhadap distribusi produk pirolisis lignoselulosa memperlihatkan bahwa suhu reaksi yang berbeda memberikan dominasi fraksi produk yang berbeda: pada kisaran sekitar 445–500 °C, fraksi volatil dapat meningkat sehingga menghasilkan bio-oil dengan komponen kondensabel lebih tinggi, sedangkan suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menggeser selektivitas produk ke arah gas atau residu padat seperti char. Studi lain terhadap pirolisis sludge anaerobik mengonfirmasi bahwa dengan meningkatnya temperatur pirolisis dari 400 °C ke 600 °C, persentase char menurun sementara fraksi gas dan bio-oil meningkat, yang menunjukkan pengaruh kuat temperatur pada distribusi kuantitatif produk pirolisis. Secara mekanistik, peningkatan temperatur mempercepat reaksi dekomposisi termal, memperbesar laju evaporasi senyawa volatil, dan meningkatkan frekuensi

terjadinya cracking molekul kompleks menjadi fragmen lebih kecil, sehingga temperatur menjadi parameter kunci yang menentukan keseimbangan antara pembentukan gas, bio-oil, dan char dalam proses pirolisis (Mudjiono et al., 2025).

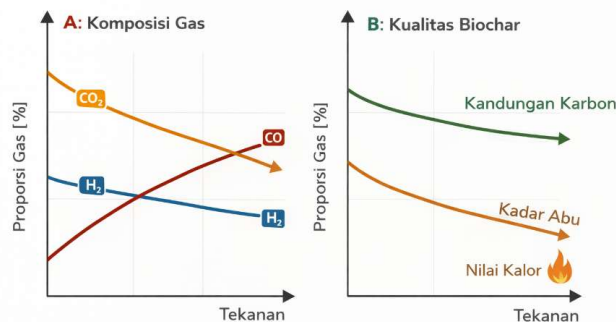
Gambar 5 menunjukkan hubungan antara temperatur pirolisis dan yield produk berupa gas, bio-oil, dan char. Seiring meningkatnya temperatur, yield gas meningkat akibat reaksi cracking yang semakin dominan. Yield bio-oil meningkat hingga mencapai maksimum pada temperatur menengah, kemudian menurun pada temperatur tinggi karena terurai menjadi gas. Sebaliknya, yield char menurun dengan kenaikan temperatur karena dekomposisi termal bahan semakin sempurna. Grafik ini menunjukkan bahwa temperatur harus dikontrol agar distribusi produk sesuai dengan target yang diinginkan.



Gambar 5 Grafik pengaruh temperatur terhadap yield produk

Pengaruh Tekanan dalam Pirolisis

Pengaruh tekanan terhadap produk pirolisis, yang ditinjau dari komposisi gas dan kualitas biochar ditunjukkan pada **Gambar 6**. Pada grafik komposisi gas, peningkatan tekanan menyebabkan perubahan fraksi gas yang dihasilkan, seperti meningkatnya kandungan CO dan CO₂ akibat intensifikasi reaksi sekunder dan pergeseran kesetimbangan reaksi. Hal ini menandakan bahwa tekanan memengaruhi jalur reaksi kimia selama pirolisis. Pada grafik kualitas biochar, terlihat bahwa kenaikan tekanan berhubungan dengan peningkatan kualitas biochar, yang dapat diartikan sebagai meningkatnya densitas karbon, stabilitas struktur, atau nilai kalor. Tekanan yang lebih tinggi menekan pelepasan volatil secara cepat, sehingga mendorong pembentukan struktur karbon padat yang lebih terorganisir. Secara keseluruhan, Pengaturan tekanan yang tepat diperlukan untuk mengendalikan komposisi gas dan meningkatkan kualitas biochar sesuai dengan tujuan proses.



Gambar 6 Pengaruh tekanan terhadap produk pirolisis

Strategi Kontrol Konvensional dalam Proses Termal

Strategi kontrol konvensional yang paling umum digunakan dalam proses termal, termasuk pirolisis, adalah kontrol umpan balik (feedback control) berbasis Proportional–Integral–Derivative (PID). Pada pengendalian temperatur, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, sensor temperatur (Temperature Transmitter, TT) berfungsi mengukur suhu aktual di dalam reaktor pirolisis dan mengirimkan sinyal ke pengendali temperatur (Temperature Controller, TC). Selanjutnya, TC membandingkan nilai temperatur terukur dengan nilai setpoint dan menghasilkan sinyal kendali untuk menyesuaikan daya pemanas (heater) sebagai aktuator utama. Mekanisme ini memungkinkan sistem menjaga temperatur reaktor tetap stabil meskipun terjadi gangguan seperti variasi laju umpan atau perubahan sifat bahan baku, sehingga reaksi pirolisis dapat berlangsung pada kondisi termal yang diinginkan.



Gambar 7 Sistem Kontrol Temperatur Pirolisis di Industri

Selain temperatur, tekanan reaktor juga dikendalikan menggunakan loop kontrol konvensional, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 8**. Pada loop ini, Pressure Transmitter (PT) mengukur tekanan di dalam reaktor dan mengirimkan sinyal ke Pressure Controller (PC). PC kemudian mengatur control valve untuk melepaskan atau menahan aliran gas, sehingga tekanan dapat dipertahankan pada batas aman dan operasional. Pengendalian tekanan sangat penting pada proses pirolisis karena akumulasi gas volatil akibat reaksi termal dapat menyebabkan kenaikan tekanan yang tidak diinginkan. Dengan kombinasi kontrol temperatur dan tekanan berbasis PID ini, sistem pirolisis konvensional mampu beroperasi secara relatif stabil dan aman, meskipun masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi dinamika nonlinier dan time delay yang khas pada proses pirolisis.

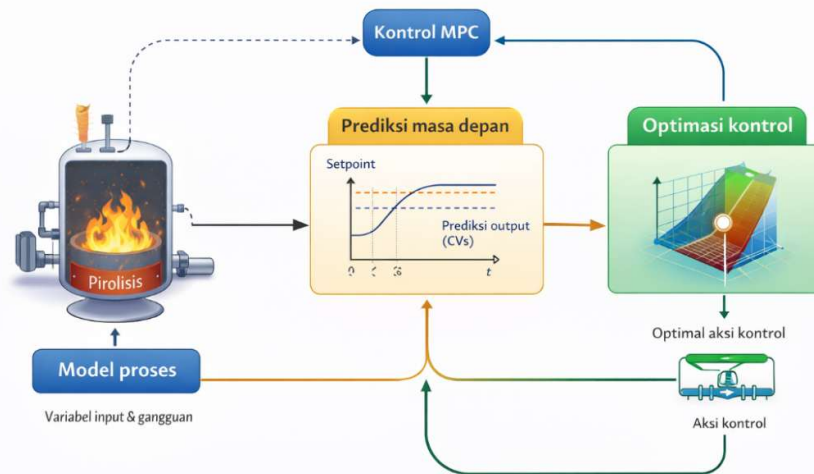


Gambar 8 Sistem Kontrol Tekanan Pirolisis di Industri

Kontrol Lanjut dan Teknik Modern untuk Pirolisis

Kontrol lanjut (sering juga disebut *advanced control*) adalah pendekatan pengendalian proses yang lebih canggih dibandingkan kontrol konvensional (seperti PID), yang dirancang untuk menangani sistem dengan dinamika kompleks. Perkembangan teknologi pirolisis mendorong penerapan teknik modern yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, stabilitas operasi, dan selektivitas produk. Teknik modern ini tidak hanya berfokus pada desain reaktor, tetapi juga pada pendekatan pengendalian, pemodelan, dan integrasi sistem yang lebih canggih dibandingkan metode konvensional. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas dan tuntutan efisiensi pada proses pirolisis, teknik kontrol lanjut seperti Model Predictive Control (MPC) mulai banyak dikaji dan diterapkan sebagai alternatif terhadap kontrol konvensional.

Gambar 9, MPC bekerja dengan memanfaatkan model matematis proses untuk memprediksi perilaku sistem di masa depan berdasarkan kondisi saat ini dan gangguan yang terukur. Prediksi ini kemudian digunakan dalam suatu algoritma optimasi untuk menentukan aksi kontrol terbaik dalam horizon waktu tertentu, sehingga variabel proses seperti temperatur dan tekanan dapat dijaga tetap berada dalam batas operasional yang diinginkan. Dalam konteks pirolisis, kemampuan MPC untuk menangani sistem multivariat, dinamika nonlinier, serta efek time delay dan thermal inertia menjadikannya sangat sesuai, terutama ketika terjadi perubahan laju umpan, variasi sifat bahan baku, atau gangguan termal. Dengan pendekatan prediktif dan optimasi ini, MPC mampu meningkatkan stabilitas operasi, kualitas distribusi produk, serta efisiensi energi proses pirolisis dibandingkan dengan strategi kontrol konvensional berbasis PID.



Gambar 9 Skema Model Predictive Control (MPC)

METODE

Metode penelitian dalam kajian strategi pengendalian temperatur dan tekanan untuk meningkatkan kinerja proses pirolisis menggunakan pendekatan eksperimental dan analitis. Penelitian diawali dengan perancangan sistem pirolisis yang dilengkapi sensor temperatur dan tekanan untuk memantau kondisi proses secara real time. Variasi temperatur dan tekanan diterapkan secara bertahap guna mengidentifikasi pengaruh masing-masing parameter terhadap laju reaksi, waktu tinggal, serta hasil produk pirolisis berupa bio-oil, gas, dan arang. Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan kondisi operasi optimal yang menghasilkan efisiensi proses tertinggi. Selain itu, metode kontrol diterapkan melalui pengaturan umpan panas dan katup tekanan agar kondisi reaktor tetap stabil selama proses berlangsung. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan kinerja sistem sebelum dan

sesudah penerapan strategi pengendalian. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap efektivitas pengendalian temperatur dan tekanan dalam meningkatkan kualitas serta kuantitas produk pirolisis secara berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tinjauan Strategi Pengendalian Proses Pirolisis

Dalam proses pirolisis, masalah kontrol yang paling sering dibahas dalam literatur adalah bagaimana menjaga suhu reaktor dan tekanan operasi tetap berada pada kondisi optimal untuk memaksimalkan rendemen serta kualitas produk, sekaligus menekan konsumsi energi dan emisi. Proses pirolisis memiliki karakteristik nonlinier yang kuat karena melibatkan reaksi dekomposisi termal, perubahan fase, serta ketergantungan yang tinggi terhadap laju pemanasan dan sifat bahan baku. Gangguan eksternal seperti fluktuasi laju umpan, ukuran partikel, dan kadar air biomassa dapat menyebabkan ketidakstabilan suhu dan tekanan, sehingga menurunkan performa proses jika tidak dikendalikan secara efektif. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan tekanan menjadi isu sentral dalam desain dan operasi sistem pirolisis modern (Tetra, 2018).

Kontrol PID merupakan metode yang paling luas diterapkan dalam sistem pirolisis, khususnya untuk pengendalian suhu reaktor dan elemen pemanas, karena kemudahan implementasi dan kompatibilitasnya dengan sistem kontrol industri yang sudah ada. PID bekerja dengan meminimalkan deviasi antara suhu aktual dan set point melalui pengaturan daya pemanas atau laju aliran media panas. Meskipun mampu memberikan kestabilan dasar, berbagai studi melaporkan bahwa PID sering menghasilkan overshoot dan osilasi suhu ketika terjadi perubahan cepat pada kondisi operasi atau sifat umpan. Kondisi ini berdampak langsung pada peningkatan konsumsi energi dan perubahan distribusi produk pirolisis, sehingga PID dinilai kurang optimal ketika tujuan utama pengendalian adalah efisiensi energi dan kualitas produk secara simultan (Dhiya Suci Auliyah et al., 2024).

Sebagai alternatif, Model Predictive Control (MPC) semakin banyak dikaji dan diterapkan pada sistem pirolisis karena kemampuannya menangani dinamika nonlinier dan sistem multivariabel. MPC menggunakan model proses untuk memprediksi perilaku suhu dan tekanan reaktor dalam horizon waktu tertentu, kemudian menentukan aksi kontrol optimal dengan mempertimbangkan batasan operasional seperti suhu maksimum reaktor dan batas tekanan aman. Dalam beberapa studi pirolisis biomassa dan limbah plastik, MPC dilaporkan mampu mengurangi fluktuasi suhu secara signifikan, meningkatkan stabilitas tekanan, serta menurunkan konsumsi energi pemanas dibandingkan kontrol PID konvensional. Dengan pendekatan prediktif ini, MPC dinilai lebih sesuai untuk mendukung pengoperasian pirolisis yang optimal dan efisien.

Selain PID dan MPC, literatur juga melaporkan perkembangan strategi kontrol hybrid, terutama kombinasi PID–MPC, untuk meningkatkan kinerja pengendalian proses pirolisis. Dalam pendekatan ini, PID digunakan sebagai pengendali dasar untuk menjamin respons cepat terhadap gangguan kecil, sementara MPC berperan sebagai pengendali tingkat lanjut yang mengoptimalkan set point suhu dan tekanan berdasarkan kondisi proses. Studi pada reaktor pirolisis skala pilot menunjukkan bahwa strategi hybrid mampu mengurangi deviasi suhu reaktor dan konsumsi energi secara kumulatif dibandingkan PID murni. Pendekatan ini dianggap lebih fleksibel dan adaptif terhadap perubahan kondisi operasi, serta relevan untuk sistem pirolisis yang bersifat kompleks dan tidak sepenuhnya linier.

Dari sisi implementasi industri, MPC penuh menghadapi tantangan berupa kebutuhan model proses yang akurat, kapasitas komputasi untuk optimasi real-time, serta integrasi dengan

sistem kontrol eksisting seperti DCS. Oleh karena itu, PID masih menjadi strategi yang paling realistis diterapkan pada banyak unit pirolisis industri karena biaya implementasi yang rendah dan ketersediaan sumber daya manusia yang familier. Namun, pendekatan hybrid PID–MPC dipandang sebagai solusi kompromi yang menjanjikan karena mampu meningkatkan efisiensi energi dan stabilitas operasi tanpa memerlukan investasi besar di tahap awal. Tren literatur menunjukkan bahwa strategi hybrid ini berpotensi menjadi arah pengembangan pengendalian suhu pirolisis di industri menuju operasi yang lebih optimal dan berkelanjutan.

B. Aplikasi Pengendalian Pirolisis di Industri

Pengendalian proses pirolisis pada aplikasi industri terutama berfokus pada pengaturan temperatur reaktor sebagai variabel kunci yang menentukan kestabilan operasi dan distribusi produk. Dalam reaktor pirolisis skala industri, seperti fixed-bed, fluidized-bed, dan rotary kiln reactor, temperatur harus dijaga pada rentang operasi optimum untuk menghindari pembentukan produk samping yang tidak diinginkan dan degradasi kualitas bio-oil atau gas. Sistem pengendalian suhu umumnya diterapkan dengan mengatur suplai energi pemanas, baik melalui elemen listrik, pembakaran tidak langsung, maupun media pemanas fluida, menggunakan pengendali PID yang terintegrasi dalam sistem Distributed Control System (DCS). Pendekatan ini dinilai cukup andal untuk menjaga kestabilan temperatur meskipun terdapat fluktuasi laju umpan dan variasi karakteristik bahan baku. Selain reaktor, penukar panas merupakan unit pendukung penting dalam sistem pirolisis industri, khususnya untuk proses pemanasan awal bahan baku dan pendinginan produk gas. Pengendalian suhu pada penukar panas berperan dalam menjaga efisiensi energi dan mencegah kejutan termal pada reaktor. Dalam praktik industri, pengendalian suhu penukar panas umumnya dilakukan menggunakan loop kontrol umpan balik dengan PID, di mana suhu keluaran dikendalikan melalui pengaturan laju alir media pemanas atau pendingin. Integrasi pengendalian suhu penukar panas dengan kontrol temperatur reaktor memungkinkan operasi pirolisis yang lebih stabil dan hemat energi (Simanjuntak, 2023).

Pada beberapa aplikasi industri, produk pirolisis selanjutnya diproses melalui unit pemisahan seperti kolom distilasi untuk memisahkan fraksi bio-oil berdasarkan titik didih. Dalam konteks ini, kestabilan temperatur reaktor pirolisis sangat berpengaruh terhadap beban dan komposisi umpan kolom distilasi. Oleh karena itu, koordinasi antara sistem pengendalian suhu reaktor dan sistem kontrol kolom distilasi menjadi penting untuk menjaga kualitas produk akhir. Meskipun kolom distilasi memiliki sistem kontrol tersendiri, performanya sangat dipengaruhi oleh kestabilan proses hulu, sehingga pengendalian suhu pirolisis yang optimal berkontribusi langsung terhadap kinerja unit pemisahan.

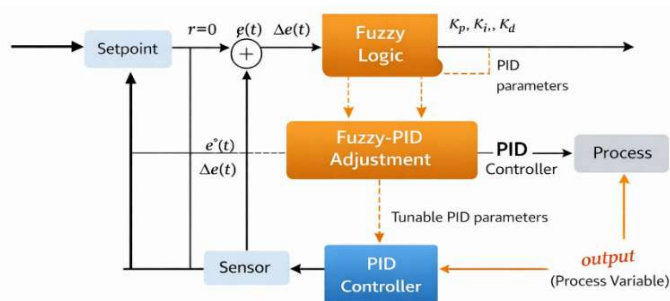
Studi kasus pada industri pirolisis menunjukkan bahwa penerapan kontrol PID dan cascade PID masih menjadi pilihan utama karena kesederhanaan, keandalan, dan kemudahan integrasi dengan sistem kontrol industri yang sudah ada. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan cascade control pada pengendalian suhu reaktor mampu meningkatkan respon sistem terhadap gangguan dan memperkecil deviasi temperatur dari set point. Sementara itu, penerapan metode kontrol lanjutan seperti Model Predictive Control (MPC) mulai diuji pada sistem pirolisis terintegrasi, terutama untuk mengoordinasikan pengendalian suhu dan tekanan secara simultan. Namun, implementasi MPC di industri masih terbatas karena kompleksitas model dan kebutuhan komputasi yang tinggi.

Secara keseluruhan, aplikasi industri menunjukkan bahwa desain pengendalian suhu yang efektif merupakan faktor utama dalam pengoperasian proses pirolisis yang optimal. Pengendalian suhu yang stabil tidak hanya meningkatkan kualitas dan konsistensi produk, tetapi juga mendukung keselamatan operasi dan efisiensi energi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, meskipun berbagai metode kontrol lanjutan terus dikembangkan, pendekatan

konvensional yang dirancang dengan baik dan disesuaikan dengan karakteristik proses masih menjadi solusi paling realistis dalam aplikasi industri pirolisis saat ini (Zhai et al., 2024).

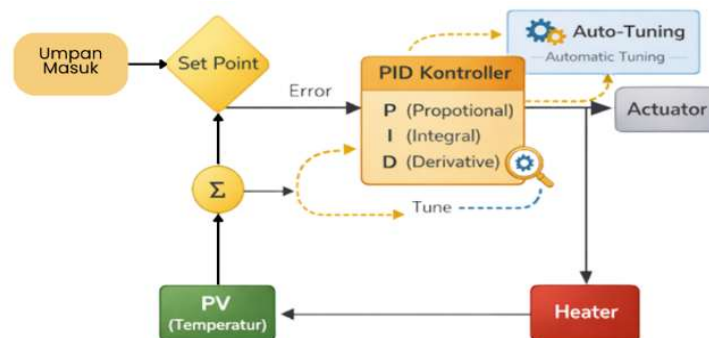
Kontrol PID temperatur adalah cara paling klasik dalam pengendalian suhu dengan komponen proporsional, integral, dan derivatif yang mengoreksi deviasi suhu secara real-time dari nilai set point. PID efektif dalam sistem linier dan stabil, serta banyak diimplementasikan di industri kimia karena sederhana dan mudah diintegrasikan dengan PLC/DCS. PID akan memodulasi output (mis. daya pemanas) berdasarkan besarnya error sehingga suhu mendekati set point, namun kinerjanya menurun pada sistem non-linier atau jika gangguan proses besar terjadi.

Fuzzy-PID adalah varian kontrol PID yang parameter P, I, D-nya disesuaikan dengan logika fuzzy berdasarkan aturan “IF-THEN” untuk menangani nonlinieritas dan ketidakpastian sistem (**Gambar 10**). Fuzzy-PID dapat merespon lebih adaptif terhadap perubahan kondisi proses dibandingkan PID konvensional, menghasilkan perubahan lebih halus dan performa lebih konsisten terutama pada variabel suhu yang cepat berubah. Studi menunjukkan penggunaan fuzzy-PID mampu meningkatkan respons sistem suhu lebih cepat dengan overshoot lebih kecil dibanding PID standar.



Gambar 10 Fuzzy-PID Control System

Automatic PID control mengacu pada sistem PID dengan fitur penalaan otomatis (auto-tuning) yang menyesuaikan parameter PID (K_p , K_i , K_d) secara real time berdasarkan karakter proses (**Gambar 11**). Metode auto-tuning meningkatkan kinerja kontrol tanpa perlu intervensi manual, terutama ketika proses berubah, misalnya saat umpan pirolisis berubah sifatnya. Auto-tuning membantu mempertahankan kestabilan suhu dan meminimalkan overshoot serta variansi suhu melalui optimasi parameter berdasarkan data operasional terkini, sehingga cocok untuk aplikasi industri dengan gangguan dinamik.



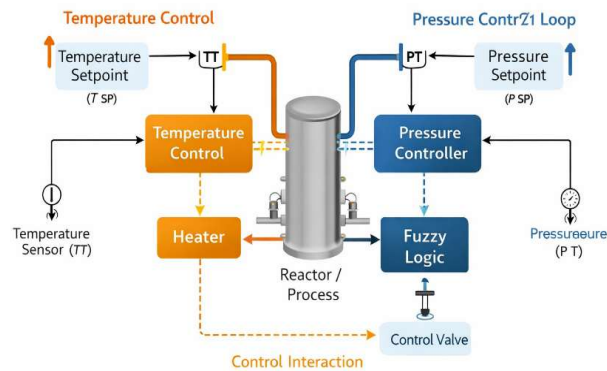
Gambar 11 Automatic PID Control

Adaptive fuzzy control adalah strategi kontrol yang menggabungkan logika fuzzy dengan kemampuan adaptatif untuk menyesuaikan parameter kontrol secara otomatis mengikuti perubahan proses. Teknik ini berguna di proses non-linier seperti pirolisis, di mana

karakteristik reaktor berubah seiring suhu dan komposisi umpan berubah. Adaptive fuzzy controllers sering menunjukkan kemampuan lebih tinggi dalam mengatasi gangguan dan mencapai stabilitas proses dibanding kontrol statis biasa, terutama ketika dinamika suhu sulit dimodelkan secara matematis.

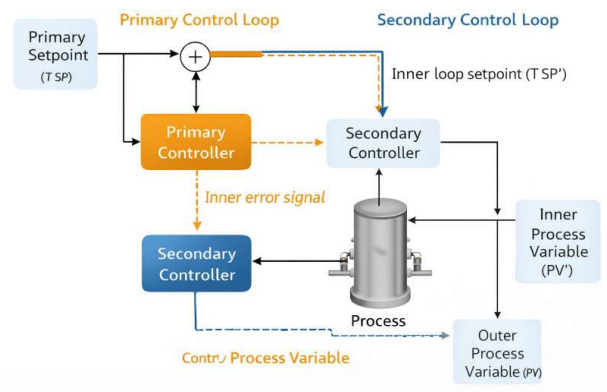
Fuzzy logic control (FLC) menggunakan aturan linguistik dan keanggotaan fuzzy untuk menetapkan aksi kontrol berdasarkan kondisi sistem yang tidak pasti atau menyerempet batas non-linier. FLC dapat mengatasi keterbatasan PID konvensional ketika model matematis proses sulit diperoleh, dan meningkatkan respons terhadap gangguan. Fuzzy control populer dalam pengendalian suhu kompleks seperti sistem exchanger atau reaktor termal, di mana hubungan non-linier antar parameter lebih dominan.

Pengaturan suhu (T) dan tekanan (P) biasanya dilakukan secara bersamaan dalam proses industri karena kedua variabel ini saling berinteraksi (**Gambar 12**). Control system modern di pirolisis atau unit reaktor memerlukan pendekatan multivariable untuk menjaga distribusi produk dan mencegah kondisi operasi yang tidak aman. Kontrol multivariable sering memerlukan strategi di luar PID tunggal seperti pengaturan suara valve pressure dan heat input secara terkoordinasi untuk meminimalkan deviasi suhu sambil menjaga batas tekanan yang aman.



Gambar 12 Pengaturan suhu (T) dan tekanan (P)

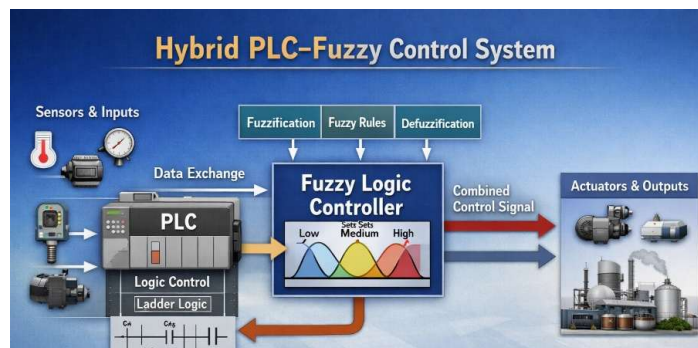
Cascade control adalah struktur di mana dua loop kontrol PID bertindak berurutan: satu loop primer mengendalikan output utama (mis. suhu reaktor), sedangkan loop sekunder mengendalikan variabel pendukung (mis. laju alir media panas). Pendekatan ini mempercepat respon sistem dan mengurangi sensitivitas terhadap gangguan luar. Dalam pirolisis, cascade PID (**Gambar 13**). Sering digunakan untuk meningkatkan kestabilan suhu dengan mengatur supply heating media secara lebih responsif dibanding PID tunggal.



Gambar 13 Cascade control

Self-tuning PID adalah metode di mana parameter PID disesuaikan secara otomatis oleh algoritma kontrol yang memantau kinerja loop dan melakukan update parameter untuk memaksimalkan kinerja sistem. Self-tuning memungkinkan kontrol suhu tetap optimal meskipun karakteristik proses berubah secara dinamis, misalnya karena variasi umpan atau perubahan thermal inertia.

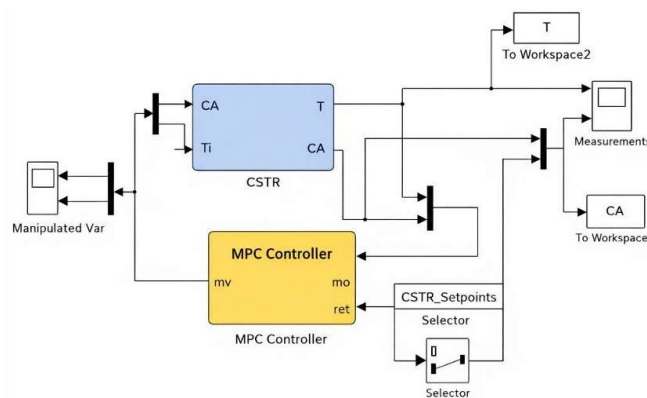
Hybrid PLC–Fuzzy menggabungkan logika fuzzy dengan infrastruktur PLC industri untuk memanfaatkan keunggulan fuzzy dalam menangani nonlinieritas serta kemudahan integrasi PLC dalam operasi industri (**Gambar 14**). Sistem ini umumnya memiliki PLC sebagai eksekutor utama dengan fuzzy rules overlay untuk penyesuaian parameter PID. Hybrid controller ini mampu memberikan respon yang lebih halus dan adaptif terhadap perubahan dinamika proses dibanding PID murni.



Gambar 14 Hybrid PLC–Fuzzy

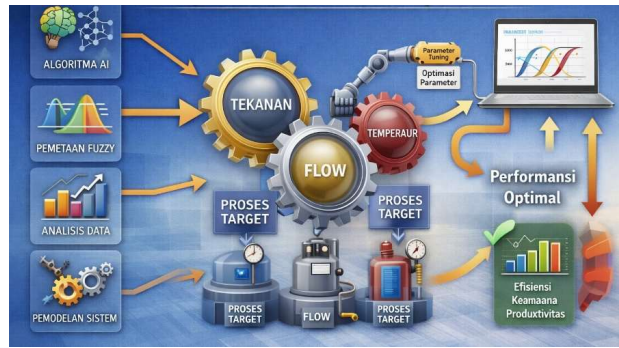
Kontrol suhu operasional mencakup semua teknik kontrol yang bertujuan menjaga temperature plant agar tetap dalam batas desain sambil mengoptimalkan konsumsi energi. Teknik ini penting dalam pirolisis karena produk sangat dipengaruhi oleh profil suhu. PID, fuzzy-PID, dan teknik lanjutan digunakan untuk mengurangi overshoot, fluktuasi, dan konsumsi energi. Mengelola suhu operasional secara akurat meningkatkan efisiensi energi dan kinerja keseluruhan proses.

Model Predictive Control (MPC) adalah teknik kontrol lanjutan yang memanfaatkan model dinamis proses untuk memprediksi perilaku masa depan pengendalian variabel seperti suhu dan tekanan, kemudian menghitung sinyal kontrol optimal sambil mempertimbangkan batasan proses. MPC unggul dalam menangani interaksi multivariable dan constraint proses (**Gambar 15**). Pendekatan MPC memungkinkan penyesuaian kontrol yang lebih efisien dibanding PID untuk sistem kompleks seperti pirolisis atau kolom distilasi dengan banyak variabel yang saling memengaruhi.



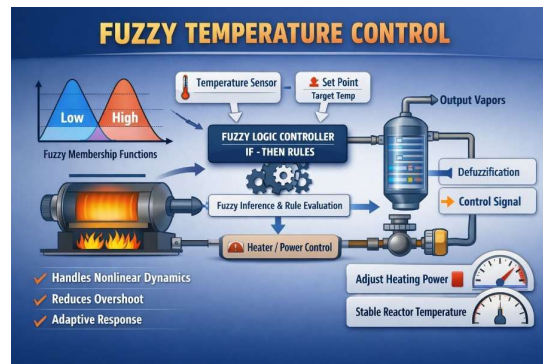
Gambar 15 Model Predictive Control (MPC)

Optimasi parameter operasi adalah teknik untuk mencari nilai set-point terbaik bagi variabel proses (mis. suhu set point, waktu tinggal) secara numerik atau menggunakan algoritma optimisasi untuk memaksimalkan efisiensi energi atau output produk. Teknik ini sering dipadukan dengan MPC atau algoritma cerdas lain (**Gambar 16**). Optimasi ini penting agar loop kontrol tidak hanya stabil tetapi juga menghasilkan kondisi operasi yang paling efisien secara energi.



Gambar 16 Optimasi parameter operasi

Fuzzy temperature control adalah strategi fuzzy logic yang khusus dirancang untuk pengendalian suhu, memanfaatkan aturan fuzzy untuk menghadapi nonlinieritas dan ketidakpastian termal dalam proses industri (**Gambar 17**). Fuzzy pendeteksi perubahan suhu dan melakukan koreksi lebih adaptif daripada PID konvensional. Teknik ini cocok pada aplikasi seperti heat exchanger atau reaktor pirolisis dengan karakteristik termal yang berubah-ubah.



Gambar 17 Fuzzy temperature control

Robust PID control mengacu pada PID yang dirancang untuk bertahan terhadap ketidakpastian proses atau gangguan tinggi, sering menggunakan teknik tuning khusus atau desain loop yang mempertimbangkan worst-case scenario kendali. Pendekatan ini meningkatkan performa PID pada sistem yang tidak stabil atau variabel, terutama dalam aplikasi suhu dan tekanan di industri kimia. PID tekanan adalah aplikasi PID untuk mengendalikan variabel tekanan proses melalui aktuator seperti katup kontrol atau blower, sering diintegrasikan dengan kontrol suhu untuk menjaga kondisi operasi aman dan efisien. Di proses pirolisis, pengendalian tekanan esensial untuk menstabilkan kondisi reaktor dan mencegah reaksi sekunder yang tidak diinginkan.

Tabel 1 menunjukkan ringkasan berbagai penelitian terkait strategi pengendalian pada proses pirolisis dan sistem termal sejenis. Tabel ini menampilkan bahwa suhu reaktor merupakan variabel pengendalian utama karena berpengaruh langsung terhadap stabilitas proses, efisiensi energi, dan distribusi produk. Metode kontrol seperti suhu PID konvensional

masih banyak digunakan karena sederhana dan efektif menjaga suhu mendekati set point, namun pengembangannya seperti *cascade control*, *self-tuning PID*, dan *Robust PID* diperlukan untuk meningkatkan kinerja pada kondisi operasi yang berubah dan adanya gangguan proses. Selain itu, metode kontrol cerdas dan lanjutan seperti Fuzzy-PID, kontrol logika fuzzy, kontrol fuzzy adaptif, PLC–Fuzzy hybrid, serta MPC menunjukkan kinerja yang lebih adaptif pada sistem pirolisis yang nonlinier. Pendekatan ini mampu menekan suhu, mengurangi overshoot, serta meningkatkan efisiensi dan efisiensi operasi. Dengan demikian, **Tabel 1** menegaskan bahwa pemilihan dan pengembangan strategi pengendalian suhu yang tepat menjadi kunci utama dalam mencapai pengoperasian proses pirolisis yang stabil dan optimal.

Tabel 1 Strategi Pengendalian pada Proses Pirolisis

No	Author	Unit / Sistem yang Dikaji	Metode Kontrol	Fokus Pengendalian	Temuan Utama Penelitian
1	Muharto et al. (2024) – IJECE	Reaktor pirolisis auger	PID temperatur	Suhu reaktor	Kontrol PID menjaga suhu mendekati set point dan meningkatkan stabilitas proses.
2	Bu et al. (2021) – JAAP	Pirolisis biomassa microwave	Fuzzy-PID	Suhu bed	Fuzzy-PID memberikan respon lebih cepat dan overshoot lebih kecil.
3	Invotek (2025)	Reaktor pirolisis plastik LDPE	Automatic PID control	Suhu reaktor	Fluktuasi suhu berkurang dan efisiensi energi meningkat.
4	Zheng et al. (2025)	Reaktor pirolisis biomassa	Adaptive fuzzy control	Suhu & stabilitas	Kontrol adaptif menyesuaikan perubahan bahan baku.
5	Kozlov et al. (2022)	Pirolisis MSW	Fuzzy logic control	Suhu reaktor	Deviasi suhu berkurang meskipun terdapat gangguan proses.
6	Greco et al. (2021)	Pirolisis limbah kayu	Pengaturan T & P	Suhu & tekanan	T dan P memengaruhi kualitas produk
7	Liu et al. (2021)	Pirolisis biomassa	Self-tuning PID	Suhu reaktor	Robust terhadap gangguan dan perubahan kondisi operasi.
8	Rysbek et al. (2025)	Sistem pirolisis terintegrasi	Hybrid PLC–Fuzzy	Suhu & tekanan	Keandalan operasi meningkat pada sistem berkelanjutan.
9	JAAP (various)	Beragam reaktor pirolisis	Kontrol suhu operasional	Suhu proses	Stabilitas suhu menentukan distribusi produk.
10	Velilla-Díaz et al. (2024)	Sistem energi termal	PID, MPC	Efisiensi energi	Kontrol lanjutan meningkatkan efisiensi energi.
11	Talwar et al. (2025)	Reaktor pirolisis biomassa	Optimasi parameter operasi	Suhu & heating rate	Suhu optimal meningkatkan yield bio-oil.
12	Kozlov et al. (2022)	MSW pyrolysis	Fuzzy T control	Suhu reaktor	Stabil pada sistem nonlinier

SIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa temperatur dan tekanan merupakan parameter operasi paling dominan dalam menentukan stabilitas proses,

distribusi produk, efisiensi energi, dan keselamatan pada proses pirolisis. Variasi temperatur terbukti sangat memengaruhi yield bio-oil, gas, dan char, sementara tekanan berperan dalam mengendalikan reaksi sekunder serta karakteristik produk yang dihasilkan. Hasil kajian menunjukkan bahwa kontrol PID dan modifikasinya, seperti cascade PID, masih menjadi metode yang paling realistis dan andal untuk aplikasi industri karena kesederhanaan, kestabilan, dan kemudahan integrasinya, meskipun memiliki keterbatasan dalam menangani nonlinieritas proses. Oleh karena itu, direkomendasikan penggunaan PID atau cascade PID sebagai strategi kontrol utama pada proses pirolisis industri, dengan potensi pengembangan menuju metode kontrol lanjutan seperti model-based control seiring meningkatnya kompleksitas sistem dan tuntutan efisiensi energi di masa depan

DAFTAR PUSTAKA

- Arianto, D. Y., Basuki, Wati, D. A. R., & Rosadi, M. M. (2024). Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Pembakaran molase terhadap volume dan kadar bioetanol yang dihasilkan dengan proses pirolisis. *Jurnal Ilmiah Nusantara*, 1(6).
- Asari, A., & Alharis dan Elita R, D. N. (2015). Uji Kinerja Reaktor Gasifikasi Tandan Kosong Sawit (TKS) Tipe Updraft Skala Kecil Gasification Reactor Performance Test Palm Empty Fruit Bunch (Type Updrafts Small Scale. *Prosiding Seminar Nasional Swasembada Pangan, April*.
- Asari, A., N, A. D., & R, E. (2015). Uji kinerja reaktor gasifikasi tandan kosong sawit (TKS) tipe updraft skala kecil. *Prosiding Seminar Nasional Swasembada Pangan, April*.
- Balikan, C. M., Tooy, D., & Wenur, F. (2021). KAJIAN PEMBUATAN ASAP CAIR TEMPURUNG KELAPA DENGAN PROSES PIROLISIS DAN DESTILASI DI SULAWESI UTARA. *Jurnal Teknologi Pertanian (Agricultural Technology Journal*, 12(2). <https://doi.org/10.35791/jteta.v12i2.52683>
- Casnan, C. (2019). Kinetika Reaksi Proses Pirolisis Pada Sekam Padi. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 15(3). <https://doi.org/10.12962/j24604682.v15i3.4602>
- Dhiya Suci Auliyah, Dina Aulia Rahmani, Mochammad Iqbal Ramadhan, Agustina Dyah Setyowati, Ade Irawan, & Sulanjari, S. (2024). Strategi Inovatif Dalam Meningkatkan Kinerja Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Bakar Melalui Metode Pirolisis. *ULIL ALBAB : Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 3(2). <https://doi.org/10.56799/jim.v3i2.2812>
- Hakiki, R. (2022). INVENTARISASI FAKTOR KEBERLANJUTAN REDUKSI SAMPAH PLASTIK MELALUI PROSES PIROLISIS. *JURNAL PENELITIAN DAN KARYA ILMIAH LEMBAGA PENELITIAN UNIVERSITAS TRISAKTI*, 7(1). <https://doi.org/10.25105/pdk.v7i1.10768>
- Hidayat, A. T., & Kusmiyati, K. (2025). Pemanfaatan Sampah Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) dan PP (Polypropylene) Menggunakan Proses Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(4). <https://doi.org/10.38035/rrj.v7i4.1569>
- Iskandar, T., Abrina Anggraini, S. P., & Melinda, M. (2021). Pembuatan Bahan Bakar Diesel dari Limbah Plastik HDPE dengan Proses Pirolisis. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 6(1). <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i1.2251>
- Khairinnisa, K., Fauzi, Y., & Nugraheni, E. (2025). Analisis Spasio-Temporal Kondisi Iklim dan Jumlah Kejadian Demam Berdarah Dengue (DBD) Tahun 2012-2021 di Bengkulu. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(2). <https://doi.org/10.14710/jkli.67945>
- Mau, F. (2018). Hubungan Antara Curah Hujan dan Temperatur dengan Malaria di Kabupaten Sumba Barat Daya Provinsi Nusa Tenggara Timur - Indonesia. *Buletin Penelitian Kesehatan*, 46(2). <https://doi.org/10.22435/bpk.v46i2.309>
- Mudjiono, U., Rakhmad Handoko, C., & Singgih Setiyoko, A. (2025). KONVERSI SAMPAH PERKOTAAN MENJADI ENERGI LISTRIK: TINJAUAN TEKNOLOGI, PELUANG,

- DAN TANTANGAN DI INDONESIA. *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-11 ISAS Publishing Series: Engineering and Science*, 11.
- Novia, T. (2021). Pengolahan Limbah Sampah Plastik Polythylene Terephthalate (PET) Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Proses Pirolisis. *GRAVITASI: Jurnal Pendidikan Fisika Dan Sains*, 4(01). <https://doi.org/10.33059/gravitasi.jpfs.v4i01.3481>
- Nugroho, A. S. (2019). PEMANFAATAN LIMBAH TEMPURUNG KELAPA SAWIT SEBAGAI CAMPURAN BAHAN BAKAR DIESEL. *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, 1(1). <https://doi.org/10.36499/psnst.v1i1.2806>
- Sa'diyah, K., Suharti, P. H., Hendrawati, N., Pratamasari, F. A., & Rahayu, O. M. (2021). Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu sebagai Karbon Aktif melalui Proses Pirolisis dan Aktivasi Kimia. *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, 4(2). <https://doi.org/10.25273/cheesa.v4i2.8589.91-99>
- Simanjuntak, J. P. (2023). PERENCANAAN KONDENSOR TIPE KOIL VERTIKAL UNTUK KONDENSASI UAP PIROLISA BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA. *Jurnal Insinyur Profesional*, 2(3). <https://doi.org/10.24114/jip.v2i3.38125>
- Sugiarto, T., Sartohadi, J., Praharto, Y., Hidayati, N., & Pulungan, N. A. H. J. (2024). PENERAPAN TATA LETAK TANAMAN DAN REAKTOR PIROLISIS BIOMASSAKONVERSI MENJADI BIOCHAR BERBAHAN BAKU SAMPAH PERKOTAAN. *Jurnal BUDIMAS*, 6(3).
- Supanto, S., Fardiansyah, A. A., Al-Kindi, H., & Yuliaji, D. (2022). ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK. *ALMIKANIK*, 3(2). <https://doi.org/10.32832/almikanika.v3i2.5822>
- Sy, S. (2020). Utilization of activated sludge (LLA) as an adsorbent to minimize contaminants in water and wastewater: A Review. *Jurnal Litbang Industri*, 10.
- Tetra, N.O ; Aziz, H; Emriadi, Ibrahim, S. A. (2018). SUPERKAPASITOR BERBAHAN DASAR KARBON AKTIF DAN LARUTAN IONIK SEBAGAI ELEKTROLIT. *Jurnal Zarah*, 6(1).
- Tetra, O. N. (2018). SUPERKAPASITOR BERBAHAN DASAR KARBON AKTIF DAN LARUTAN IONIK SEBAGAI ELEKTROLIT. *Jurnal Zarah*, 6(1). <https://doi.org/10.31629/zarah.v6i1.293>
- Zhai, W., Dong, L., & Hu, Y. (2024). Self-tuning control of steam sterilizer temperature based on fuzzy PID and IPSO algorithm. *Journal of Measurements in Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.21595/jme.2024.24134>