RANCANG BANGUN SISTEM KONDENSASI DAN FILTRASI BERTINGKAT UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS HASIL BBM PIROLISIS

Asmad Irawan[1)], Lalang Buana Yhuda[2)] Muhammad Rifqi sepvian[3)]
Politeknik Angkatan Darat, Kodiklat TNI AD[1) 2)]
Politeknik Negeri Malang[2)]
E - mail : asmadpiston31@gmail.com[1]

ABSTRAK

"Proses pirolisis sampah plastik menghasilkan uap hidrokarbon yang memerlukan sistem tata panas dan pemurnian yang optimal untuk menghasilkan bahan bakar minyak (BBM) bermutu tinggi. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji sistem kondensasi bertingkat menggunakan kondensor tipe spiral berbahan tembaga serta sistem filtrasi multilayer. Metode perancangan kondensor dihitung menggunakan pendekatan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dengan parameter input uap reaktor 400°C dan air pendingin 18°C. Uji performa dilakukan pada dekomposisi termal plastic, *Low-Density Polyethylene* (LDPE) *High-Density Polyethylene* (HDPE) dan *Polymethyl Methacrylate* (PMMA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis material plastik dan optimasi suhu berpengaruh signifikan terhadap produk cair. Plastik HDPE menghasilkan 4 Liter minyak dalam waktu 240 menit pada suhu 250°C, sedangkan PMMA menghasilkan 6 Liter minyak dari 7 kg bahan baku pada suhu 400 °C Integrasi filtrasi bertingkat (menggunakan fosfat, pasir silika, dan karbon aktif) berhasil memurnikan produk dengan menekan kadar sulfur hingga mencapai 0,02% – 0,03% serta meningkatkan nilai kalor di atas 9.000 cal/g. Karakteristik ini menunjukkan bahwa BBM pirolisis yang dihasilkan memenuhi standar fisik yang kompetitif untuk disandingkan dengan bahan bakar komersial seperti Pertalite dan Bio Solar.

Kata kunci: Pirolisis, kondensor spiral, filtrasi bertingkat, molecular sieve 3A, kualitas BBM

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya akumulasi limbah plastik global memicu urgensi pemanfaatan teknologi alternatif daur ulang energi, salah satunya melalui metode pirolisis. Pirolisis merupakan proses degradasi termal senyawa hidrokarbon tanpa melibatkan oksigen untuk mengubah rantai polimer plastik menjadi fraksi bahan bakar minyak (BBM) sintetis. Namun, beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa efisiensi konversi uap menjadi cair dan kemurnian minyak yang dihasilkan masih rendah. Pratama (2021) melaporkan kegagalan kondensor tipe crossflow akibat luas permukaan perpindahan panas yang kurang optimal, sehingga sisa uap lolos menjadi gas tak terkondensasi (non-condensable gas). Selanjutnya, Suryadi dan Lestari (2022) menegaskan bahwa kestabilan pendinginan pada struktur kondensor spiral sangat memengaruhi kuantitas produk, sementara Hidayat (2020) menyoroti perlunya sistem filtrasi multilayer untuk meningkatkan kejernihan dan menurunkan viskositas minyak mentah hasil pirolisisKelemahan mendasar dari riset-riset sebelumnya adalah belum terintegrasinya sistem kondensasi dan sistem pemurnian dalam satu rancangan yang menyeluruh (integrated system). Sebagian besar studi berfokus secara terpisah pada aspek termal atau aspek filtrasi saja. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan pada Rancang Bangun Sistem Kondensasi dan Filtrasi Bertingkat untuk Meningkatkan Kualitas Hasil BBM Pirolisis. Ruang lingkup dan alur logika penelitian ini dibatasi secara ketat pada pemodelan, fabrikasi, dan pengujian performa sistem kondensator serta pemurnian bertingkat, dan tidak mencakup analisis performa internal dari reaktor pirolisis itu sendiri. Pendekatan integratif ini diharapkan mampu meminimalisasi kehilangan uap hidrokarbon sekaligus meningkatkan karakteristik fisik dan kimia minyak hasil pirolisis secara signifikan. Beberapa penelitian terdahulu masih memisahkan kajian antara sistem kondensasi dan sistem pemurnian minyak pirolisis. Pendekatan tersebut menyebabkan optimasi proses dilakukan secara parsial dan belum memberikan hasil yang maksimal. Sistem kondensasi sering dirancang tanpa mempertimbangkan kebutuhan filtrasi lanjutan. Sebaliknya, sistem filtrasi dikembangkan tanpa memperhatikan kualitas minyak awal hasil kondensasi. Keterbatasan ini menjadi celah penelitian yang perlu dikembangkan lebih lanjut. Integrasi sistem kondensasi yang efektif dengan filtrasi bertingkat diharapkan mampu meningkatkan kualitas minyak pirolisis secara menyeluruh (Suryadi & Lestari, 2022).

Berdasarkan permasalahan diatas penulis bermaksud untuk menulis judul tugas akhir, dibutuhkan penelitian lebih lanjut mengenai **Rancang Bangun Sistem Kondensasi Dan Filtrasi Bertingkat Untuk Meningkatan Kualitas Hasil BBM Pirolisis.** Dengan adanya perencanaan sistem kondensasi dan filtrasi yang efektif, diharapkan mampu menghasilkan minyak pirolisis dengan

kejernihan yang lebih baik, kandungan air yang rendah, serta stabilitas yang lebih tinggi, sehingga dapat berkontribusi sebagai solusi energi alternatif yang ramah lingkungan Dengan demikian, judul penelitian ini sangat relevan dan memiliki urgensi tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Proses Pirolisis Sampah Plastik dan Pembentukan Uap Hidrokarbon Pirolisis merupakan metode degradasi termal makromolekul polimer plastik menjadi senyawa hidrokarbon rantai pendek tanpa melibatkan oksigen (anoxic pyrolysis). Proses ini memutus ikatan kimia pada plastik seperti, *Low-Density Polyethylene* (LDPE) *High-Density Polyethylene* (HDPE) dan *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) menjadi fase uap yang kaya akan fraksi bahan bakar sintetis (Hidayat, 2022).

Karakteristik produk cair yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jenis material plastik dan optimasi temperatur operasional. Menurut Andriawan dan Sutopo (2020), fraksi uap yang terbentuk dari retakan termal tersebut memerlukan penanganan tata panas yang optimal agar transisi fase gas-ke-cair berjalan maksimal dan meminimalkan terbentuknya gas yang tidak terkondensasi (non-condensable gas).

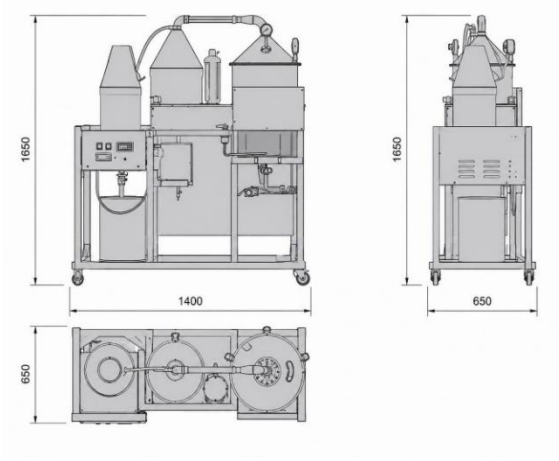
3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental dengan tahapan perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem. Adapun tempat perancangan sistem Kondensasi dan Filtrasi adalah di *workshop* Universitas Negeri Malang, bengkel singosari dan di bengkel otomotif Poltekad Kodiklatad.

Variabel yang digunakan

1. Variabel Bebas: Jenis bahan baku plastik (HDPE dan PMMA), temperatur operasional distilasi uap 250°C dan 400°C), serta jenis susunan media filter.
2. Variabel Terikat: Volume minyak pirolisis yang dihasilkan (Liter), durasi waktu kondensasi (menit), kadar sulfur akhir (%), dan nilai kalor minyak (cal/g).
3. Variabel Kontrol: Suhu awal air pendingin masuk kondensor (18°C), laju sirkulasi air pendingin oleh pompa, dan material pipa kondensor (tembaga).

Data Alat pirolisis

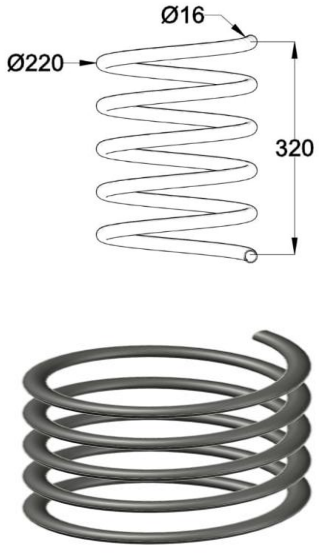


Gambar 1. Design Alat Pirolisis

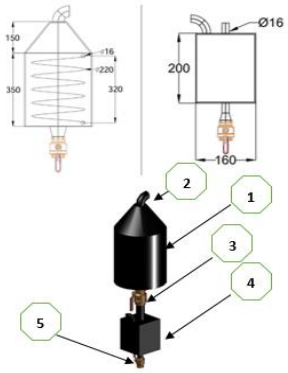
Keterangan :

Reaktor
Tungku kompor oli bekas
Pipa penghubung
Kondensor tipe pipa spiral
Tangki penampung
Scruber

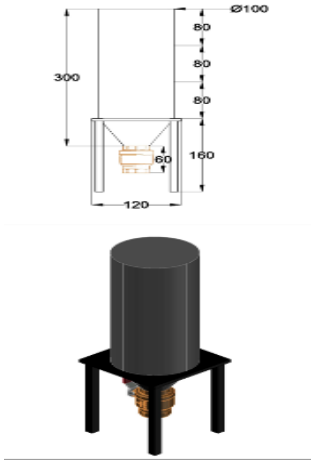
Adapun gambar pada alat Pirolisis Dimana perancangan sistem kondensasi dan filtrasi bertingkan mampu menghasilkan BBM cair minyak pirolisis dengan kejernihan yang lebih baik, kandungan air yang rendah, serta stabilitas yang lebih tinggi.



Gambar 2. Design Pipa Tembaga



Gambar 3. *Design kondensor dan Tangki Penampung Minyak*



Gambar 4. Design Alat Filtrasi

Cara kerja alat

Pada pengaplikasiannya Sistem yang dirancang bekerja secara terintegrasi mulai dari proses pirolisis hingga tahap pemurnian akhir BBM. Secara umum, alur kerja alat terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu proses pirolisis, proses kondensasi, dan proses filtrasi bertingkat.

Alat yang Digunakan untuk Penelitian

Adapun alat yang akan digunakan untuk Pengujian Termokopel Digital, Gelas Ukur, Timbangan Digital, Magnetic Stirrer Hot Plate, Stopwatch, Beaker Glass

Perencanaan sistem

Langkah-langkah yang diambil dalam rancang bangun sistem kondensasi dan filtras bertingkat ini adalah sebagai berikut :

1. Reaktor dirancang dengan kapasitas 5 kg plastik per siklus proses. Kapasitas ini disesuaikan dengan skala laboratorium dan kemampuan sistem pendinginan.
2. Suhu operasi dirancang pada rentang 250–400°C
3. Reaktor menggunakan Stenlis Tipe 304 tebal 3mm untuk Tahan terhadap suhu tinggi Mampu menahan tekanan uap selama proses pirolisis.
4. Sistem kondensasi dirancang untuk mengubah uap hidrokarbon menjadi fase cair secara maksimal.
5. Perencanaan Luas Permukaan Perpindahan Panas
6. Sistem menggunakan pendinginan air sirkulasi dengan pompa.
7. Sistem filtrasi dirancang untuk memurnikan minyak hasil kondensasi secara bertahap.
8. Susunan media filtrasi: Tisu → Penyaring awal partikel kasar, Kapas → Penyaring partikel mikro, Pasir Silika → Penyaring mekanis partikel halus,batu bata merah→ Adsorpsi penyerap warna gelap,sisa kotoran halus dan bau, Molecular Sieve 3A → Penyerap molekul air, Bleaching Earth (pre-treatment) → Mengurangi senyawa polar dan warna kejernihan
9. Perencanaan tabung filtrasi: Diameter tabung: ±10 cm, Tinggi total: ±30 cm, Tinggi masing-masing media: ±5 cm

4. HASIL PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem kondensasi dan filtrasi bertingkat dalam meningkatkan kualitas BBM hasil pirolisis limbah plastik jenis LDPE, HDPE dan HDPE pada suhu operasi 250–400°C. Hasil penelitian meliputi hasil rendemen produk, kinerja kondensor, serta peningkatan kualitas BBM sebelum dan sesudah filtrasi. tersebut dapat diketahui sebagai berikut :

1. Diameter tabung DT= 30 cm = 0,30 m
2. Diameter pipa tembaga Dp=16mm = 0,016 m
3. Panjang total pipa L = 3,78 m

Dimana :

Ds = DT - DP
Ds = 0,30 - 0,016 = 0,284 m

- Keliling satu lilitan
  K = π x Ds
  K = 3,14 x 0,284
  = 0,891 m
- Jumlah lilitan
  N = L total / K
  N = 3,78 x 0,891
  = 4,24 = 4,5 = 5 lilitan
- Pick spiral tembaga
- Pitch (p) = 5 x dp
  P = 5 x 0,016 = 0,08 m
- Total tinggi spiral
  H = N x P
  = 4,5 x 0,08
  = 0,36 m = 60 cm
  Jadi : lilitan pipa = 5 lilitan
  Tinggi Spiral tembaga = 36 cm
  Desain aman = 30 cm

Data Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil eksperimen:

Data sistem pirolisis yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah sebagai berikut:

- Jenis plastik : LDPE/HDPE/PMMA
- Massa feed plastik : 5 kg
- Suhu gas pirolisis masuk kondensor (Tg,in) : 400 °C
- Suhu gas keluar kondensor (Tg,out) : 40 °C
- Waktu operasi batch : 300 menit 18.000 s = (5 jam)
- Media pendingin : Air
- Suhu sumber panas kompor oli : 500 °C
- Suhu dinding dasar tungku stenliss stell : 400°C
- Suhu air masuk (Tw,in) : 18 °C
- Suhu air keluar (Tw,out) : 35 °C

1. Perhitungan Rendemen Minyak Cair

$$Y_i = \frac{m_i}{m_{bahan}} x\ 100\%$$

Dimana:

- Y_i= rendemen minyak (%)
- m_i= massa produk (kg)
- m_{bahan} = massa awal bahan baku (kg)

Massa minyak yg di hasilkan :

$$m_{minyak} = 65\%\ x\ 5\ kg = 3.25\ kg$$

Berdasarkan kejernihan:

$m_{minyak\ bersih}$ =85% x 3.25 kg = 2.76 kg

- Hasil akhir : rendemen total minyak 65%
- Minyak bersih jernih 85% = 2.76 kg
- Sisa gas + residu padat 5 - 3.25 = 1.75 kg = (35%)

2. Perhitungan laju Perpindahan Panas Kondensor (Q)

Laju perpindahan panas menunjukkan seberapa besar kalor yang dialirkan per satuan detik selama proses batch berlangsung. Kalor total dilepaskan bertahap selama total waktu operasi 5 jam18.000 s)

Menurut Sumber Holman, J. P. (2010). Heat Transfer.

Q = (Q kondensor)/t
Q = (3.030.000 J)/(18.000 s)
= 168,33 Watt

Efisiensi kondensasi dihitung dengan:

$$ń_k = \frac{m_{cair}}{m_{uap\ total}} \text{ x } 100\%$$

$$ń_k = \frac{3{,}20}{4{,}30} \text{ x } 100\%$$

$$ń_k = 74{,}4\%$$

3. Penentuan Luas Permukaan Kondensor (A)

Berdasarkan nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) yang diasumsikan sebesar 20 W/m²·K (berdasarkan literatur shell and tube/coil untuk gas hidrokarbon-air), luas permukaan perpindahan panas yang dibutuhkan dihitung dengan.

$$A = \frac{Q}{U\ x\ \Delta T}$$

$$A = \frac{162{,}33\ w}{20\ x\ 44{,}27\ k} = \frac{168{,}33}{885{,}4} = 0{,}1901\ m^2$$

4. Perhitungan Kalor Kondensasi

Q=m x hf_g

hf_g = 250 kj/kg Q = 3,20×250 Q=800 kJ

energi panas sebesar ±800 kJ harus dilepaskan agar uap berubah menjadi cair.

Tabel 1. Tabel hasil pengukuran massa produk:

5. Perhitungan Pelepasan Panas oleh Air Pendingin

Q = m_{air} · Cp · ΔT

- Debit air selama proses = 50 kg
- Cp air = 4,18 kJ/kg°C
- ΔT = (34 - 28) = 6°C

Q=50×4,18×6
Q=1254 kJ

Nilai ini lebih besar dari kebutuhan kalor kondensasi (800 kJ), sehingga sistem pendinginan mampu menyerap panas dengan baik.

Tabel 1. Tabel hasil pengukuran massa produk:

Produk	Massa (kg)	Presentase (%)
Minyak Cair	3,20 kg	64%
Gas non Kondensabel	1,10 kg	22%
Residu padet (car)	0,70 kg	14%
Total	5,00 kg	100%

Tabel 2. Tabel Perbandingan Kualitas BBM

Parameter	Sebelum filtrasi	Setelah filtrasi	Presentase perubahan
Warna	Coklat gelap	Kurang jernih	Meningkat Signifikan
Kandungan air	1,9%	0,7%	63%
Partikel Padat	Tinggi	Rendah	68%
Viskositas Relatif	Tidak Stabil	Lebih Stabil	Stabil
Bau	Menyengat	Lebih Ringan	Berkurang

6. Kesimpulan Dan Saran

Kesimpulan

Sistem kondensasi pipa spiral tembaga yang dirancang dengan metode LMTD terbukti bekerja sangat efektif dengan kapasitas penyerapan panas mencapai 1.254Kj melampaui kebutuhan kondensasi uap sebesar 800Kj Kinerja termal ini menghasilkan efisiensi kondensasi massa sebesar 74,4% dengan laju pembentukan minyak 0,444 g/s, serta mampu mengonversi 5 kg bahan baku plastik

(LDPE/HDPE/PMMA) menjadi 64% rendemen minyak cair (3,20 kg). Selain itu, integrasi filtrasi bertingkat (*multilayer filtration*) berbasis *molecular sieve 3A* berhasil memurnikan produk secara signifikan dengan mereduksi kandungan air sebesar 63% (menjadi 0,7% dan menyaring partikel padat hingga 68%, sehingga menghasilkan BBM pirolisis yang lebih jernih, rendah sulfur (0,02% - 0,03%), dan memiliki nilai kalor di atas 9.000 cal/g yang kompetitif dengan bahan bakar komersial.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya adalah:

1. Perlu dilakukan pengujian lanjutan sesuai standar ASTM atau SNI untuk mengetahui parameter lengkap seperti nilai kalor, angka oktan, densitas, dan kandungan sulfur.
2. Perlu dilakukan analisis ekonomi untuk mengetahui kelayakan sistem pada skala industri.
3. Pengembangan sistem kondensasi bertingkat (multi-stage condenser) dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi perubahan fase uap menjadi cair.
4. Penggunaan alat uji laboratorium seperti bomb calorimeter dan viscometer digital disarankan untuk memperoleh data yang lebih akurat.
5. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan variasi suhu reaktor dan jenis katalis untuk meningkatkan rendemen minyak cair.

DAFTAR PUSTAKA

Andriawan, B., & Sutopo, W. (2020). *Analisis kualitas fuel oil hasil pirolisis plastik*. Jurnal Energi dan Manufaktur.

Cahyono, T. (2019). *Pengaruh adsorben terhadap pemurnian minyak pirolisis limbah plastik*. Jurnal Rekayasa Proses.

Fitriyanto, A. (2021). *Pemurnian pyrolysis oil menggunakan karbon aktif dan zeolit*. Jurnal Teknik Kimia Indonesia.

Hidayat, R. (2022). *Karakteristik bahan bakar alternatif dari pirolisis sampah plastik*. Jurnal Sains Energi.

Putra, D. (2020). *Penggunaan CaO untuk desulfurisasi minyak pirolisis*. Jurnal Teknologi Lingkungan.

Maulana, A. (2023). *Optimasi sistem filtrasi multilayer pada pemurnian minyak*. Jurnal Inovasi Teknik Mesin.

Nugroho, S. (2021). *Distilasi fraksional minyak pirolisis plastik*. Jurnal Rekayasa Energi.

Permana, W. (2019). *Peningkatan kualitas pyrolysis oil dengan katalis Ni/Al_2O_3*. Jurnal Kinetika Reaksi.

Santoso, F. (2024). *Studi eksperimental fuel oil dari sampah plastik dengan sistem purifikasi bertahap*. Jurnal Teknik Terapan.

Widodo, B. (2018). *Analisis sifat bahan bakar hasil upgrading pirolisis*. Jurnal Material Energi.

Yuliana, T. (2022). *Perbandingan berbagai adsorben untuk pemurnian minyak pirolisis*. Jurnal Sains Material