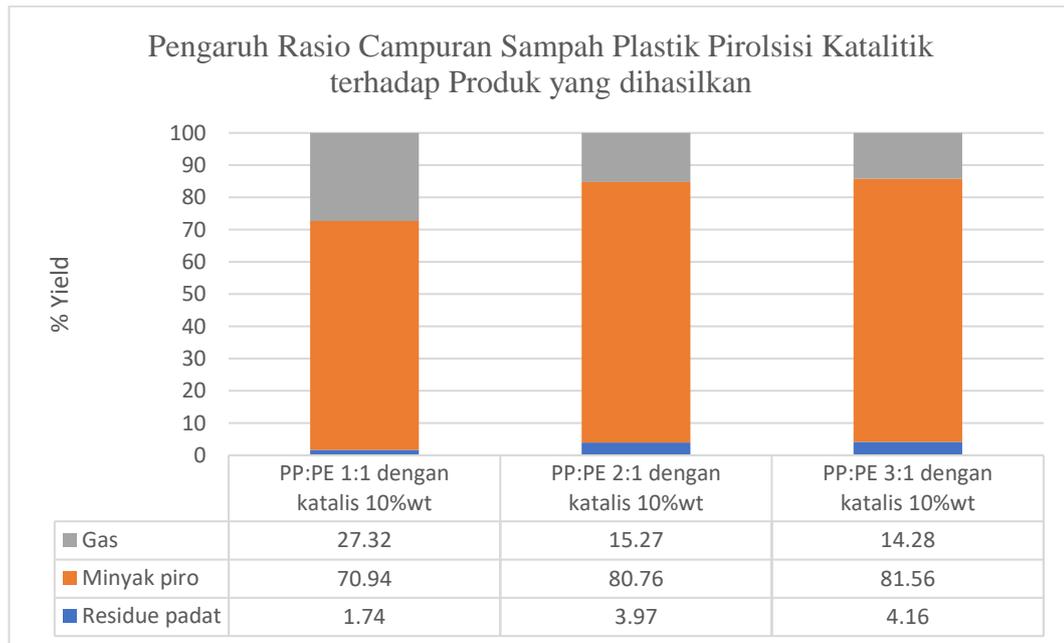


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Hasil Pirolisis



Gambar 4. 1 Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Distribusi Produk

Degradasi termal setiap jenis plastik memiliki perbedaan suhu dalam degradasinya. Untuk memahami degradasi termal ini dapat dilakukan dengan analisis TGA (Thermogravimetric Analysis). Analisis TGA berguna untuk mengetahui tingkat kemudahan plastik untuk terdekomposisi. Menurut Miandad dkk, suhu degradasi PP dimulai pada suhu 240°C dan maksimum pada 425°C, sedangkan untuk PE dimulai pada suhu 270°C dan maksimum pada 485°C. Secara teoritis, PP terurai lebih cepat dibandingkan PE. Hal ini disebabkan oleh struktur molekul PP, di mana setengah dari atom karbon dalam rantai PP adalah karbon tersier. dan memudahkan pembentukan karbokation tersier selama proses degradasi, sehingga mempercepat pemutusan struktur kimianya (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Pemutusan struktur kimia ini menghasilkan gas-gas yang lebih mudah terkondensasi dibandingkan dengan plastik PE (Irawan dkk., 2023). Oleh karena itu, penambahan plastik PP yang lebih banyak akan meningkatkan konversi

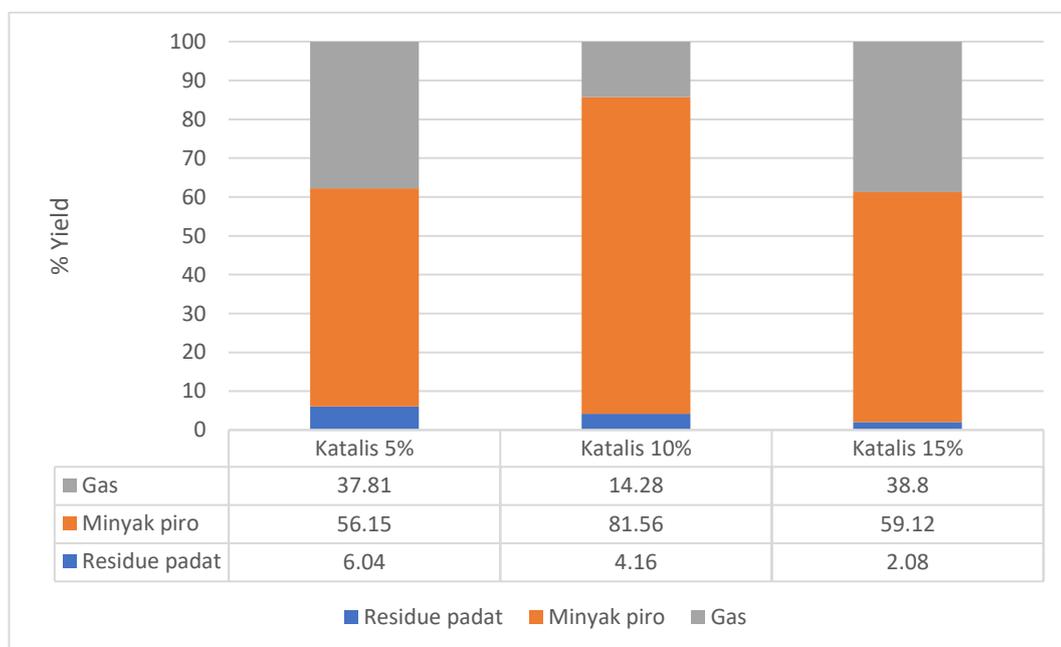
hidrokarbon menjadi cairan dan mengurangi kontribusi PE dalam menghasilkan gas (Aguado dkk., t.t.)(Al-Salem dkk., 2017)(Das & Tiwari, 2018). Hasil ini dapat dilihat pada Gambar 1, di mana pirolisis campuran plastik PP dan PE dengan rasio 3:1 menghasilkan lebih banyak minyak pirolisis dibandingkan dengan campuran plastik PP dan PE dengan rasio 2:1 dan 1:1. Hasil yang didapatkan ini selaras dengan penelitian (Heriyanto dkk., 2024) yang menyatakan bahwa semakin banyak penambahan plastik PP pada campuran plastik PP dan PE akan menghasilkan minyak pirolisis yang banyak pula.

4.2 Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Hasil Pirolisis

Gambar 4.2 menunjukkan bagaimana rasio katalis FCC pada pirolisis campuran plastik PP dan PE 3:1 pada suhu 350°C secara signifikan mempengaruhi distribusi produk minyak pirolisis, gas, dan residue padat. Pada peningkatan rasio katalis terhadap campuran plastik PP dan PE dari 5% wt hingga 15%wt, hasil residue padat mengalami penurunan dari 6,04% berat menjadi 2,08% berat. Hal ini disebabkan karena dengan peningkatan rasio katalis dapat meningkatkan konversi senyawa rantai panjang menjadi senyawa rantai pendek melalui degradasi katalitik (Oyeleke dkk., 2021)(Lee dkk., t.t.)(F. A. Aisien & Aisien, 2023). Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (F. A. Aisien & Aisien, 2023) yang menunjukkan tren penurunan residue padat pada peningkatan rasio katalis dari 0 - 20% wt terhadap plastik.

Namun pada penelitian ini, hasil minyak pirolisis dan gas trennya mengalami peningkatan dan penurunan. Pada peningkatan rasio katalis 5% wt hingga 10% wt, yield minyak mengalami peningkatan yang signifikan dari 56,15% menjadi 81,56% sedangkan gas mengalami penurunan dari 37,81% menjadi 14,28%. Tetapi pada peningkatan rasio katalis 15% wt, hasil minyak mengalami penurunan hingga 59,12% sedangkan gas mengalami kenaikan hingga 38,8%. Kemungkinan besar dengan meningkatkan rasio katalis menjadi 15%wt dapat memperbanyak situs-situs asam dan memperluas permukaan katalis sehingga luas kontak antara katalis dengan campuran plastik PP dan PE dalam perengkahan semakin banyak. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *over cracking* sehingga memungkinkan menghasilkan senyawa hidrokarbon rantai pendek seperti gas-gas

(Al-Salem dkk., 2017). Selain itu, mungkin dengan peningkatan rasio katalis dapat memperbanyak mikropori sehingga molekul-molekul tersebut tidak hanya bereaksi pada permukaan luar katalis dan mesopori tetapi juga pada mikropori katalis (Irawan dkk., 2023). Oleh sebab itu, dengan penambahan katalis 15%wt akan menghasilkan gas dan *gasoline* yang lebih banyak daripada penambahan katalis 5 dan 10%wt. Hal itu dapat dilihat seperti pada gambar 4.2. Tren peningkatan dan penurunan pada minyak cair yang dihasilkan serupa dengan penelitian (F. A. Aisien & Aisien, 2023) yang menunjukkan tren peningkatan minyak cair pada penambahan katalis 0-20% wt sedangkan tren penurunan terjadi pada penambahan katalis 25%wt.



Gambar 4. 2 Pengaruh Spent Katalis FCC terhadap Hasil Produk

4.3 Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Komposisi Produk Minyak Pirolisis

Tabel 4.1 dan Gambar 4.3(b) menampilkan hasil GC-MS berupa kandungan komposisi kimia yang terdapat pada minyak pirolisis katalitik campuran PP dan PE 3:1 pada suhu 350°C dengan berbagai rasio katalis 5, 10, dan 15% wt. Komposisi penyusun utama produk minyak cair pirolisis terdiri dari olefin, paraffin, aromatik, dan alkohol. Pada setiap rasio katalis memiliki kesamaan yaitu menghasilkan olefin

diatas 60%. Hal ini dapat dijelaskan oleh mekanisme reaksi perengkahan katalitik yang terdiri dari 3 tahap yaitu tahap inisiasi, propagasi dan terminasi.

1. Tahap inisiasi, meliputi pembentukan dua spesies ionic, karbokation, berupa karbenium dan karbonium melalui pemutusan ikatan C-C. Mekanisme pembentukan ion karbenium dapat terjadi melalui sumbangan proton oleh situs asam Bronsted kepada senyawa olefin atau terjadi melalui abstraksi ion hidrida senyawa alkana oleh situs asam Lewis. Sedangkan pembentukan ion karbonium terjadi melalui sumbangan proton oleh situs asam Bronsted kepada senyawa alkana.
2. Tahap propagasi, ion karbonium mengalami perengkahan untuk menghasilkan produk alkana dan ion karbenium, sedangkan ion karbenium yang dihasilkan di situs asam Lewis melalui pemotongan β untuk menghasilkan produk olefin dan ion karbenium lainnya.
3. Tahap terminasi, ion karbenium menyumbangkan proton untuk memulihkan situs asam Bronsted dan menghasilkan olefin sebagai produk akhir, atau mereka mengabstraksi ion hidrida untuk memulihkan situs asam Lewis menghasilkan produk i-alkana, dan reaksi berantai ionik berlanjut.

Degradasi katalitik campuran PP dan PE berlangsung melalui mekanisme ion karbenium sehingga menghasilkan kandungan olefin yang lebih banyak. Selain itu, hasil olefin yang banyak ini mengartikan bahwa proses perengkahan primer pada polyolefin (plastik PP dan PE) tidak mudah diubah menjadi paraffin dengan reaksi hidrogenasi dan aromatic dengan reaksi siklisasi (Lee dkk., t.t.).

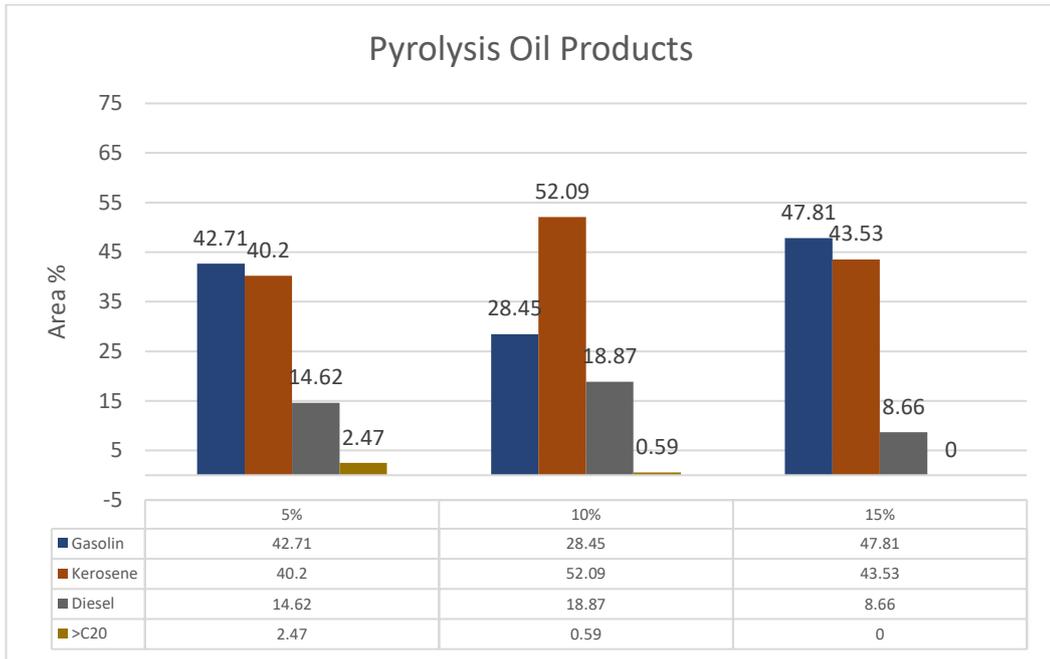
Peningkatan rasio katalis dapat mempengaruhi berat molekul yang dihasilkan seperti yang tertera pada Tabel 4.1. Pada rasio katalis 5%wt, 10%wt, dan 15%wt menghasilkan rentang berat molekul berturut-turut sebesar 84 – 382, 84 – 336, dan 78 – 268. Hasil tersebut mengartikan dengan meningkatkan rasio katalis dapat menurunkan rentang berat molekul rendah sehingga kualitas minyak cair yang dihasilkan semakin baik.

Pada penelitian ini untuk mengetahui kualitas terbaik dapat dilihat pada presentase gasoline terbesar. Gambar 4.3(a) menampilkan persentase jenis-jenis minyak yang terdapat pada minyak pirolisis. Hasil yang didapatkan bahwa pada

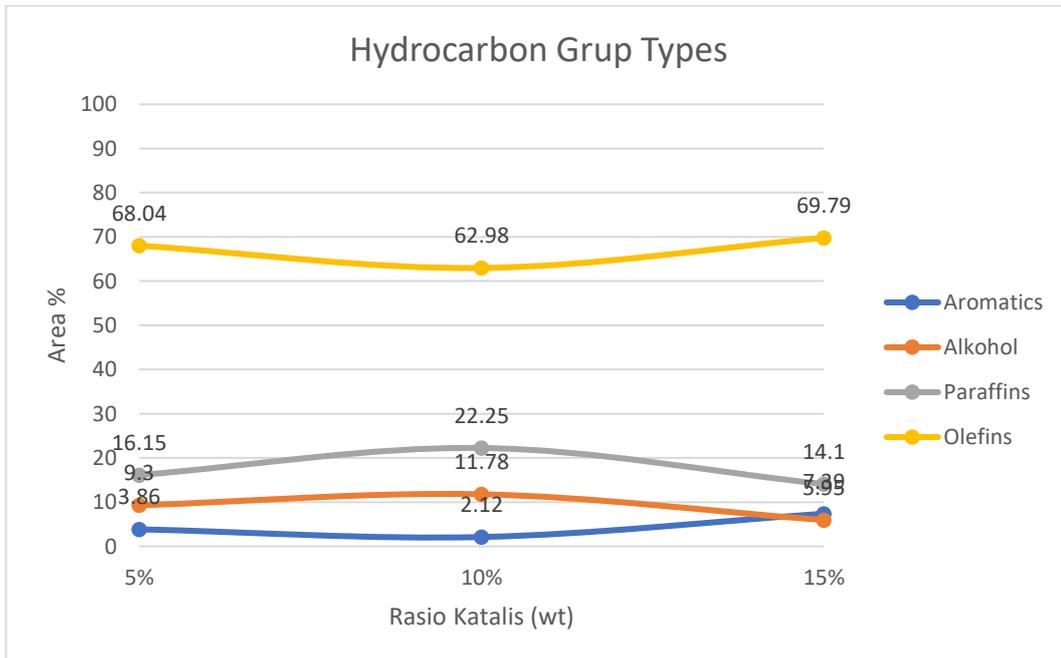
penambahan katalis 15% wt menghasilkan persentase gasoline terbanyak yaitu sebesar 47,81%wt.

Tabel 4. 1 Komposisi Minyak Pirolysis GC-MS

No	Compound	Area %			Molecular Formula	Molecular Weight
		Katalis 5%	Katalis 10%	Katalis 15%		
1	Benzene	0	0	1.82	C6H6	78
2	1-Pentene, 2-methyl-	2.42	1.56	3.29	C6H12	84
3	2-Butene, 2,3-dimethyl-	1.16	0	0	C6H12	84
4	Toluene	1.64	0	2.95	C7H8	92
5	1,3,5,7-Cyclooctatetraene	0	2.39	0	C8H8	104
6	1,3,7-Octatrien-5-yne	2.24	0	2.18	C8H8	104
7	1-Cyclohexene, 1-ethyl-	2.5	0	3.04	C8H10	106
8	2-Hexene, 2,3-dimethyl-	3.31	1.84	3.55	C8H16	112
9	Heptane, 4-methyl-	1.49	0	1.74	C8H18	114
10	1-Pentanol, 2-ethyl-	2.35	0	0	C7H16O	116
11	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	1.52	0	1.76	C9H12	120
12	2,4-Dimethyl-1-heptene	20.98	17.04	21.88	C9H12	126
13	1-Decene	1.38	1.31	1.59	C10H20	140
14	Decane	0	0.75	0	C10H22	142
15	Nitroxide, bis[1,1-dimethylethyl]	0.54	0	0	C8H18NO	144
16	1-Undecene	3.1	2.87	2.98	C11H22	154
17	Decane, 4-methyl-	0.79	0.61	1.77	C11H24	156
18	Cyclopentaneethanol, beta, 2,3-trimethyl-	1.18	1.53	1.21	C10H20O	156
19	Undecane	0	1.9	0	C11H24	156
20	Nonane, 2,6-dimethyl-	0.79	0	0	C11H24	156
21	Ether, 6-methylheptyl vinyl	0	0	1.38	C10H20O	156
22	Pentane, 2-bromo-2-methyl-	0	2.03	0	C6H13Br	164
23	1-Dodecene	1.99	4.01	1.22	C12H24	168
24	3-Decene, 2,2-dimethyl-, [E]-	0	0.8	0	C12H24	168
25	1-Undecene, 7-methyl-	17.66	16.26	15.08	C12H24	168
26	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl-	0	0	2.6	C12H24	168
27	4-Undecene, 7-methyl-	0	0	2.28	C12H24	168
28	Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl-	0	0	0.79	C12H24	168
29	Dodecane	1.82	0	0.88	C12H26	170
30	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	0	1.73	0	C11H24O	172
31	Benzene, (3,3-dimethyl-4-pentenyl)-	0	1.01	0	C13H18	174
32	2-Tridecene, (Z)-	2.32	0	0	C13H26	182
33	Undecane, 4,8-dimethyl-	0	0.61	0	C13H28	184
34	Tridecane	1.75	5.42	3.41	C13H28	184
35	n-Hexanesulphonylacetonitrile	0	0	1.42	C8H15NO2S	189
36	4-Tetradecene, [E]-	3.11	3.03	2.29	C14H28	196
37	1-Tetradecene	2.1	7.64	5.55	C14H28	196
38	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	0.7	1.11	0.86	C15H16	196
39	Cyclotetradecane	0	0	0.71	C14H28	196
40	Tetradecane	1.47	0	1.17	C14H30	198
41	n-Tridecan-1-ol	0	1.5	0	C13H28O	200
42	2-Hexyl-1-octanol	3.3	4.7	2.8	C14H30O	214
43	Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediyl)	0	0.92	0	C16H30	222
44	Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediyl)bis-	0.76	0	0	C16H30	222
45	Cetene	2.99	2.08	2.26	C16H32	224
46	Cyclohexane, decyl-	0	0.71	0	C16H32	224
47	Hexadecane	2.4	2.14	0	C16H34	226
48	1-Heptadecene	0.78	1.55	0	C17H34	238
49	1-Decanol, 2-hexyl-	2.05	2.32	1.94	C16H40	242
50	Nonadecane	2.43	4.01	3.63	C16H40	268
51	7-Heptadecene, 17-chloro-	0	0.6	0	C17H33Cl	272
52	Nonadecane, 2-methyl-	1.75	2.56	0	C20H42	282
53	Oxalic acid, allyl dodecyl ester	0	0.87	0	C17H30O4	298
54	Cyclohexane, octadecyl-	0	0.59	0	C24H48	336
55	Oxalic acid, cyclohexyl dodecyl ester	0.76	0	0	C20H36O4	340
56	Cyclohexane, eicosyl-	0.7	0	0	C26H52	364
57	Sulfurous acid, octadecyl 2-propyl ester	1.34	0	0	C22H44O2S	376
58	1-Hexacosanol	0.42	0	0	C26H54O	382



(a)



(b)

Gambar 4.3 Efek variasi %katalis terhadap (a) Jenis minyak cair pirolisis katalitik, dan (b) Jenis hidrokarbon pada minyak cair pirolisis

4.4 Pengaruh Rasio Katalis terhadap Sifat Fisik Minyak Pirolisis

Tabel 4.2 dan 4.3 menunjukkan perbandingan viskositas dan densitas minyak pirolisis campuran plastik PP & PE 3:1 pada suhu 350°C dengan bahan bakar konvensional. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa pada penambahan katalis 5% wt, 10% wt, dan 15% wt berturut-turut menghasilkan minyak pirolisis dengan nilai viskositas dan densitas sebesar 1,31 cSt dan 0,769 g/cm³, 1,27 cSt dan 0,770 g/cm³, dan 1,30 cSt dan 0,769 g/cm³. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan rasio katalis tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap nilai viskositas dan densitas minyak pirolisis yang dihasilkan dan cenderung konstan. Hasil tersebut serupa dengan tren nilai yang cenderung konstan pada penelitian lain (Heriyanto dkk., 2024)(F. A. Aisien & Aisien, 2023). Selain itu, minyak pirolisis yang dihasilkan secara sifat fisik viskositas dan densitas menyerupai dengan minyak tanah (kerosene) seperti yang tertera pada tabel 4.3.

Tabel 4. 2 Sifat Fisik Minyak Pirolisis tiap Variasi Rasio Katalis

Rasio katalis terhadap campuran plastik PP dan PE 3:1 (wt,%)	Viskositas 40°C (cSt) ASTM D445	Densitas (g/cm ³) ASTM D1298
5	1,31	0.769
10	1,27	0,770
15	1,30	0.769

Tabel 4. 3 Rentang Nilai Viskositas dan Densitas pada Minyak Bumi

Jenis Minyak Bumi	Viskositas 40°C (cSt) ASTM D445	Densitas (g/cm ³) ASTM D1298	Ref.
Gasoline	0,775 – 1,03	0,72 – 0,74	(F. A. Aisien & Aisien, 2023)
Kerosene	0,9 – 2,2	0,78 – 0,82	(F. A. Aisien & Aisien, 2023)
Diesel	2,0 – 4,5	0.815 – 0.870	(Ditjen Migas, t.t.)

4.5 Analisa Ekonomi Produk Minyak Pirolisis

Tahap akhir dari penelitian ini adalah menganalisa ekonomi produk minyak pirolisis untuk melihat apakah hasil dari penelitian ini ekonomis atau tidak. Dalam menganalisa ekonomi perlu mempertimbangkan biaya bahan baku dan operasional. Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini berupa sampah plastik PP dan PE serta *spent catalyst FCC*. Biaya bahan baku ini gratis atau Rp. 0. Sedangkan biaya operasional yang digunakan ialah penggunaan solar untuk bahan bakar pada proses pirolisis dan listrik untuk menghidupkan pompa air, pengaliran air pada kondensor, dan *temperature controller*. Berikut adalah tabel biaya operasional yang dibutuhkan :

Tabel 4. 4 Biaya operasional pirolisis

Jenis biaya operasional	Kuantitas (/jam)	Biaya satuan	Biaya operasional
Solar	1,3 L	Rp. 15.650/ L	Rp. 20.345
Pompa	33 Watt	Rp. 1.352/ kWh	Rp. 44,616
<i>Temperature controller</i>	50 watt	Rp. 1.352/ kWh	Rp. 67,600
Total			Rp. 20.457,216

Produk minyak pirolisis diambil yang terbanyak secara kuantitas sebagai biaya penjualan minyak pirolisis. Produk yang terbanyak terdapat pada rasio katalis 10%wt yaitu sebesar 529 ml. Minyak pirolisis diasumsikan sebagai minyak mentah dengan harga US\$79,78 per barel atau Rp. 7,733 per ml. Sehingga biaya penjualan minyak pirolisis sebesar Rp. 4090,757. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa minyak pirolisis katalitik tidak ekonomis tetapi dari segi lingkungan menguntungkan karena dapat mengurangi limbah sampah plastik campuran PP dan PE sebesar 500 gram. Secara ekonomis hasil ini memungkinkan dapat ditingkatkan dengan penambahan campuran plastik PP dan PE sebanyak 3 kg. Karena kapasitas reaktor dapat menampung hingga 3 kg serta dapat pula mensubstitusikan bahan bakarnya dari LPG atau dilakukan modifikasi alat pirolisis dengan berbahan bakar listrik dengan diintegrasikan pemberdayaan gas hasil pirolisis dengan penambahan

turbin dan generator sehingga gas hasil pirolisis dapat memutar turbin dan listrik yang dihasilkan dapat disimpan di generator.