

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampah plastik selalu menjadi masalah utama dalam pencemaran lingkungan baik pencemaran tanah maupun laut. Sifat sampah plastik tidak mudah terurai, butuh waktu sampai ratusan tahun bila terurai secara alami. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan teknologi pengolahan sampah yaitu pirolisis. Pirolisis dapat digunakan sebagai alternatif dalam mengolah sampah plastik yang bernilai jual rendah seperti sampah bungkus makanan, minuman dan lain-lain. Produk dari pirolisis terbagi menjadi padat, cair, dan gas. Dalam prosesnya, pirolisis memiliki kecepatan berbeda dalam menghasilkan produk, tergantung jenis plastik yang digunakan. Oleh karenanya diperlukan katalis sebagai aditif untuk meningkatkan laju reaksi pembentukan produk pirolisis.

Jenis plastik yang digunakan pada penelitian ini adalah polipropilen (PP) berupa sampah plastik kemasan atau plastik *sachet* dan katalis yang digunakan adalah bentonit yang berasal dari Jasinga, Jawa Barat. Katalis kemudian diaktivasi menggunakan HCl dengan berbagai konsentrasi yaitu 0,25 M; 0,5 M; dan 0,75 M. Dengan variabel tersebut, dapat dilihat pengaruh konsentrasi HCl pada aktivasi katalis bentonit terhadap pembentukan produk pirolisis yang dihasilkan.

4.1 Karakteristik Bentonit

Bentonit diaktivasi menggunakan senyawa asam anorganik berupa HCl. Proses aktivasi bertujuan untuk menukar kation-kation penyeimbang yang berada di dalam struktur bentonit (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) dengan ion H^+ yang berasal dari asam dan melepas ion Al, Fe, serta Mg serta pengotor-pengotor lainnya dari kisi-kisi struktur, sehingga secara fisik bentonit tersebut menjadi aktif setelah diasamkan. Selama proses aktivasi bentonit, Al, Fe, dan Mg larut dalam larutan, kemudian terjadi penyerapan asam ke dalam struktur bentonit dan mengakibatkan rangkaian struktur mempunyai luas permukaan yang lebih besar dari bentonit sebelum diaktivasi. Pada aktivasi tersebut terjadi pertukaran kation dari garam mineral (Ca^+ dan Na^+) pada lapisan *interlayer* bentonit dengan ion H^+ dari asam, kemudian diikuti dengan

pelarutan ion Al^{3+} dan ion logam lainnya seperti Fe^{3+} dari lapisan *lattice* bentonit. Akibat pelarutan ion Al^{3+} , maka bentonit menjadi bermuatan negatif sehingga kemampuan penyerapannya akan meningkat (Hymore, 1996).

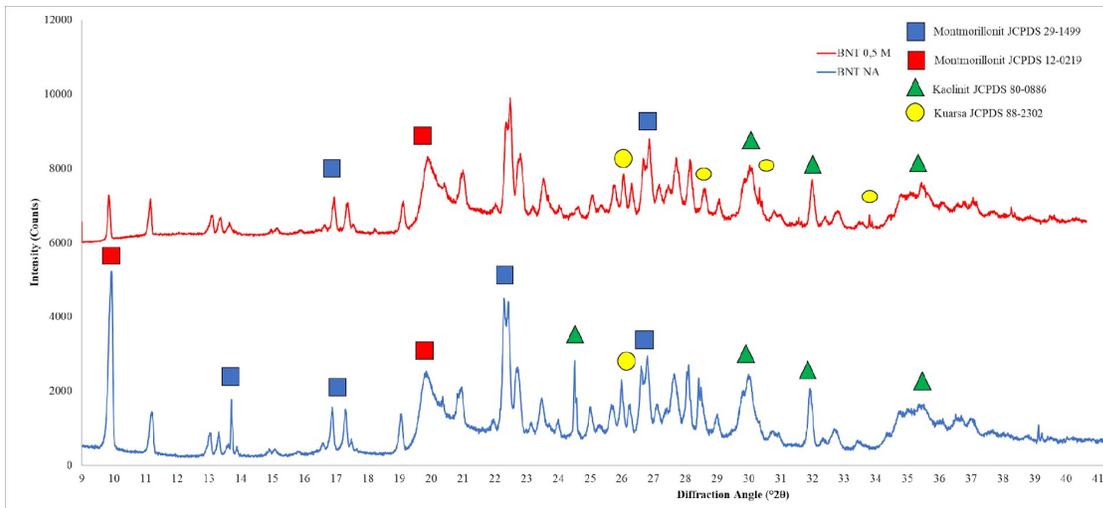
Aktivasi bentonit dipengaruhi oleh konsentrasi larutan asam. Peningkatan konsentrasi HCl dalam proses aktivasi bentonit dapat mengakibatkan pelepasan mineral dari struktur bentonit. Ketika lebih banyak mineral dilepaskan, massa bentonit secara keseluruhan dapat berkurang. Hal tersebut dapat terjadi karena sebagian dari massa bentonit awalnya adalah mineral-mineral yang dilepaskan atau terlarut dalam larutan HCl. Penurunan massa bentonit setelah aktivasi dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Perbandingan Massa Bentonit

Konsentrasi HCl	Massa Sebelum Aktivasi (g)	Massa Sesudah Aktivasi (g)
0,25 M	171,5	154,35
0,50 M	171,5	151,06
0,75 M	171,5	149,55

Karakteristik struktur dan kristalinitas bentonit diuji menggunakan instrumen XRD untuk mengetahui keberhasilan pembentukan katalis bentonit dan mengetahui material – material lain penyusun bentonit. Difraksi sinar X atau *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui material kristalit, baik strukturnya maupun fase dari material tersebut, seperti mengidentifikasi struktur kristalit (yang termasuk nilai kualitatif) dan struktur fase (yang termasuk nilai kuantitatif) dalam suatu bahan dengan memanfaatkan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X (Munasir, dkk., 2012). Prinsip kerja dari analisis XRD sendiri yaitu dengan mendifraksi cahaya yang melewati celah kristal atau kisi – kisi yang memiliki panjang gelombang yang setara dengan jarak antar atom, yaitu sekitar 1 angstrom. Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan material maka berkas beberapa ada yang akan diabsorpsi, kemudian akan ditransmisikan, dan

sebagian akan dihamburkan atau terdifraksi, hamburan inilah yang akan dideteksi oleh XRD. Adapun sampel yang dianalisis menggunakan XRD ini merupakan sampel bentonit tanpa aktivasi (BNT-NA) dan bentonit teraktivasi dengan larutan HCl 0,5 M (BNT-0,5M). Hasil yang didapatkan dari uji XRD dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Hasil Analisa XRD Katalis Bentonit

Berdasarkan gambar 4.1 terdapat banyak puncak atau biasa dikenal *peak* yang merupakan salah satu parameter penting dalam menjelaskan pola difraksi terhadap sampel. Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi asam yang digunakan dalam proses aktivasi bentonit terhadap kristalinitas bentonit. Gambar 4.1 menunjukkan adanya perubahan pada sampel BNT-0,5M dengan sampel BNT-NA berupa penurunan intensitas difraktogram. Puncak pada difraksi $2\theta = 9.87^\circ, 13.71^\circ, 22.30^\circ, 22.43^\circ, 22.72^\circ, 24.51^\circ, 25.99^\circ, 28.11^\circ, 28.42^\circ$ dan 31.94° mempunyai intensitas yang menurun pada sampel BNT-0,5M dibandingkan sampel BNT-NA.

Penggunaan HCl pada proses aktivasi bentonit menyebabkan penurunan intensitas difraktogram sampel BNT-0,5M. Hal tersebut terjadi karena proses pembentukan fase amorf yang disebabkan oleh terdekomposisinya struktur montmorillonit. Namun, hanya sebagian struktur montmorillonit yang terdekomposisi karena masih terdapat puncak montmorillonit. Siregar S. (2016) menyatakan penurunan intensitas difraktogram dan terjadinya peningkatan lebar

puncak menunjukkan bahwa kristalinitas bentonit sangat dipengaruhi oleh pengaktifan asam. Aktivasi dengan HCl dapat memecahkan agregat mineral dalam bentonit dan menyebabkan pembentukan senyawa baru. BNT-0,5M mengalami peningkatan puncak pada difraksi $2\theta = 26.03^\circ, 28.63^\circ, 30.34^\circ$ dan 33.81° . Penggunaan larutan asam pada aktivasi katalis bentonit mengubah rasio Si/Al yang merupakan penyusun senyawa kuarsa. Rasio Si/Al meningkat setelah penambahan larutan asam dimana peningkatan tersebut ditunjukkan oleh penambahan 4 puncak difraksi.

Terbentuknya senyawa kuarsa seiring meningkatnya konsentrasi asam telah dibuktikan dalam penelitian yang dilakukan oleh Rahman, dkk (2022). Penelitian tersebut menunjukkan spektra XRD pada bentonit teraktivasi H_2SO_4 mengalami pembentukan senyawa kuarsa yang dibuktikan dengan adanya penambahan puncak senyawa kuarsa. Jumlah puncak senyawa kuarsa dua kali lebih banyak pada bentonit teraktivasi H_2SO_4 3M dibandingkan dengan bentonit tanpa aktivasi. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Vukovic, Z, dkk (2006) menunjukkan peningkatan konsentrasi HCl pada aktivasi bentonit menghasilkan penyempitan puncak senyawa kuarsa pada spektra XRD.

Berdasarkan hasil spektra XRD pada bentonit sebelum proses aktivasi menunjukkan bahwa puncak-puncaknya cenderung sama dengan bentonit setelah aktivasi hal tersebut mengindikasikan bahwa sampel bentonit memiliki fasa yang sama (Sibarani, dkk. 2020). Pola XRD (Gambar 4.1) akan dibandingkan dengan data JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) untuk membuktikan kesamaan jenis bentonit.

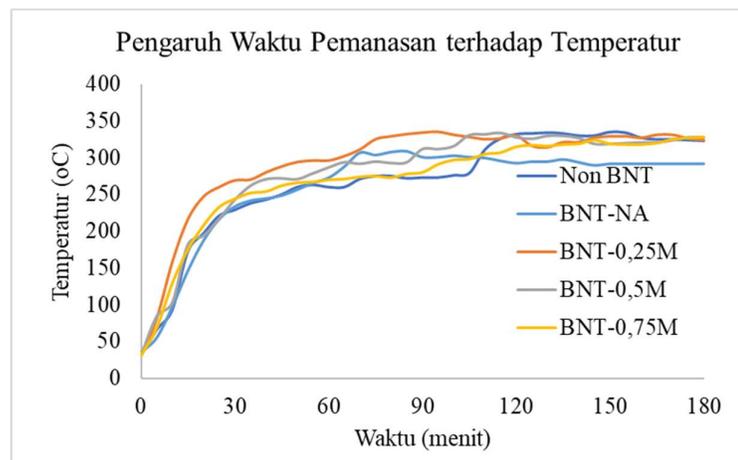
Tabel 4.2 Nilai 2θ ($^\circ$) pada Bentonit

Mineral	Sumber	$2\theta^\circ$	$2\theta^\circ$	$2\theta^\circ$
		(JCPDS)	(BNT-NA)	(BNT-0,5M)
Montmorillonit ($Na.O_3(AlMg)_2Si_4$ $O_{10}(OH)_2.6H_2O$)	JCPDS 29-1499	17.28	17.26	17.31
		22.49	22.41	22.46
	JCPDS 12-0219	9.817	-	9.87
		19.87	19.82	19.85

		26.80	26.73	26.83
Kaolinit (Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄)	JCPDS 80-0886	24.51	24.49	24.51
		30.06	29.99	30.03
		31.98	31.94	31.93
		35.67	35.42	35.40
Kuarsa (SiO ₂)	JCPDS 88-2302	26.06	26.00	26.03
		28.85	28.41	28.63
		30.65	-	30.34
		33.04	-	33.81

4.2 Pengaruh Waktu Pemanasan terhadap Temperatur (*Effect of Heating Time on Temperature*)

Proses pirolisis dipengaruhi beberapa faktor seperti waktu dan temperatur pemanasan. Adapun hasil perbandingan waktu dengan temperatur dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Profil Hubungan Waktu Pemanasan terhadap Temperatur

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada gambar 4.2 terlihat bertambahnya waktu proses pirolisis diiringi dengan kenaikan temperatur proses pirolisis. Peningkatan temperatur disebabkan oleh penyerapan kalor pada proses pirolisis oleh bahan baku plastik. Plastik sebagai bahan baku akan menyerap panas dan merambat keseluruh bagian permukaan plastik yang terdapat di dalam reaktor.

Penyerapan panas dengan waktu yang lebih lama akan meningkatkan temperatur proses pirolisis. Hal tersebut menyebabkan plastik mengalami degradasi rantai hidrokarbon penyusun menjadi rantai hidrokarbon yang lebih pendek.

Plastik memiliki sifat termal berupa titik lebur. Titik lebur merupakan titik dimana plastik mulai melunak dan berubah wujud menjadi cair. Titik lebur dari plastik polipropilena (PP) adalah 160°C. Peningkatan temperatur pada sampel tanpa katalis (Non-BNT) membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan sampel lainnya dengan laju pemanasan yaitu 2,72°C/menit (Tabel 4.3). Penambahan bentonit sebagai katalis pada proses pirolisis dapat meningkatkan laju pemanasan. Keberadaan katalis dalam proses pirolisis dapat membantu mengurangi energi aktivasi yang dibutuhkan untuk memulai reaksi pirolisis, sehingga proses pirolisis dapat berlangsung lebih cepat.

Berdasarkan data pada Tabel 4.3, hasil laju pemanasan tertinggi terdapat pada sampel BNT-0,5. Hal tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi larutan asam pada aktivasi katalis bentonit mempengaruhi laju pemanasan. Konsentrasi yang terlalu rendah menyebabkan tidak sempurnanya pembentukan situs aktif, sebaliknya konsentrasi yang terlalu besar akan menyebabkan rusaknya struktur katalis (G. Geraldina, dkk, 2016).

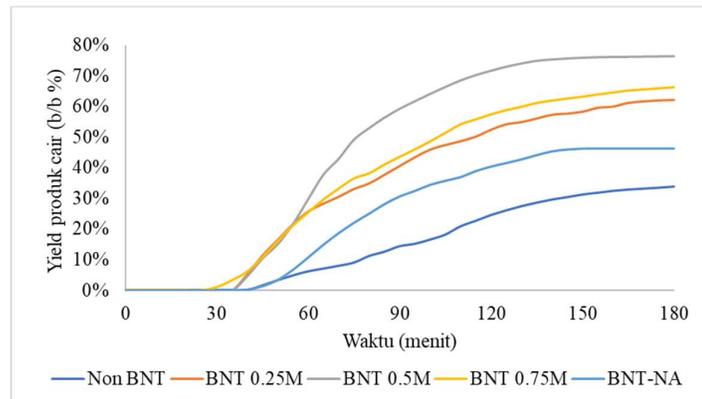
Tabel 4.3 Laju Pemanasan

Sampel	Laju Pemanasan (°C/Menit)
Non-BNT	2,72
BNT-NA	4,28
BNT-0,25M	4,61
BNT-0,5M	5,00
BNT-0,75M	2,85

(Sumber: Data hasil analisa)

4.3 Pengaruh Waktu Pirolisis terhadap Pembentukan Produk Cair

Grafik pengaruh waktu terhadap pembentukan produk cair dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Pengaruh Waktu terhadap Pembentukan Produk Cair

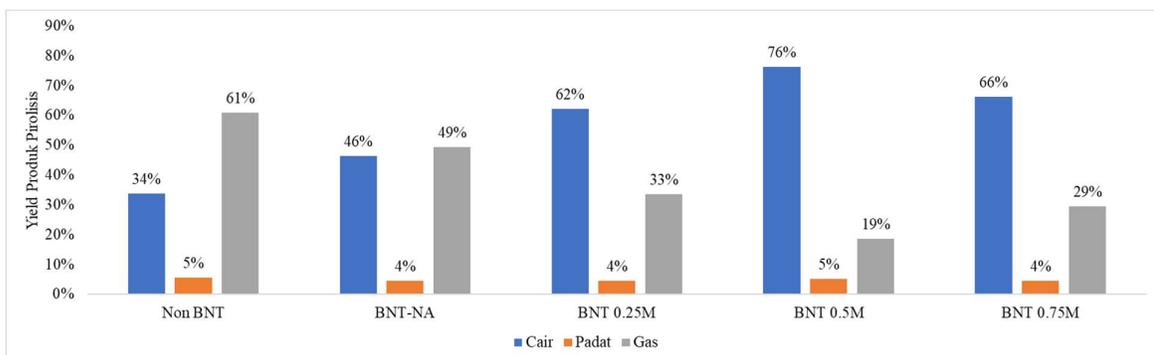
Berdasarkan hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa produk cair pirolisis akan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pirolisis. Hal tersebut dapat terjadi karena semakin lama waktu pirolisis maka kontak antara panas dan bahan baku didalam reaktor akan semakin merata dan menyebabkan bertambahnya senyawa yang dapat terdegradasi. Prosesnya melibatkan perengkahan hidrokarbon rantai panjang menjadi molekul yang lebih kecil atau hidrokarbon rantai pendek. Plastik akan meleleh dan berubah fasa menjadi cair yang kemudian dipanaskan hingga membentuk gas, selanjutnya mengalami pendinginan dan terkondensasi sehingga membentuk cairan pirolisis (Anggono, dkk, 2020). Pengaruh waktu terhadap pembentukan produk cair pada penelitian yang dilakukan oleh Arini (2022) terhadap pirolisis sampah polipropilen (PP) menunjukkan persen yield dengan waktu pirolisis 3 jam lebih tinggi dibandingkan waktu pirolisis 2 jam senilai 76%.

Berdasarkan Gambar 4.3 penambahan katalis berpengaruh terhadap waktu dan pembentukan produk cair. Penambahan katalis bentonit teraktivasi dapat mempercepat awal terbentuknya produk cair pirolisis dan meningkatkan *yield* produk cair pirolisis. Waktu pembentukan awal produk cair pada sampel BNT-0,75M terjadi saat waktu pirolisis menit-30 sedangkan sampel tanpa katalis (Non-BNT) terjadi saat menit ke-45. Hal tersebut menunjukkan bahwa katalis bentonit berpengaruh terhadap kecepatan pertama kali produk cair terbentuk. Selain itu, penambahan katalis bentonit dapat mempercepat peningkatan *yield* produk cair

pirolisis. Keberadaan katalis pada proses pirolisis berfungsi untuk mempercepat reaksi degradasi dan memperpendek rantai hidrokarbon. Hal tersebut dapat terjadi karena katalis dapat membantu dalam pembentukan radikal bebas yang terbentuk akibat terputusnya ikatan rantai karbon, sehingga memecahkan rantai hidrokarbon panjang menjadi rantai hidrokarbon yang lebih pendek (Pratiwi & Wiwiek, 2019). Keberadaan katalis dapat meningkatkan temperatur dan menurunkan waktu reaksi. Selain itu, katalis dapat memperbaiki kualitas dan kuantitas hasil pirolisis (Budsareechai, S. dkk, 2015). Situs aktif yang disediakan oleh katalis dapat membentuk panas (Effendi, dkk, 2021) sehingga molekul reaktan, dalam hal ini adalah rantai cabang polipropilena, akan mudah untuk terpecah menjadi bagian-bagian kecil yang kemudian akan menguap dan dikondensasikan menjadi produk cair. Penelitian mengenai pengaruh katalis terhadap waktu dan yield produk cair pirolisis sampah plastik polistiren (PS) yang dilakukan Trisnaliani, dkk (2020) menunjukkan penambahan katalis selama 1 jam dapat menghasilkan persentase yield sebesar 85,92%.

4.4 Pengaruh Konsentrasi HCl pada Aktivasi Bentonit terhadap Produk Pirolisis

Bentonit yang digunakan sebagai katalis diaktivasi menggunakan asam berupa HCl dengan konsentrasi asam yaitu 0,25 M; 0,50 M; serta 0,75 M. Kemudian dengan massa katalis sama, diperoleh produk pirolisis sebagai berikut.



Gambar 4.4 Pengaruh Konsentrasi HCl terhadap *Yield*

Bentonit yang teraktivasi HCl memberikan hasil produk cair yang lebih tinggi dibandingkan dengan pirolisis tanpa menggunakan katalis. Hal ini dapat terlihat

pada gambar 4.4 yang menunjukkan *yield* produk cair mencapai 76% pada BNT-0,5M. Peningkatan *yield* produk cair mencapai 100% dibandingkan dengan proses pirolisis tanpa katalis. Hal tersebut terjadi ketika kecepatan pembentukan produk pada BNT-0,5M lebih cepat, sedangkan katalis yang diaktivasi pada konsentrasi 0,25 M dan 0,75 M memiliki kecepatan pembentukan produk sama pada proses pirolisis. Dengan adanya aktivasi menggunakan asam, bentonit berpengaruh terhadap peningkatan produk cair, serta menurunkan produk gas dan padat, karena terbukanya struktur pori dari katalis alam bentonit. Hasil produk cair tertinggi pirolisis terdapat pada sampel BNT-0,50M yang menunjukkan bahwa terbukanya struktur pori dari katalis bentonit. Dengan terbukanya struktur pori dari katalis dapat meningkatkan luas permukaan yang mengikat senyawa *volatile*, kemudian senyawa *volatile* ini dapat terkondensasikan menjadi produk cair. Pada penelitian ini dapat terlihat bahwa katalis bentonit berperan dalam menurunkan produk gas (senyawa *volatile*) serta meningkatkan produk cair. Pengikatan senyawa *volatile* terbaik pada penelitian ini terdapat pada bentonit teraktivasi HCl 0,5 M. Akan tetapi, konsentrasi asam yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *overactivation* atau deaktivasi pada katalis bentonit. Dapat terlihat pada BNT-0,75M bahwa produk cair pirolisis terjadi penurunan *yield* yang diakibatkan proses deaktivasi katalis tersebut.

Produk cair hasil pirolisis dalam penelitian ini dibandingkan dengan penelitian terdahulu pada pirolisis 100% PP tanpa adanya katalis yang dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

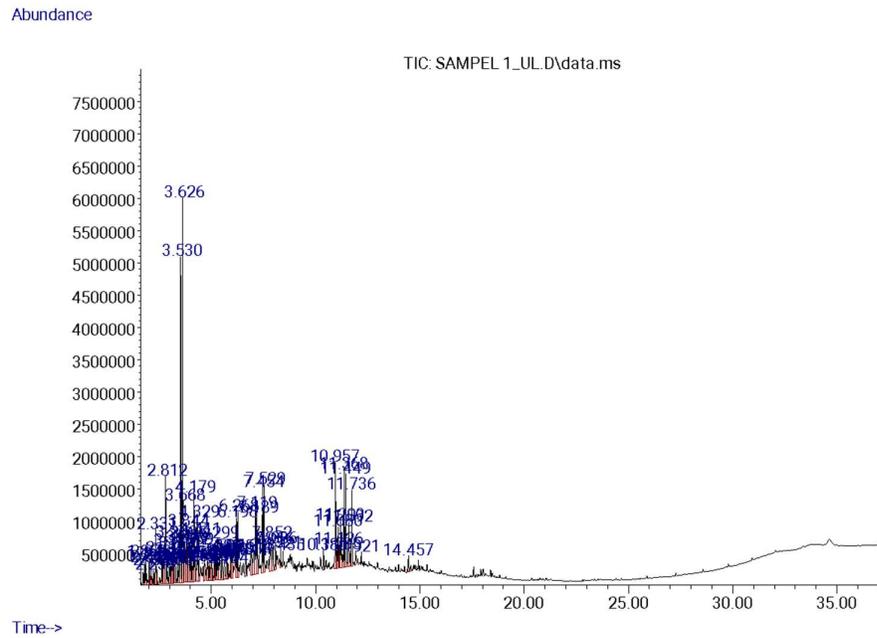
Tabel 4.4 Perbandingan Perolehan Produk Cair

Sampel	<i>yield</i>	Jahiding, dkk (2020)	Suhendi, dkk (2023)
Non BNT	34%		
BNT-NA	46%	16% (450°C)	63,51% (350°C)
BNT 0,25M	62%	64% (500°C)	
BNT 0,5M	76%	70% (550°C)	
BNT 0,75M	66%		

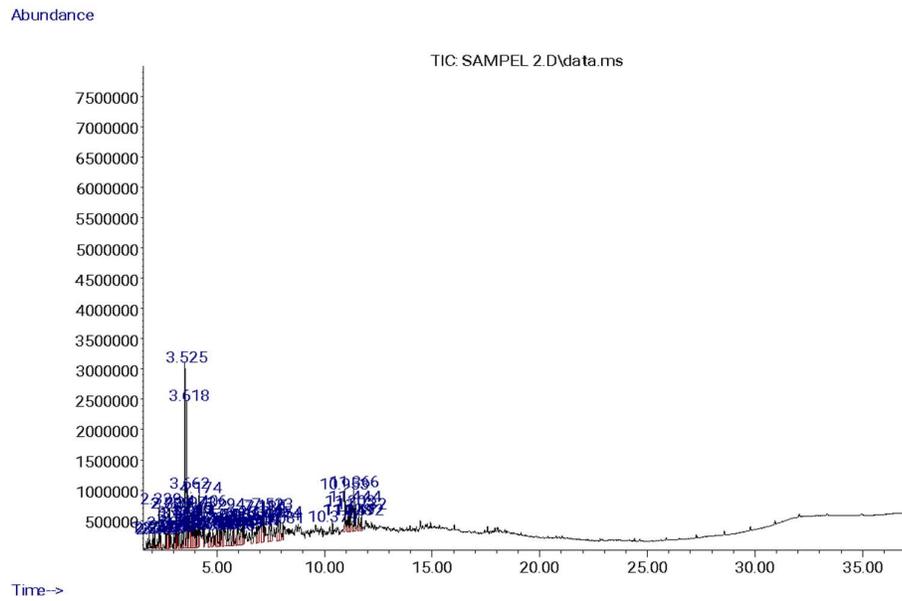
Jahiding, dkk (2020) melakukan penelitian pirolisis sampah plastik PP sebanyak 1 kg menggunakan variasi temperatur 450°C, 500°C, dan 550°C dengan laju pemanasan 15°C/menit. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *yield* pada suhu terendahnya kurang dari setengah hasil produk cair di penelitian ini. Selain itu, *yield* pada BNT-0,5M masih unggul dibandingkan dengan penelitian Jahiding, (2020) pada temperatur 550°C, artinya penelitian dengan menggunakan bentonit sebagai katalis dapat mengurangi energi yang dibutuhkan saat proses pirolisis. Hal tersebut terjadi karena semakin tingginya temperatur pirolisis, mengakibatkan jumlah energi yang dibutuhkan semakin banyak (Suhendi, dkk, 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Suhendi, dkk (2023) pada 100% PP tanpa katalis, waktu pirolisis 9 jam dan temperatur 350°C menghasilkan *yield* sebesar 63,51%. Hasil tersebut menunjukkan persentase lebih tinggi dibandingkan penelitian tanpa menggunakan katalis bentonit. Perbedaan temperatur pirolisis dapat mempengaruhi proses proses perengkahan dari plastik, yang menunjukkan semakin tinggi temperatur maka proses perengkahan semakin cepat. Selain itu, waktu pirolisis berpengaruh terhadap waktu perengkahan menjadi maksimal yang ditunjukkan oleh meningkatnya produk cair. Wicaksono dan Arijanto (2017) menjelaskan bahwa dengan bertambahnya temperatur pirolisis dapat mempermudah pemecahan rantai penyusun polimer dalam plastik, sehingga *yield* yang dihasilkan semakin banyak.

4.5 Karakteristik Produk Cair Pirolisis

Produk hasil pirolisis yang diperoleh dilakukan uji GC-MS, densitas, serta nilai kalor. Identifikasi senyawa menggunakan GC-MS digunakan untuk mengetahui komponen atau senyawa yang terkandung di dalam produk cair. Berikut adalah kromatogram dari sampel pirolisis plastik propilena menggunakan bentonit tanpa aktivasi (BNT-NA) dan bentonit teraktivasi HCl 0,50 M (BNT-0,50M).



(a) Sampel 1 (BNT-NA)



(b) Sampel 2 (BNT-0,5M)

Gambar 4.5 GC-MS Produk Cair Pirolisis (a) BNT-NA (b) BNT-0,5M

Degradasi termal plastik polipropilen menghasilkan sejumlah rantai hidrokarbon (Panda, 2018) karena proses pembuatan PP dihasilkan dari penyulingan minyak bumi dan memiliki struktur kimia $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ (Azis dan Rante, 2021). Berdasarkan kromatogram dari Gambar 4.5 memiliki sumbu x adalah

retention time (waktu retensi) dan sumbu *y* adalah *abundance* (kelimpahan senyawa). *Retention time* merupakan waktu yang dibutuhkan suatu zat dari kolom kromatografi gas agar terdeteksi oleh *detector*, artinya semakin cepat waktu retensi maka waktu analisa yang dibutuhkan semakin cepat. Sampel 1 (BNT-NA) memiliki waktu retensi keseluruhan 1,797-14,457 sedangkan sampel 2 memiliki waktu retensi keseluruhan 1,857-11,732 yang menunjukkan sampel 2 memiliki kecepatan analisa lebih baik dibandingkan sampel 1. Kemudian sampel BNT-NA memiliki jumlah *peak* (puncak senyawa terdeteksi) sebanyak 76, sedangkan sampel BNT-0,50M mendeteksi 65 *peak* dengan banyak menghasilkan *olefin* dibandingkan gugus alkana (rantai tunggal). Hal tersebut terjadi karena senyawa hidrokarbon yang terbentuk saat ada penggunaan katalis bentonit memiliki stabilitas tinggi pada rantai karbon rangkap dua (C=C). Kalsium bentonit yang berperan sebagai katalis mempunyai jumlah situs asam dan luas permukaan yang besar, sehingga saat proses degradasi polipropilen pada permukaannya diketahui berlangsung melalui mekanisme ion karbenium, baik melalui abstraksi ion hidrida atau penambahan proton pada ikatan C-C molekul polimer atau olefin yang terdegradasi secara termal (Panda, 2018).

Hasil analisa puncak tertinggi pada sampel 1 menunjukkan senyawa 2,4-Dimethyl-1-heptene yang memiliki area sebesar 8,21% dengan waktu retensi selama 3,626; sedangkan sampel 2 menunjukkan penurunan presentase area menjadi 4,89% dengan waktu retensi selama 3,618. Penelitian yang dilakukan oleh Azis dan Rante (2021) pada plastik 100% PP menunjukkan senyawa 2,4-Dimethyl-1-heptene memiliki presentase area 29,91%, artinya 3 kali lebih banyak dibandingkan penelitian ini. Senyawa 2,4-Dimethyl-1-heptene diketahui sebagai salah satu senyawa yang terkandung di dalam *gasoline*. Selain itu, senyawa lain yang dideteksi sebagai bahan bakar sampel pada BNT-0,50M ditunjukkan oleh Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Analisis Senyawa Bahan Bakar Sampel BNT-0,50M

Pk	RT	%Area	Compound	Molecular Formula
2	2,047	0,46	4,4-Dimethyl-2-pentene	C ₇ H ₁₄
8	2,732	1,27	4-Methyl-2-heptene	C ₈ H ₁₆

13	3,124	1,57	Ethylcyclohexane	C ₈ H ₁₆
16	3,376	0,66	2,3,5-trimethylhexane	C ₉ H ₂₀
19	3,618	4,89	1,4-Dimethyl-1-heptene	C ₉ H ₁₈
20	3,662	2,13	1,2,3-Trimethylcyclohexane	C ₉ H ₁₈
43	6,002	1,77	1,2,3-Trimethylbenzene	C ₉ H ₁₂

Keterangan tabel:

Pk = *Peak*

RT = *Retention time*

Produk cair hasil pirolisis dianalisa densitas yang dibandingkan dengan standar bahan bakar konvensional (*gasoline*) dan penelitian yang dilakukan sebelumnya. Berikut adalah tabel hasil analisa densitas dengan standar tes berdasarkan ASTM D-1298.

Tabel 4.6 Densitas Produk Cair

Sampel	Densitas (g/ml)	Jahiding, dkk (2020)	Suhendi, dkk (2023)	SNI Gasoline (g/ml)
Non-BNT	0,7524	0,750 g/ml	0,770 g/ml	0,715-0,770 g/ml
BNT-NA	0,7452			
BNT-0,25M	0,7592			
BNT-0,5M	0,762			
BNT-0,75M	0,7556			

Dalam penelitian ini, analisa densitas produk cair diperoleh data bahwa densitas keseluruhan berkisar 0,7452-0,7620 g/ml. Hasil densitas pada setiap sampel terlihat tidak ada kenaikan dan penurunan secara signifikan dengan penggunaan atau tidaknya penggunaan katalis. Densitas hasil penelitian kemudian dibandingkan dengan standar bahan bakar konvensional, termasuk *gasoline* (0,715-0,770 g/ml), *diesel oil 1* (0,90 g/ml), *diesel oil 2* (0,920 g/ml), dan *kerosene* (0,835 g/ml). Hasilnya diperoleh bahwa densitas semua produk cair termasuk ke dalam kategori SNI *gasoline* yang dikeluarkan oleh Departemen ESDM 2018. Penelitian serupa tentang pirolisis 100% PP tanpa katalis yang dilakukan oleh Jahiding, dkk

(2020) dan Suhendi, dkk (2023) juga diperoleh densitas yang memenuhi standar *gasoline*. Densitas merupakan massa produk cair yang dihasilkan per volume dari produk cair (Wajdi, dkk, 2020). Pengujian densitas pirolisis diperlukan untuk menjaga kualitas dari bahan bakar yang dihasilkan (Aridansyah, dkk, 2021), yaitu dapat mengetahui efisiensi energi dan performa mesin.

Nilai kalor penelitian ini diuji menggunakan standar test ASTM E1269 yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Nilai Kalor Produk Cair

Sampel	Nilai Kalor (kal/g)	BBM Konvensional (ESDM 2008)	Jahiding, dkk (2020)	Harlivia dan Tahdid (2022)
BNT-NA	45,0877	10007,17 kal/g	11317 kal/g	11086,1 kal/g.
BNT-0,5M	6806,48			

Nilai kalor merupakan besaran energi berupa panas yang dibebaskan bahan bakar saat proses pembakaran dengan jumlah tertentu (Nabawiyah dan Abtokhi, 2010). Semakin besar nilai kalor yang dihasilkan, maka jumlah konsumsi bahan bakar cair semakin sedikit (Tazi dan Sulistiana, 2011). Berdasarkan Tabel 4.7, nilai kalor pada penelitian ini memiliki peningkatan lebih dari 150 kali pada BNT 0,5M dari BNT-NA. Dengan adanya analisa nilai kalor menunjukkan bahwa aktivasi katalis bentonit memiliki kemampuan meningkatkan nilai kalor produk cair pirolisis polipropilena. Dalam hal ini, kemampuan produk cair pirolisis saat digunakan sebagai bahan bakar memiliki jumlah konsumsi energi sampel BNT-0,5M lebih sedikit dibandingkan dengan sampel BNT-NA. Berdasarkan standar yang diterbitkan oleh Departemen ESDM tahun 2008, nilai kalor BBM konvensional minimal sebesar 41,87 MJ/kg (1007,17 kal/g) yang menunjukkan bahwa pada penelitian ini tidak memenuhi standar yang sudah ditetapkan. Hasil analisa nilai kalor jika dibandingkan dengan penelitian pirolisis 100% PP tanpa katalis yang dilakukan oleh Jahiding (2020) pada temperatur 450°C menghasilkan nilai kalor sebesar 11317 kal/g, serta penelitian serupa yang dilakukan oleh Harlivia

dan Tahdid (2022) pada temperatur 300°C menghasilkan nilai kalor sebesar 11086,1 kal/g. Kedua nilai kalor tersebut sesuai dengan standar yang diterbitkan oleh Departemen ESDM tahun 2008 tentang standar nilai kalor BBM Konvensional.