

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PROSES UNTUK PRODUKSI MINYAK DIESEL MELALUI PIROLISIS OLI BEKAS

Riny Yolandha Parapat¹, Grace Rafael Haloho², Nola Septiani Pramita³

Program Studi Teknik Kimia Institut Teknologi Nasional Bandung ^{1,2,3}

Email: grace.rafael@mhs.itenas.ac.id

Informasi	Abstract
Volume : 3	<i>Waste lubricating oil is classified as hazardous and toxic waste (B3) with the potential to cause environmental pollution; however, it still contains hydrocarbon fractions with significant energy value that can be utilized as liquid fuel through a pyrolysis process. In the preliminary design of a diesel oil production system from waste oil pyrolysis, process control becomes a critical aspect due to the high operating temperatures and the involvement of gas formation and significant phase changes. This paper presents the design of a process control system for converting waste lubricating oil into diesel oil through pyrolysis. The main variables analyzed include temperature, pressure, feed flow rate, and reaction residence time, as well as supporting variables in the product separation units. The results indicate that the implementation of an integrated process control system is capable of maintaining operational stability, enhancing process safety, and preserving the quality and continuity of diesel oil production. Therefore, the proper design of a process control system at the preliminary stage plays an important role in supporting safe, stable, and efficient plant operation.</i>
Nomor : 1	
Bulan : Januari	
Tahun : 2026	
E-ISSN : 3062-9624	

Keyword: Used lubricating oil, pyrolysis, diesel oil, process control, operational safety

Abstrak

Oli bekas merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang berpotensi mencemari lingkungan, namun masih mengandung fraksi hidrokarbon bernilai energi yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar cair melalui proses pirolisis. Pada produksi diesel oil dari hasil pirolisis oli bekas, pengendalian proses menjadi aspek yang sangat penting karena proses berlangsung pada kondisi suhu tinggi dan melibatkan pembentukan gas serta perubahan fase yang signifikan. Paper ini menyajikan mengenai perancangan sistem pengendalian dalam proses pirolisis minyak oli bekas menjadi minyak diesel. Variabel utama yang dianalisis meliputi temperatur, tekanan, laju alir umpan, dan waktu tinggal reaksi, serta variabel pendukung pada unit pemisahan produk. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan sistem pengendalian proses yang terintegrasi mampu menjaga kestabilan operasi, meningkatkan keselamatan proses, serta mempertahankan kualitas dan kontinuitas produksi diesel oil. Dengan demikian, perancangan sistem pengendalian proses yang tepat pada tahap pra-rancangan berperan penting dalam mendukung operasi pabrik yang aman, stabil, dan efisien.

Kata Kunci: Oli bekas, pirolisis, diesel oil, pengendalian proses, keselamatan operasi

A. PENDAHULUAN

Oli bekas merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang dihasilkan dari aktivitas industri dan sektor transportasi. Kandungan logam berat serta senyawa hidrokarbon

aromatik di dalam oli bekas berpotensi mencemari tanah dan air apabila tidak dikelola dengan baik, sehingga dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Seiring dengan meningkatnya jumlah kendaraan dan aktivitas industri, volume limbah oli bekas yang dihasilkan juga terus bertambah dan menjadi permasalahan lingkungan yang signifikan.

Di sisi lain, oli bekas masih mengandung fraksi hidrokarbon bernilai tinggi yang berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar cair. Pemanfaatan oli bekas sebagai sumber energi alternatif tidak hanya mampu mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga berkontribusi dalam upaya diversifikasi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Salah satu teknologi yang efektif untuk mengonversi oli bekas menjadi bahan bakar cair adalah proses pirolisis katalitik. Penggunaan katalis berbasis logam transisi seperti Fe-Ni dengan penyangga TiO_2 terbukti mampu meningkatkan selektivitas pembentukan diesel oil serta menekan pembentukan residu berat. Proses ini memungkinkan perolehan produk bahan bakar dengan karakteristik yang mendekati diesel konvensional.

Namun demikian, proses pirolisis katalitik berlangsung pada kondisi operasi suhu tinggi dan sistem tertutup, sehingga sangat sensitif terhadap fluktuasi variabel proses seperti temperatur, tekanan, dan laju alir umpan. Ketidakterkendalian variabel-variabel tersebut dapat menyebabkan penurunan kualitas produk, penurunan efisiensi proses, serta meningkatkan risiko keselamatan operasional. Oleh karena itu, penerapan sistem pengendalian proses yang andal menjadi aspek krusial dalam proses pirolisis oli bekas untuk menjamin kestabilan operasi, keamanan proses, dan konsistensi mutu produk diesel yang dihasilkan [1].

TINJAUAN PUSTAKA

Pirolisis Oli Bekas

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal senyawa organik pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen. Pada pirolisis oli bekas, molekul hidrokarbon berat akan terurai menjadi fraksi yang lebih ringan berupa gas, cair (diesel oil), dan padatan (*char*). Parameter utama yang memengaruhi hasil pirolisis antara lain temperatur, waktu tinggal, dan jenis katalis [1]. Proses pirolisis dirancang sebagai proses utama konversi oli bekas menjadi produk bahan bakar cair. Oli bekas dialirkkan ke dalam reaktor pirolisis dan dipanaskan hingga mencapai kondisi operasi tertentu sehingga terjadi pemutusan rantai hidrokarbon. Produk hasil pirolisis selanjutnya dipisahkan berdasarkan fasenya, di mana fraksi uap hidrokarbon akan

didinginkan pada unit kondensasi untuk menghasilkan fraksi cair berupa diesel oil, sedangkan gas non-kondensabel dan residu padatan ditangani secara terpisah[1].

Kondisi operasi pada reaktor pirolisis sangat berpengaruh terhadap distribusi produk yang dihasilkan. Temperatur yang terlalu rendah dapat menyebabkan konversi oli bekas tidak optimal, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan pembentukan gas dan residu berat. Oleh karena itu, penentuan dan pengendalian kondisi operasi reaktor menjadi aspek penting untuk menjamin efisiensi proses dan kualitas produk diesel yang dihasilkan [2].

Peran Katalis Dalam Pirolisis

Katalis berperan penting dalam proses pirolisis untuk meningkatkan laju reaksi perengkahan (*cracking*) hidrokarbon berat menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih ringan dan bernilai guna tinggi, seperti fraksi diesel. Keberadaan katalis memungkinkan pemutusan ikatan karbon-karbon berlangsung lebih efektif sehingga distribusi produk dapat diarahkan ke fraksi cair yang lebih diinginkan. Selain itu, penggunaan katalis juga berkontribusi dalam menurunkan pembentukan residu berat serta meningkatkan efisiensi konversi hidrokarbon dibandingkan proses pirolisis non-katalitik [2].

Secara umum, katalis pirolisis terdiri dari komponen logam aktif dan material penyangga (support). Logam aktif berfungsi sebagai situs reaksi yang memfasilitasi terjadinya perengkahan rantai hidrokarbon, sedangkan material penyangga berperan dalam menyediakan luas permukaan yang tinggi serta meningkatkan stabilitas termal dan mekanik katalis selama proses berlangsung. Kombinasi antara logam aktif dan support yang sesuai dapat meningkatkan yield minyak cair serta memperbaiki kualitas produk pirolisis [3].

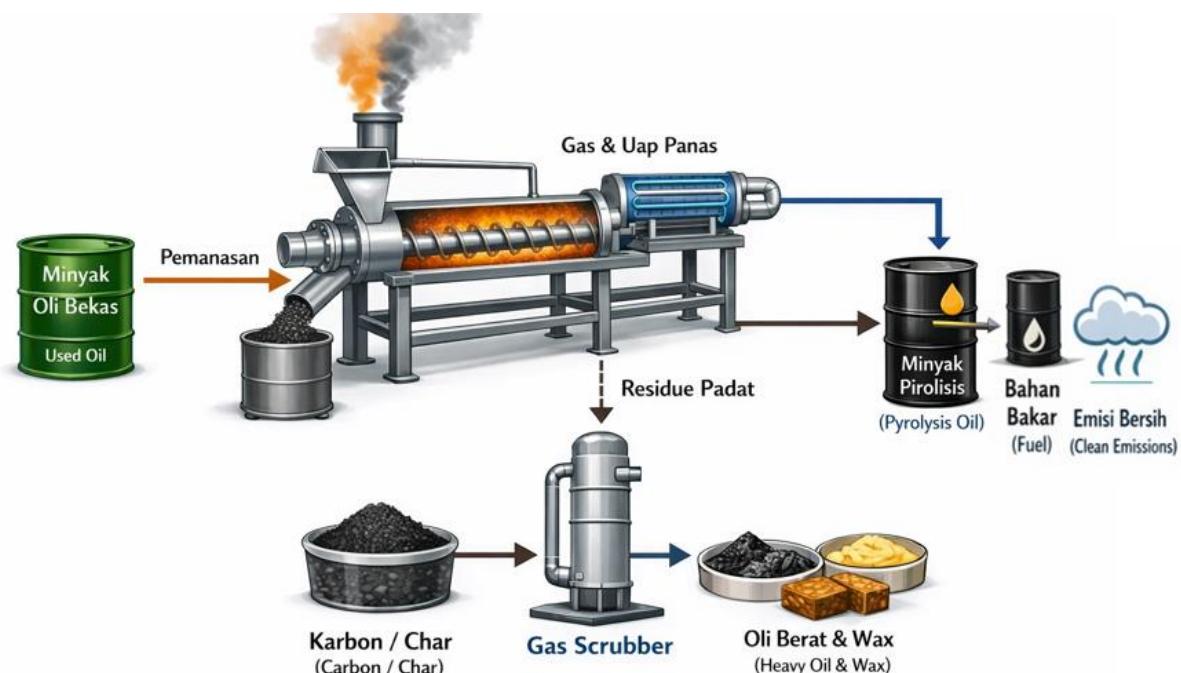
Salah satu contoh katalis yang banyak dikaji adalah katalis berbasis logam transisi, seperti katalis Fe–Ni yang didukung oleh TiO_2 . Katalis jenis ini dilaporkan mampu meningkatkan hasil minyak cair dan kualitas fraksi bahan bakar melalui sinergi antara logam aktif dan permukaan support. Namun demikian, prinsip kerja katalis tersebut secara umum serupa dengan katalis pirolisis lainnya, yaitu mengarahkan jalur reaksi menuju pembentukan produk cair yang lebih stabil dan bernilai ekonomi tinggi [4].

Kinerja dan umur katalis sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi proses, terutama temperatur dan waktu kontak antara katalis dan umpan. Kondisi operasi yang tidak stabil dapat menyebabkan penurunan aktivitas katalis akibat sintering, fouling, atau pembentukan kokas pada permukaan katalis. Oleh karena itu, pengendalian kondisi operasi yang baik

menjadi faktor penting untuk menjaga performa katalis serta konsistensi kualitas produk yang dihasilkan dalam proses pirolisis [5].

Reaksi Pirolisis

Selama proses pirolisis oli bekas, pembentukan gas non-kondensabel akibat perengkahan termal hidrokarbon pada suhu tinggi dapat menyebabkan akumulasi gas di dalam reaktor dan jalur keluaran, sehingga berpotensi meningkatkan tekanan sistem. Kondisi ini dapat diperparah oleh tahanan alir pada pipa dan unit pemisahan, yang apabila tidak dikendalikan dapat menimbulkan risiko keselamatan. Mekanisme reaksi pirolisis serta keterkaitannya dengan peningkatan tekanan sistem ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



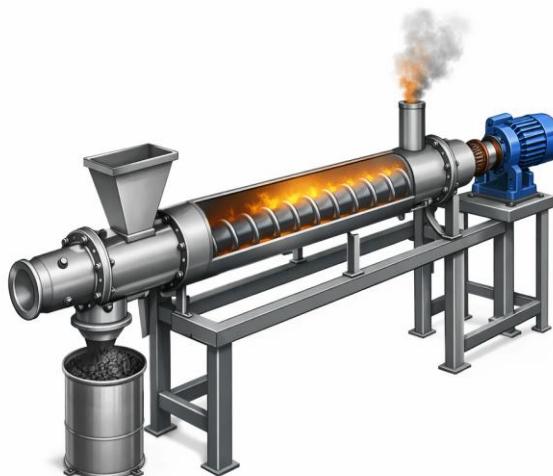
Gambar 2.1 Mekanisme Reaksi Pirolisis

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses pirolisis oli bekas melibatkan mekanisme fisik dan kimia yang kompleks serta saling berkaitan antar unit operasi. Setiap tahapan proses, mulai dari konversi oli bekas hingga pembentukan fraksi diesel oil, memiliki karakteristik operasi yang berpotensi menimbulkan deviasi apabila tidak dianalisis secara menyeluruh. Keterkaitan mekanisme reaksi, aliran produk, dan potensi deviasi proses tersebut secara skematis ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Oleh karena itu, pemahaman terhadap mekanisme proses dan karakteristik peralatan menjadi dasar penting dalam merancang sistem operasi yang aman, stabil, dan efisien serta menjadi acuan dalam pengembangan desain pabrik pada tahap perancangan lanjutan.

Proses Pirolisis

Pada proses pirolisis tanpa pengendalian proses, reaktor auger bekerja secara mekanis berdasarkan suplai panas dan pergerakan ulir tanpa adanya pengaturan otomatis terhadap kondisi operasi di dalam reaktor. Oli bekas dimasukkan melalui hopper umpan dan didorong ke dalam tabung reaktor oleh putaran auger yang digerakkan motor, di mana kecepatan pergerakan material sepenuhnya ditentukan oleh kecepatan putar motor dan karakteristik fisik bahan[7].

Pemanasan reaktor dilakukan melalui sistem pemanas eksternal tanpa pengaturan temperatur yang terkontrol, sehingga panas yang diberikan dapat berfluktuasi dan menyebabkan distribusi temperatur yang tidak seragam sepanjang zona reaksi. Ketidakteraturan distribusi temperatur ini berpotensi menimbulkan reaksi pirolisis yang tidak merata, meningkatkan pembentukan residu padat, serta menurunkan kualitas produk cair yang dihasilkan. Kondisi operasi reaktor tanpa sistem pengendalian tersebut secara skematis ditunjukkan pada **Gambar 2.2**, yang menggambarkan aliran material, mekanisme pemanasan, serta potensi ketidakstabilan proses selama reaksi pirolisis berlangsung [8].



Gambar 2.2 Reaksi Pirolisis Tanpa Pengendalian

Selama proses pirolisis berlangsung, oli bekas mengalami perengkahan termal yang menghasilkan campuran uap hidrokarbon dan residu padat. Pada kondisi tanpa pengendalian tekanan, gas hasil pirolisis keluar mengikuti perbedaan tekanan alami antara reaktor dan saluran keluaran, sehingga apabila laju pembentukan gas lebih besar dibandingkan laju pelepasannya, tekanan di dalam reaktor dapat meningkat secara bertahap. Kondisi ini dapat

diperparah oleh penyumbatan parsial akibat residu padat di bagian outlet, yang meningkatkan tahanan alir gas, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.2** [3].

Pada sisi keluaran padatan, residu pirolisis dikeluarkan melalui ujung reaktor seiring dengan pergerakan auger. Tanpa pengendalian laju alir atau pemantauan kondisi residu, akumulasi padatan di dalam reaktor berpotensi terjadi. Penumpukan ini tidak hanya meningkatkan beban mekanis pada auger dan motor penggerak, tetapi juga dapat mengganggu aliran material serta memperbesar risiko kenaikan tekanan internal, sebagaimana tergambar pada skema operasi reaktor tanpa pengendalian pada **Gambar 2.2**.

Pengendalian proses diperlukan pada proses pirolisis karena proses ini berlangsung pada kondisi temperatur tinggi dan melibatkan reaksi termal yang sangat sensitif terhadap perubahan variabel operasi. Penyimpangan kecil pada temperatur, tekanan, atau laju alir umpan dapat menyebabkan ketidakstabilan reaksi, perubahan distribusi produk, serta penurunan kualitas hasil pirolisis. Selain itu, karakteristik oli bekas sebagai bahan baku yang tidak homogen dan cenderung bervariasi dapat menimbulkan gangguan selama operasi berlangsung. Proses pirolisis juga menghasilkan gas dalam jumlah signifikan, sehingga tanpa pengendalian tekanan yang baik berpotensi menimbulkan kondisi tidak aman. Oleh karena itu, sistem pengendalian proses diperlukan untuk menjaga kondisi operasi tetap stabil, aman, dan terkendali, serta memastikan kualitas dan kontinuitas produk yang dihasilkan.

Konsep Dasar Pengendalian Proses

Pengendalian proses (*process control*) merupakan upaya untuk menjaga variabel proses agar tetap berada pada nilai yang diinginkan (*set point*) meskipun terdapat gangguan (*disturbance*) yang berasal dari lingkungan maupun perubahan kondisi operasi. Dalam industri proses kimia, pengendalian proses berperan penting untuk menjamin keselamatan operasi, menjaga kualitas produk, meningkatkan efisiensi energi, serta memastikan stabilitas proses secara keseluruhan [4].

Sistem pengendalian proses umumnya terdiri atas beberapa elemen utama, yaitu proses (*plant*), sensor atau alat ukur, pengendali (*controller*), aktuator, serta sistem umpan balik (*feedback*). Pada sistem *feedback control*, keluaran proses diukur oleh sensor dan dibandingkan dengan nilai *set point* untuk menghasilkan sinyal kesalahan (*error*). Sinyal ini kemudian diproses oleh pengendali untuk menentukan aksi kontrol yang sesuai melalui aktuator guna mengoreksi penyimpangan yang terjadi [4].

Dalam pengendalian proses, variabel diklasifikasikan menjadi *controlled variable* (CV), yaitu variabel yang nilainya ingin dijaga, serta *manipulated variable* (MV), yaitu variabel yang dapat diubah oleh pengendali untuk memengaruhi CV. Selain itu, terdapat *disturbance variable* (DV) yang dapat memengaruhi proses tetapi tidak dapat dikendalikan secara langsung. Identifikasi hubungan antara CV, MV, dan DV merupakan langkah awal yang penting dalam perancangan sistem kontrol yang efektif.

Dinamika proses juga memegang peranan penting dalam desain sistem pengendalian. Proses industri kimia umumnya bersifat dinamis, nonlinier, dan memiliki *time delay*, sehingga respons sistem terhadap perubahan masukan tidak terjadi secara instan. Karakteristik dinamika ini menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan jenis pengendali serta proses penalaan (*tuning*) parameter kontrol [5].

Berdasarkan tujuan pengendaliannya, kinerja sistem kontrol dapat dianalisis melalui parameter respons waktu seperti *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mencapai dan mempertahankan kondisi operasi yang diinginkan, serta menjadi dasar dalam pemilihan strategi pengendalian, termasuk penggunaan pengendali PID yang banyak diterapkan di industri proses.

Pengendalian Proses pada Sistem Pirolisis Katalitik

Sistem pirolisis katalitik merupakan proses yang memiliki karakteristik operasi yang menantang dari sisi pengendalian proses [6]. Proses ini berlangsung pada suhu tinggi dan melibatkan reaksi perengkahan hidrokarbon yang bersifat kompleks serta nonlinier. Perubahan kecil pada kondisi operasi, khususnya temperatur dan waktu tinggal, dapat menyebabkan perubahan signifikan pada laju reaksi dan distribusi produk yang dihasilkan.

Salah satu tantangan utama dalam pengendalian proses pirolisis adalah sensitivitas sistem terhadap gangguan (*disturbance*). Gangguan dapat berasal dari variasi sifat umpan, fluktuasi suplai energi pemanas, maupun perubahan kondisi lingkungan. Gangguan tersebut dapat menyebabkan penyimpangan variabel proses dari nilai yang diinginkan, sehingga berdampak pada penurunan kualitas produk, peningkatan pembentukan gas atau residu berat, serta potensi risiko keselamatan operasi .

Selain itu, keberadaan katalis menambah kompleksitas sistem pengendalian. Aktivitas katalis dapat menurun seiring waktu akibat fouling, sintering, atau pembentukan kokas pada permukaan katalis. Penurunan aktivitas katalis ini dapat memengaruhi laju reaksi dan

kestabilan proses, sehingga memerlukan pengendalian kondisi operasi yang konsisten untuk menjaga performa proses secara keseluruhan.

Karakteristik dinamika proses pirolisis yang cenderung memiliki *time delay* dan respons yang lambat terhadap perubahan masukan juga menjadi tantangan tersendiri dalam perancangan sistem pengendalian. Kondisi ini menuntut pemilihan strategi pengendalian yang tepat agar sistem mampu merespons gangguan secara stabil tanpa menimbulkan osilasi atau overshoot yang berlebihan [4].

B. METODE PENELITIAN

Proses pirolisis oli bekas diawali dengan pemanasan umpan hingga mencapai kondisi temperatur tinggi yang memungkinkan terjadinya perengkahan termal senyawa hidrokarbon. Di dalam reaktor, oli bekas terurai menjadi fraksi uap hidrokarbon, gas non-kondensabel, serta residu padat, yang selanjutnya dialirkan menuju unit pemisahan dan kondensasi untuk menghasilkan fraksi diesel oil. Karakteristik proses yang berlangsung pada suhu tinggi dan melibatkan pembentukan gas dalam jumlah signifikan menyebabkan kondisi operasi sangat sensitif terhadap perubahan temperatur, tekanan, dan laju alir, sehingga diperlukan pemahaman menyeluruh terhadap interaksi antar variabel proses untuk menjaga kestabilan operasi.

Pengendalian proses diterapkan dengan mengatur variabel operasi utama seperti temperatur reaktor, tekanan sistem, laju alir umpan, dan waktu tinggal reaksi. Pengaturan ini dilakukan melalui sistem umpan balik yang memanfaatkan instrumen pengukuran, pengendali, dan aktuator untuk merespons perubahan kondisi operasi secara kontinu. Dengan pengendalian yang tepat, fluktuasi kondisi proses dapat diminimalkan, risiko gangguan operasi dapat dikurangi, serta kualitas produk dan keselamatan proses dapat tetap terjaga selama proses pirolisis berlangsung.

Selain itu, sistem pirolisis oli bekas memerlukan strategi pengendalian yang terintegrasi dan berlapis mengingat karakteristik reaksi perengkahan termal yang bersifat non-linier, endotermik, serta sangat dipengaruhi oleh distribusi panas di dalam reaktor. Ketidakseimbangan perpindahan panas dapat menyebabkan terbentuknya zona panas lokal yang berpotensi meningkatkan laju pembentukan gas dan residu padat secara berlebihan. Kondisi tersebut tidak hanya menurunkan fraksi produk cair yang diinginkan, tetapi juga dapat mengganggu kestabilan operasi dan mempercepat penurunan kinerja peralatan. Oleh karena itu, pengendalian temperatur yang presisi dan merata menjadi salah satu aspek paling

penting dalam menjaga kontinuitas proses pirolisis.

Selain temperatur, tekanan sistem merupakan variabel operasi yang sangat menentukan perilaku aliran uap hasil pirolisis di dalam sistem. Tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penumpukan gas non-kondensabel di dalam reaktor maupun saluran keluaran, sehingga menghambat proses pemisahan dan kondensasi. Sebaliknya, tekanan yang terlalu rendah dapat menimbulkan fluktuasi aliran yang berdampak pada ketidakstabilan proses secara keseluruhan. Oleh karena itu, pengendalian tekanan dilakukan secara kontinu melalui pengaturan pelepasan gas dan pengawasan kondisi sistem agar tetap berada pada rentang operasi yang aman dan stabil.

Pengaruh laju alir umpan dan waktu tinggal reaksi juga menjadi perhatian utama dalam proses pirolisis oli bekas. Variasi laju alir umpan secara langsung memengaruhi waktu kontak antara senyawa hidrokarbon dengan sumber panas di dalam reaktor. Laju alir yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan waktu tinggal yang tidak mencukupi sehingga reaksi perengkahan berlangsung tidak optimal, sedangkan waktu tinggal yang terlalu lama dapat memicu reaksi lanjutan yang menghasilkan gas dan residu padat dalam jumlah lebih besar. Oleh sebab itu, pengendalian laju alir umpan dilakukan untuk mencapai keseimbangan antara konversi reaksi dan selektivitas produk cair.

Dalam pelaksanaannya, sistem pengendalian proses pirolisis umumnya menerapkan pengendalian umpan balik yang memanfaatkan data pengukuran dari berbagai instrumen proses. Sensor temperatur, tekanan, dan laju alir dipasang pada titik-titik kritis untuk memantau kondisi operasi secara real-time. Informasi yang diperoleh kemudian digunakan oleh pengendali untuk memberikan respon korektif melalui aktuator, seperti elemen pemanas dan katup pengatur aliran, sehingga penyimpangan dari kondisi operasi yang diinginkan dapat segera dikoreksi.

Lebih lanjut, pengendalian proses yang baik juga berperan dalam meningkatkan efisiensi energi selama pirolisis berlangsung. Dengan menjaga variabel operasi tetap mendekati kondisi optimum, kebutuhan energi pemanasan dapat ditekan dan pemborosan energi dapat diminimalkan. Hal ini menjadi penting mengingat proses pirolisis beroperasi pada temperatur tinggi dan membutuhkan suplai energi yang cukup besar. Efisiensi energi yang meningkat tidak hanya berdampak pada penurunan konsumsi energi, tetapi juga mendukung keberlanjutan proses pengolahan oli bekas.

Dari aspek keselamatan, sistem pengendalian proses pirolisis dilengkapi dengan berbagai mekanisme proteksi untuk mencegah terjadinya kondisi operasi yang berbahaya.

Pemantauan kontinu terhadap temperatur dan tekanan memungkinkan deteksi dini terhadap kondisi abnormal, sehingga tindakan pengamanan dapat segera dilakukan. Integrasi antara pengendalian proses dan sistem keselamatan ini sangat penting untuk memastikan bahwa proses pirolisis oli bekas dapat berlangsung secara stabil, aman, dan andal dalam jangka panjang.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi variabel kritis proses

Variabel kritis didefinisikan sebagai parameter operasi yang memiliki pengaruh signifikan terhadap keselamatan, kualitas produk, dan kontinuitas operasi. Penentuan variabel ini menjadi dasar dalam perancangan sistem pengendalian yang efektif.

Temperatur sebagai variabel utama. Temperatur merupakan variabel paling dominan dalam proses pembuatan katalis maupun pirolisis oli bekas. Pada furnace kalsinasi, temperatur menentukan sifat fisik dan kimia katalis yang dihasilkan. Sementara itu, pada reaktor pirolisis, temperatur berperan langsung dalam menentukan mekanisme reaksi dan distribusi produk yang terbentuk.

Laju alir umpan. Laju alir umpan oli bekas dikategorikan sebagai variabel kritis karena memengaruhi waktu tinggal reaksi di dalam reaktor pirolisis. Laju alir yang tidak terkendali dapat menyebabkan konversi yang tidak optimal dan fluktuasi kualitas produk. Oleh karena itu, pengendalian laju alir diperlukan untuk menjaga kestabilan proses.

Tekanan proses. Tekanan proses, khususnya pada reaktor pirolisis dan sistem gas buang, merupakan variabel kritis dari sisi keselamatan. Selama pirolisis, terbentuk gas non-kondensabel yang dapat meningkatkan tekanan sistem. Pengendalian tekanan diperlukan untuk mencegah terjadinya kondisi overpressure yang berpotensi membahayakan peralatan dan operator.

Variabel pendukung. Selain temperatur, laju alir, dan tekanan, variabel lain seperti level cairan pada tangki penampung produk dan temperatur kondensor juga termasuk variabel kritis pendukung. Variabel-variabel ini berperan dalam menjaga kontinuitas operasi dan efisiensi pemisahan produk, sehingga tetap perlu dikendalikan secara memadai.

Pengendalian proses ini dirancang dengan pendekatan terintegrasi yang berfokus pada peralatan utama serta variabel proses kritis. Sistem pengendalian bertujuan untuk menjaga kondisi operasi tetap mendekati nilai rancangannya meskipun terjadi gangguan akibat perubahan beban operasi maupun variasi kualitas bahan baku. Pada unit pembuatan katalis,

furnace kalsinasi merupakan peralatan yang dikendalikan secara ketat karena sangat mempengaruhi mutu katalis yang dihasilkan. Pengendalian temperatur dilakukan melalui sistem umpan balik yang memanfaatkan pengukuran temperatur secara kontinu dan pengaturan laju panas, sehingga suhu kalsinasi dapat dipertahankan pada kondisi operasi yang diinginkan. Pengendalian ini penting untuk memastikan konsistensi sifat fisik dan kimia katalis.

Pada reaktor pirolisis, sistem pengendalian dilengkapi dengan beberapa loop pengendalian utama, yaitu pengendalian temperatur, tekanan, dan laju alir umpan. Pengendalian temperatur berfungsi menjaga kondisi reaksi pirolisis tetap stabil, sedangkan pengendalian tekanan menjamin keselamatan operasi dan kestabilan pelepasan produk gas. Pengendalian laju alir umpan memastikan beban reaktor tetap konstan sehingga reaksi dapat berlangsung secara kontinu meskipun terjadi fluktuasi karakteristik oli bekas sebagai bahan baku. Pada unit pemisahan, khususnya pada unit kondensasi dan pemisahan produk, pengendalian difokuskan pada temperatur dan laju alir media pendingin. Pengendalian yang baik pada unit ini berperan dalam meningkatkan efisiensi proses kondensasi serta memaksimalkan perolehan fraksi diesel oil sebagai produk utama.

Pengendalian Proses pada Pirolisis Oli Bekas

Pada unit pirolisis, oli bekas dipanaskan di dalam reaktor hingga mencapai suhu operasi tinggi (sekitar 400–500°C) dengan bantuan katalis. Pengendalian temperatur reaktor merupakan aspek paling krusial karena berpengaruh langsung terhadap distribusi produk (gas, cair, dan residu) serta umur katalis. Selain temperatur, laju alir umpan oli bekas merupakan variabel penting yang perlu dikendalikan untuk menjaga waktu tinggal reaksi tetap konstan. Pengendalian laju alir dilakukan menggunakan *flow controller* yang terhubung dengan *control valve* pada jalur umpan, sehingga fluktuasi umpan dapat diminimalkan dan kondisi reaksi tetap stabil. Ketidakterkendalian laju alir dapat menyebabkan variasi waktu tinggal yang berdampak pada ketidakkonsistenan kualitas produk [2].

Variabel lain yang turut dikendalikan adalah tekanan reaktor, terutama untuk menjamin keselamatan operasi. Tekanan reaktor dipantau dan dikendalikan guna mencegah terjadinya *overpressure* akibat pembentukan gas non-kondensabel selama proses pirolisis. Sistem pengendalian tekanan berperan penting dalam menjaga operasi reaktor tetap aman dan stabil.

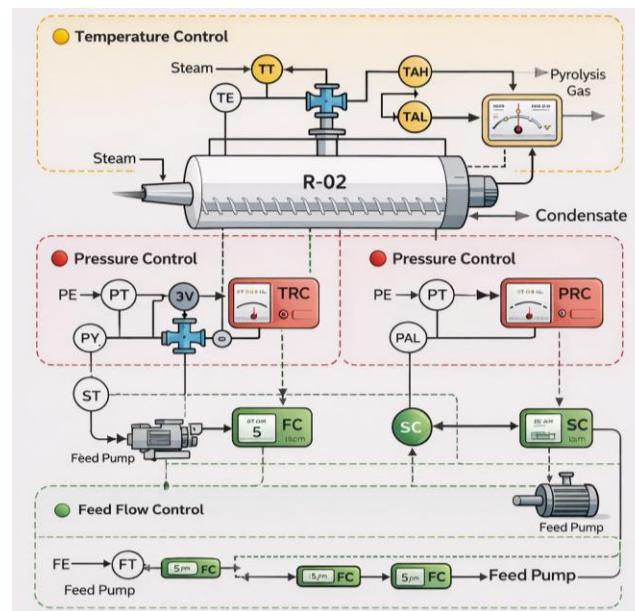
Pengendalian Pada Unit Pemisahan Produk

Produk uap hasil pirolisis selanjutnya dialirkan menuju unit kondensasi untuk dipisahkan menjadi fraksi cair berupa diesel oil dan fraksi gas non-kondensabel. Kinerja unit pemisahan ini sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi kondensor, khususnya temperatur dan laju alir media pendingin, sehingga diperlukan sistem pengendalian yang memadai untuk menjaga efisiensi proses [1].

Temperatur kondensor dikendalikan melalui pengaturan laju alir media pendingin yang masuk ke dalam kondensor. Perubahan temperatur uap masuk akan dipantau oleh sensor, kemudian sinyal pengukuran tersebut digunakan oleh pengendali untuk mengatur bukaan katup pada jalur media pendingin. Dengan demikian, temperatur kondensor dapat dipertahankan pada rentang yang memungkinkan terjadinya kondensasi optimal [4].

Pengendalian yang tidak optimal pada unit ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi kondensasi, yang ditandai dengan meningkatnya fraksi uap yang tidak terkondensasikan dan berujung pada kehilangan produk cair. Selain itu, fluktuasi laju alir produk cair juga dapat mengganggu kestabilan operasi unit pemisahan berikutnya. Oleh karena itu, pengendalian temperatur dan laju alir media pendingin pada unit pemisahan produk memegang peranan penting dalam menjaga kualitas dan kuantitas diesel oil yang dihasilkan [1].

Untuk menjamin kestabilan operasi dan keselamatan pada proses pirolisis oli bekas, diperlukan sistem pengendalian proses yang mampu mengatur variabel-variabel operasi utama secara terintegrasi. Proses pirolisis berlangsung pada kondisi suhu tinggi dan melibatkan pembentukan gas dalam jumlah signifikan, sehingga perubahan kecil pada kondisi operasi dapat berdampak besar terhadap kualitas produk maupun keamanan sistem. Oleh karena itu, pengendalian temperatur, tekanan, dan laju alir umpan menjadi aspek penting dalam perancangan reaktor pirolisis. Skema sistem pengendalian proses yang dirancang untuk reaktor auger pada proses pirolisis oli bekas ditunjukkan pada **Gambar 2.3**, yang menggambarkan keterkaitan antara instrumen pengukuran, pengendali, dan aktuator dalam menjaga kondisi operasi tetap aman dan stabil [9].



Gambar 2.3 Sistem Kontrol untuk Reaksi Pirolisis

Keterangan:

- TE = Temperature Element
- TT = Temperature Transmitter
- TAH = Temperature Alarm High
- TAL = Temperature Alarm Low
- PT = Pressure Transmitter
- PE = Pressure Element
- PRC = Pressure Recorder Controller
- PAL = Pressure Alarm Low
- TRC = Temperature Recorder Controller
- FC = Flow Controller
- FT = Flow Transmitter
- FE = Flow Element
- SC = Speed Controller
- ST = Speed Transmitter
- PY = Pressure Relay
- 3V = Control Valve Tiga Arah
- R-02 = Reaktor Pirolisis
- PC = Pressure Control

Sistem ini mencakup pengendalian temperatur reaktor melalui pengaturan suplai media pemanas, pengendalian tekanan untuk menjaga kondisi operasi tetap aman, serta

pengendalian laju alir umpan agar waktu tinggal di dalam reaktor berada pada rentang yang diinginkan. Setiap *loop* pengendalian bekerja secara terpisah namun saling terhubung, sehingga perubahan pada satu variabel dapat direspon oleh sistem secara keseluruhan. Dengan penerapan sistem pengendalian ini, fluktuasi kondisi operasi dapat diminimalkan, risiko terjadinya overpressure dapat dikurangi, dan proses pirolisis dapat berlangsung lebih stabil serta terkendali. Adapun yang dikontrol yaitu:

a) Temperature Control

Temperatur merupakan variabel paling kritis dalam reaksi pirolisis karena menentukan tingkat pemutusan rantai hidrokarbon. Temperatur di dalam reaktor diukur menggunakan Temperature Element (TE) dan dikirimkan melalui Temperature Transmitter (TT) ke Temperature Recorder Controller (TRC). TRC membandingkan temperatur aktual dengan set point yang telah ditentukan, kemudian mengirimkan sinyal ke Temperature Relay (TY) untuk mengatur bukaan Temperature Control Valve (TCV) pada aliran steam pemanas. Apabila temperatur berada di bawah set point, TCV akan terbuka lebih besar sehingga panas yang masuk meningkat, sedangkan jika temperatur terlalu tinggi, bukaan valve akan dikurangi. Sebagai sistem pengaman, digunakan Temperature Alarm High (TAH) dan Temperature Alarm Low (TAL) untuk mendeteksi kondisi temperatur ekstrem yang dapat menyebabkan kegagalan reaksi atau degradasi produk. Temperature control memastikan energi panas yang cukup tersedia untuk proses dekomposisi termal tanpa menyebabkan overheating atau pembentukan coke berlebih [9].

b) Pressure Control

Tekanan reaktor dikendalikan untuk menjaga kestabilan pelepasan gas hasil pirolisis dan mencegah kondisi overpressure. Tekanan diukur menggunakan Pressure Element (PE) dan Pressure Transmitter (PT), kemudian sinyal dikirim ke Pressure Recorder Controller (PRC). PRC akan mengatur Pressure Control Valve (PCV) melalui Pressure Relay (PY) untuk menyesuaikan laju pelepasan gas dari reaktor. Pressure Alarm High (PAH) dan Pressure Alarm Low (PAL) berfungsi sebagai proteksi apabila tekanan melebihi atau berada di bawah batas operasi yang diizinkan. Pressure control menjaga keseimbangan antara pembentukan gas hasil pirolisis dan laju keluarnya gas, sehingga reaksi berlangsung stabil dan aman [7].

c) Feed Flow Control

Laju alir umpan ke dalam reaktor dikendalikan menggunakan Flow Element (FE) dan Flow Transmitter (FT) yang mengirimkan sinyal ke Flow Controller (FC). FC mengatur kecepatan pompa umpan sehingga jumlah bahan baku yang masuk ke reaktor tetap konstan.

Pengendalian laju umpan ini penting untuk menjaga beban panas reaktor dan mencegah fluktuasi temperatur yang tajam akibat perubahan jumlah umpan. Feed flow control memastikan beban reaksi dan kebutuhan panas tetap seimbang selama proses pirolisis berlangsung kontinu [5].

d) Speed / Residence Time Control

Ciri khas Auger Reactor adalah penggunaan screw untuk memindahkan bahan di dalam reaktor. Kecepatan screw diukur menggunakan Speed Element (SE) dan dikirim ke Speed Transmitter (ST), kemudian dikendalikan oleh Speed Controller (SC). Dengan mengatur kecepatan motor screw, waktu tinggal (residence time) bahan di dalam zona panas dapat dikontrol. Residence time yang tepat memastikan bahan mengalami pirolisis secara optimal; terlalu cepat menyebabkan reaksi tidak sempurna, sedangkan terlalu lambat dapat menyebabkan secondary cracking dan pembentukan *coke* [10].

D. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan sistem pengendalian proses pada reaktor pirolisis, dapat disimpulkan bahwa pengendalian temperatur, tekanan, laju alir umpan, dan waktu tinggal yang terintegrasi merupakan kunci dalam menjaga kestabilan dan keselamatan operasi. Sistem pengendalian temperatur memastikan energi panas yang dibutuhkan untuk reaksi pirolisis terpenuhi secara optimal, sementara pengendalian tekanan berperan dalam mengendalikan pelepasan gas hasil pirolisis dan mencegah kondisi overpressure. Pengendalian laju alir umpan dan kecepatan screw memungkinkan beban reaktor serta waktu tinggal bahan tetap berada pada rentang yang diinginkan meskipun terjadi gangguan atau variasi karakteristik umpan. Selain itu, sistem pengendalian yang terintegrasi dengan instrumen pengukuran dan alarm memungkinkan pemantauan kondisi operasi secara kontinu sehingga penyimpangan dari kondisi operasi yang diinginkan dapat segera diidentifikasi dan dikoreksi. Integrasi antar loop pengendalian ini memungkinkan sistem merespons perubahan kondisi operasi secara menyeluruh, sehingga proses pirolisis dapat berlangsung secara stabil, aman, dan menghasilkan produk diesel oil dengan kualitas yang konsisten, dan efisien.

E. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Fitriyanti, "PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL PIROLISIS MINYAK PELUMAS BEKAS PERTAMBANGAN BATUBARA MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLITE," Redoks, vol.

5, no. 1, p. 1, May 2020, doi: 10.31851/redoks.v5i1.3958.

- [2] R. Y. Parapat et al., "Optimized Synthesis of FeNi/TiO₂ Green Nanocatalyst for High-Quality Liquid Fuel Production via Mild Pyrolysis," *J. Kim. Sains Apl.*, vol. 26, no. 10, pp. 391–403, Dec. 2023, doi: 10.14710/jksa.26.10.391-403.
- [3] H. Ahsan, S. S. Ilhami, and G. Khairunnisa, "PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL BANDUNG 2025".
- [4] R. Y. Parapat et al., "Green-Synthesized Nanoflower FeNi Catalysts for Low-Temperature Pyrolysis of Waste Lubricating Oil into High-Quality Diesel-Like Fuel," *Reactions*, vol. 6, no. 3, p. 50, 2025.
- [5] R. Y. Parapat et al., "Effect of design parameters in nanocatalyst synthesis on pyrolysis for producing diesel-like fuel from waste lubricating oil," *Nanoscale*, vol. 16, no. 33, pp. 15568–15584, 2024.
- [6] R. Y. Parapat, M. Schwarze, A. Ibrahim, M. Tasbihi, and R. Schomäcker, "Efficient preparation of nanocatalysts. Case study: green synthesis of supported Pt nanoparticles by using microemulsions and mangosteen peel extract," *RSC advances*, vol. 12, no. 53, pp. 34346–34358, 2022.
- [7] "Rudy Agustriyanto_METODE OPTIMASI PADA SISTEM PENGENDALIAN PROSES TANGKI PEMANAS BERPENGADUK_JTK USU 6(3)."
- [8] S. R. Panji, A. Sofwan, S. Sugiarto, and P. Wellyantama, "Implementation of the backpropagation algorithm for predicting relative humidity in digital surface weather observation system," *AIP Conf. Proc.*, vol. 3351, no. 1, p. 020001, Nov. 2025, doi: 10.1063/5.0299068.
- [9] A. Dasa Novfowan, M. Mieftah, and W. Kusuma, "Scada Pada Proses Destilasi Dengan Pengendalian Suhu Menggunakan PID," *elposys*, vol. 11, no. 1, pp. 56–61, Feb. 2024, doi: 10.33795/elposys.v11i1.4963.
- [10] R. Y. Parapat, "Efficient Pyrolysis of Asbuton to Produce the Liquid Fuel," in *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN TECHNOLOGY AND DESIGN (ICGTD)*, 2022. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: <https://scholar.google.com/scholar?cluster=7601955062341276297&hl=en&oi=scholar>