

Review Pengaruh Konsentrasi dan Sifat Permukaan Dikorelasikan dengan Rasio Si/Al Katalis Silika-Alumina dalam *Cracking* Sampah Plastik *Polypropylene* untuk Produksi Bahan Bakar Cair

Alif Hafizh Prakoso, Hosta Ardhyanta, dan Azzah Dyah Pramata
Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konsentrasi dan sifat permukaan yang dikorelasikan dengan rasio Si/Al katalis silika-alumina dalam *cracking* sampah plastik *polypropylene* untuk produksi bahan bakar cair. Penelitian ini menggunakan komparasi beberapa telaah jurnal dengan metode *literature review* berdasarkan penelitian eksperimental yang selanjutnya didesain menjadi penelitian *cross-sectional*. Dari penelitian ini, ditemukan bahwa konsentrasi dan sifat permukaan katalis pada *cracking* sangatlah penting. Konsentrasi yang sedikit (berdasarkan nilai modus dan rata-rata optimum sebesar 10% wt dan 6,42% wt) dan sifat permukaan berupa area permukaan dan ukuran pori yang bernilai tinggi dirasa efektif (berdasarkan nilai rata-rata optimum sebesar 394 m²·g⁻¹ dan 0,94 cm³·g⁻¹). Jika dikorelasikan dengan rasio Si/Al, konsentrasi yang sedikit mampu menghasilkan jumlah relatif Si/Al yang sedang (35/65) untuk produksi *liquid* yang efektif. Terkait dengan sifat permukaan, semakin tinggi rasio Si/Al pada katalis maka akan meningkatkan luas area permukaan dari katalis sehingga dapat meningkatkan produksi bahan bakar cair.

Kata Kunci—Katalis Silika-Alumina, Konsentrasi, *Polypropylene*, Rasio Si/Al, Sifat Permukaan.

I. PENDAHULUAN

ISTILAH plastik digunakan untuk menggambarkan polimer yang ditambahkan dengan zat aditif untuk membantu proses manufaktur dan/atau untuk memberikan properti dan aplikasi tertentu [1]. Material ini memberikan kontribusi mendasar bagi masyarakat karena fleksibilitas dan biayanya yang relatif rendah. Akibatnya, jumlah sampah plastik yang dihasilkan terus meningkat [2]. Plastik tidak dapat terurai secara *biodegradable*, sehingga pembakaran dan *landfilling* dapat berkontribusi pada masalah kesehatan bagi kehidupan manusia maupun liar. Setengah dari keseluruhan produksi plastik terdiri dari poliolefin yaitu polietilena kepadatan tinggi (HDPE), polietilena kepadatan rendah (LDPE) dan polipropilena (PP) [3].

Oleh karena itu, *cracking* telah menjadi salah satu teknologi yang menjanjikan untuk menghasilkan bahan bakar hidrokarbon dan untuk mengatasi masalah lingkungan akibat sampah plastik [3]. *Thermal cracking* dan *catalytic cracking* adalah dua jenis proses untuk mengolah limbah plastik. Kehadiran katalis dalam pirolisis mengurangi suhu reaksi, waktu tahanan dan konsumsi energi, kemudian meningkatkan reaksi dekomposisi, selektivitas dan kualitas produk [4].

Pirolisis sampah plastik telah diselidiki oleh banyak peneliti yang menemukan bahwa *wax* dan gas adalah produk utama dalam *thermal cracking*. Sehingga, untuk mengatasi berbagai masalah dari *thermal cracking*, penggunaan berbagai katalis telah diaplikasikan dalam *catalytic cracking* limbah polimer. Katalis yang paling umum digunakan tersebut yaitu asam padat silika-alumina [4].

Tujuan khusus dari *literature review* ini yaitu untuk mempelajari lebih lanjut terkait katalis yang nantinya diaplikasikan untuk pengembangan riset pada bidang energi dan lingkungan untuk mengatasi beberapa masalah seperti *yield liquid* yang rendah pada *cracking* sampah plastik yang sampai saat ini masih terus dikembangkan di Laboratorium Inovasi Material Departemen Teknik Material FTIRS-ITS.

II. METODE PENELITIAN

A. Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan komparasi beberapa telaah jurnal dengan metode *literature review* berdasarkan beberapa penelitian yang bersifat analisis eksperimental yang nantinya didesain menjadi penelitian *cross-sectional*. *Literature review* ini dianalisis secara analitik, deskriptif dan naratif dari kurva-kurva dan tabel hasil eksperimen beberapa jurnal.

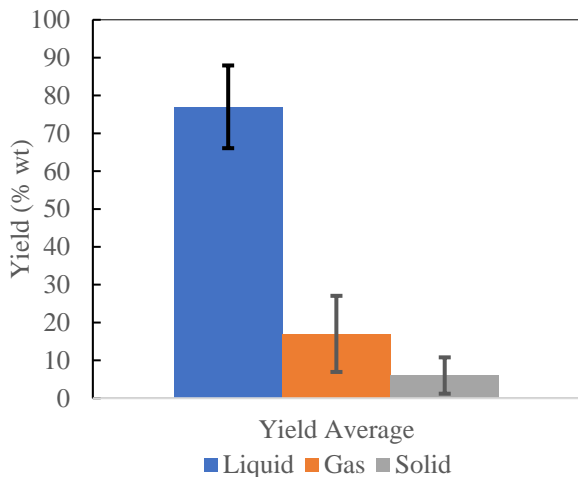
B. Sumber Penelitian

Sumber penelitian berasal dari literatur yang diperoleh dari publikasi jurnal hasil penelitian di beberapa negara. Referensi diakses dari penerbit jurnal yang bereputasi, *reliable*, dan terakreditasi. Adapun jurnal yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Science Direct atau penerbit jurnal internasional lainnya di kelas yang sebanding dengan penggunaan kata kunci *catalyst*, *cracking*, dan *polypropylene*. Semua literatur yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jurnal yang terindeks Scopus dan Scimago.

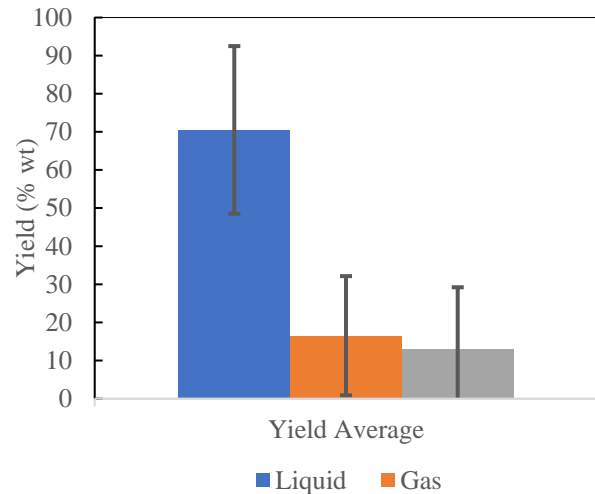
C. Jenis dan Kriteria Data

Adapun jenis data yang digunakan pada *literature review* ini yaitu data primer berupa jurnal. Berikut adalah kriteria inklusi data yang digunakan:

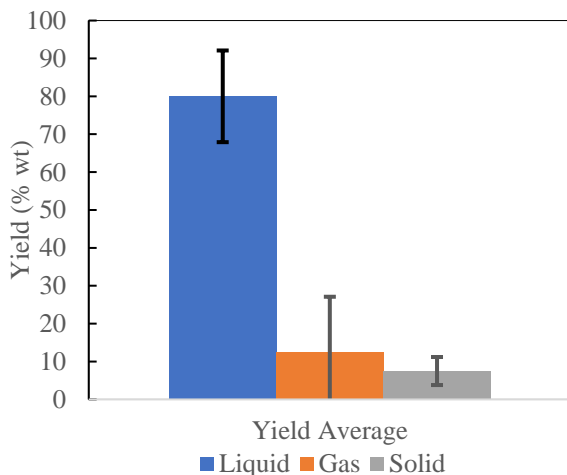
1. Penelitian yang meneliti pengaruh *cracking* menggunakan katalis silika-alumina terhadap *yield* bahan bakar.
2. Penelitian pada tahun 2015-2021.
3. Penelitian yang menggunakan katalis silika-alumina.



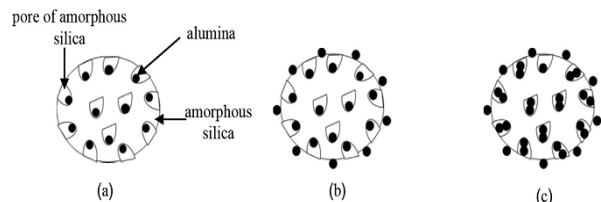
Gambar 1. Distribusi *yield* (%) dari *cracking* PP atau campuran PP menggunakan katalis dengan konsentrasi *average* 5,7% wt pada temperatur *average* 391°C dengan waktu tahan *average* 36,5 menit.



Gambar 3. Distribusi *yield* (%) dari *cracking* PP atau campuran PP menggunakan katalis dengan BET *surface area* dan volume pori *average* sebesar 383,75 m²g⁻¹ dan 0,58 cm³g⁻¹ pada temperatur *average* 370°C selama 30 menit.



Gambar 2. Distribusi *yield* (%) dari *cracking* PP atau campuran PP menggunakan katalis 10% wt dengan rasio Si/Al *average* 50/50 pada temperatur *average* 365°C selama 30 menit.



Gambar 4. Area permukaan dari silika amorf: (a) Al-Si/20-80 dan Al-Si/40-60; (b) Al-Si/60-40; (c) Al-Si/80-20.

4. Penelitian yang berdasarkan indeks Scopus dan Scimago tergolong dalam Q1.
5. Penelitian yang menggunakan *feed* berupa *polypropylene* atau campuran *polypropylene* dengan sampah jenis lain.
6. Penelitian yang hasil produksi bahan bakar cair atau *yield liquidnya*-nya mempunyai *average* 50-100% wt.

D. Pengolahan Data

Data yang telah terkumpul dikelola menggunakan *preferred reporting items for systemic review and meta-analysis* (PRISMA). Seluruh jurnal yang terkumpul dilakukan *identification, screening, eligibility,* dan *include* untuk menginklusi dan mengeksklusi artikel yang didapatkan. Dengan rincian sebagai berikut:

1. Total jurnal yang diidentifikasi lebih dari 200 jurnal.
2. Proses seleksi jurnal melibatkan lebih dari 200 jurnal.
3. Dokumen yang memenuhi syarat inklusi sebanyak 6 jurnal dan yang tidak memenuhi yaitu lebih dari 194 jurnal.
4. Artikel disimpan untuk selanjutnya dianalisis yaitu sebanyak 6 jurnal.

E. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dari *literature review* ini ditabulasikan dalam Tabel 1.

III. HASIL PENELITIAN

A. Pengaruh Konsentrasi Katalis Terhadap Distribusi Yield

Konsentrasi katalis sangat mempengaruhi hasil cairan dan gas pada proses *cracking*. *Cracking polypropylene* dengan berbagai variasi katalis dan konsentrasi telah menjadi minat peneliti dalam beberapa tahun terakhir. Meskipun katalis yang digunakan hingga saat ini sudah melakukan kerjanya dengan baik. Namun tetapi, distribusi hasil produk *cracking* masih menunjukkan hasil yang berubah-ubah [1].

Salah satu faktor yang memengaruhi hasil distribusi tersebut yaitu konsentrasi yang pastinya berkaitan dengan keasaman. Sifat keasaman ini merupakan salah satu kunci dalam proses *cracking* karena dengan nilai keasaman atau konsentrasi yang berbeda juga bisa menyebabkan distribusi *yield* yang bervariasi pula [1-6]. Tabel 2 dan Gambar 1 merupakan hasil ekstraksi dari literatur yang sudah dianalisis.

Berdasarkan data kompilasi, dapat diamati bahwa *liquid yield* rata-rata sebesar 77 wt% ± 10,93, *gas yield* rata-rata sebesar 17 wt% ± 10,06, *solid yield* rata-rata sebesar 6% wt ± 4,8. Hal ini berarti bahwa katalis-katalis yang sedang dipelajari dalam *literature review* ini menunjukkan aktivitas *catalytic* yang sangat baik khususnya untuk target saat ini yaitu produksi bahan bakar cair. Konsentrasi katalis yang

Tabel 1.
Ruang lingkup penelitian

Konsentrasi Katalis	Rasio Si/Al	Sifat Permukaan Katalis
✓		
✓		✓
✓		
✓		
✓	✓	✓
✓	✓	✓

Tabel 2.
Kompilasi distribusi *yield* (%) dari *cracking* PP atau campuran PP menggunakan katalis dengan konsentrasi yang bervariasi pada temperatur *average* 391°C dan waktu tahan *average* 36,5 menit

Catalyst	Catalyst Conc. (% wt)	Liquid (% wt)	Gas (% wt)	Solid (% wt)
Plain-WBKD	0	69,82	28,84	1,34
	0,5	70,27	20,21	9,52
	1	75,68	17,65	6,67
	2,5	66,35	21,85	11,81
	5	64,66	23,73	11,61
	10	56,3	29,45	14,25
Fe ₂ O ₃ -WBKD	0	69,82	28,84	1,34
	0,5	89,22	9,95	0,83
	1	91,01	8,8	0,1
	2,5	96,7	3,03	0,26
	5	78,02	18,01	3,97
	10	73,53	19,61	6,68
BHZSM-5	5	88	11,7	0,3
USY	5	70	26	4
LUSY	5	70	15	15
BUSY	5	66	29	5
USY	10	80	18	2
USY	0	85,5	14,5	0
	10	82	16,8	1,2
Na-Al-SBA-15 (30)	10	62,4	30,2	7,4
H-Al-SBA-15 (30)	10	73	24	3
H-Al-SBA-15 (60)	10	68	29,4	2,6
Cogon Grass Al-Si/20-80	10	86,67	0,65	12,46
Cogon Grass Al-Si/40-60	10	88,89	1,42	10,67
Cogon Grass Al-Si/60-40	10	93,11	0,36	9,27
Cogon Grass Al-Si/80-20	10	89	0,69	6,53

optimum berdasarkan nilai modus yaitu 10% wt dan nilai rata-rata optimum yaitu 6,4% wt.

Katalis yang dipelajari telah mengurangi produk *char*/residu yang menunjukkan aktivitas katalis dalam mengkonversi PP menjadi bahan bakar cair yang cukup baik. Hasil *liquid yield* yang tinggi dapat diartikan bahwa katalis yang memiliki keasaman sedang mungkin telah membantu dalam proses *cracking* mulai dari proses inisiasi, β -*scission*, H-transfer, reaksi *cyclization* dan aromatisasi [1].

Mengenai kandungan aromatik dan non aromatik, cairan hasil *catalytic cracking* memiliki sifat yang sangat aromatik. Hal ini tampaknya cukup mengejutkan karena sampel plastik yang digunakan terdiri dari polyolefin. Namun, ada bukti dalam literatur bahwa kandungan aromatik yang tinggi dapat diperoleh dalam *cracking* poliolefin, meskipun tidak ada kesepakatan tentang mekanisme pembentukan aromatik. Dua rute telah disarankan. Reaksi Diels–Alder diikuti oleh *dehydrogenation* dan reaksi siklonik unimolekuler diikuti oleh *dehydrogenation* yang oleh beberapa penulis disebut "pyrosynthesis" [7]. Seperti yang diketahui, semua senyawa dengan nomor atom karbon lebih besar dari C₁₀ adalah senyawa aromatik, oleh karena itu semua senyawa non aromatik terkandung dalam senyawa fraksi C₅–C₉, dan lebih khusus lagi mereka adalah olefin bercabang. Dengan

mempertimbangkan sifat sampel yang digunakan (terutama terdiri dari poliolefin) dan reaksi *cracking* membutuhkan sejumlah besar hidrogen yang tersedia untuk membentuk senyawa stabil, mekanisme reaksi global berikut dapat disarankan: (1) *cracking* polimer untuk menghasilkan olefin dan olefinic radikal dan (2) pembentukan aromatik dari struktur olefinik, baik radikal atau struktur yang stabil, karena senyawa olefinik yang stabil dapat bereaksi lebih lanjut dan membentuk aromatik jika kondisi *cracking* menguntungkan yaitu pada suhu tinggi dan waktu tinggal yang lama [8]. Karena kompleksitas reaksi dan produk yang terlibat, penjelasan untuk membenarkan mekanisme ini terus dikembangkan. Harus diingat bahwa ada kesulitan besar dalam membahas mekanisme reaksi *cracking* polimer, terutama ketika sistem yang kompleks, bahkan dengan adanya katalis dan proses *multistep*. Di satu sisi, ketika katalis digunakan dalam proses pirolisis, dua jenis mekanisme dekomposisi yang luas terjadi secara bersamaan: *thermal cracking*, yang pada gilirannya dapat mengikuti mekanisme yang berbeda (*random chain scission*, *end-chain scission* dan/atau eliminasi gugus samping), dan *catalytic cracking* (adsorpsi ion karbenium di permukaan katalis, *beta scissions* dan desorpsi). Akibatnya berbagai macam produk dihasilkan, yang pada gilirannya akan bereaksi satu sama lain,

Tabel 3.

Kompilasi distribusi *yield* (%) dari *cracking* PP atau campuran PP menggunakan katalis 10% wt dengan rasio Si/Al yang bervariasi pada temperatur *average* 365°C selama 30 menit

Catalyst	Si/Al Ratio	Liquid (% wt)	Gas (% wt)	Solid (% wt)
Na-Al-SBA-15 (30)	30/70	62,4	30,2	7,4
H-Al-SBA-15 (30)	60/40	73	24	3
H-Al-SBA-15 (60)	60/40	68	29,4	2,6
Cogon Grass Al-Si/20-80	20/80	86,67	0,65	12,46
Cogon Grass Al-Si/40-60	40/60	88,89	1,42	10,67
Cogon Grass Al-Si/60-40	60/40	93,11	0,36	9,27
Cogon Grass Al-Si/80-20	80/20	89	0,69	6,53

Tabel 1.

Kompilasi distribusi *yield* (%) dari *cracking* PP atau campuran PP menggunakan katalis dengan BET *surface area* dan volume pori yang bervariasi pada temperatur *average* 370°C selama 30 menit

Catalyst	BET Surface Area (m ² g ⁻¹)	Pore Volume (cm ³ g ⁻¹)	Liquid (% wt)	Gas (% wt)	Solid (% wt)
HZSM-5	369	0,11	17	45	38
BHZSM-5	410	1,16	88	11,7	0,3
LHZSM-5	692	0,7	46	1	54
USY	503	0,05	70	26	4
BUSY	580	0,1	66	29	5
Na-Al-SBA-15 (30)	431	0,92	62,4	30,2	7,4
H-Al-SBA-15 (60)	571	0,92	73	24	3
H-Al-SBA-15 (30)	441	0,92	68	29,4	2,6
Cogon Grass Al-Si/20-80	102	0,3	86,67	0,65	12,46
Cogon Grass Al-Si/40-60	143	0,47	88,89	1,42	10,67
Cogon Grass Al-Si/60-40	200	0,72	93,11	0,36	9,27
Cogon Grass Al-Si/80-20	163	0,58	89	1,69	8,41

menghasilkan sejumlah besar mekanisme reaksi yang memungkinkan [7].

Catalytic cracking pada PP yang memproduksi *liquid* tinggi juga dapat dikaitkan dengan waktu tahan. Molekul yang mengalami *cracking* secara singkat di pori-pori katalis bisa menyebabkan terhambatnya proses *cracking* yang berlebih [3]. Sehubungan dengan *yield liquid*, penambahan Na⁺ dan H⁺ pada katalis juga memberikan proporsi cairan tinggi. Hal ini disebabkan oleh efek kedua ion tersebut dalam katalis, dimana ion Na⁺ mengurangi keasaman dalam struktur katalis sehingga menghasilkan kinerja katalis yang kurang efektif dibandingkan dengan H⁺ walaupun dengan struktur yang sama [5].

Peningkatan produksi gas untuk *catalytic cracking* PP disebabkan oleh fakta bahwa komponen yang lebih berat diubah menjadi komponen gas melalui reaksi *cracking* sekunder [4]. Peningkatan hasil juga dapat dikaitkan dengan peningkatan konsentrasi katalis yang dihubungkan dengan penurunan hasil *liquid* yang mungkin disebabkan karena penambahan katalis yang berlebihan dapat mempercepat reaksi *cracking* untuk menghasilkan produk volatil yang *non-condensable* [1].

Hasil char yang rendah atau dapat diabaikan menunjukkan bahwa PP pada proses *cracking* telah diurai menjadi zat volatil yang *condensable* maupun *non-condensable* untuk pembentukan minyak cair dan gas. Char atau residu biasanya dihasilkan dari reaksi polimerisasi ulang sekunder [1]. Pembentukan kokas yang juga berkontribusi pada *yield solid* juga bisa disebabkan karena beberapa mekanisme seperti aromatisasi dan *dehydrogenation* pada permukaan katalis selama proses *cracking* [4].

Hasil penelitian Ahmad *et.al.* (2017) menyimpulkan bahwa konsentrasi katalis sangat mempengaruhi hasil cairan dan gas [1]. Penggunaan katalis dengan konsentrasi lebih

rendah untuk pembentukan minyak cair ditemukan lebih efektif. Katalis dengan rasio yang lebih rendah dapat menawarkan situs aktif yang lebih banyak di permukaan [1]. Disambung oleh Sangpatch *et.al.* (2019), konsentrasi katalis Al-Si 10 wt% menunjukkan sifat asam yang sedang untuk mempercepat reaksi [6].

Aktivitas *catalytic cracking* juga terkait dengan keasamannya. Berdasarkan penelitian dari Akpanudoh *et.al.* *liquid yield* meningkat sebanding dengan keasaman katalis dengan nilai keasaman maksimum sekitar 7%. Di atas nilai ini, hasil gas meningkat karena proses *cracking* yang berlebihan. Sementara di bawah nilai ini, polimer tidak sepenuhnya dikonversi karena kurangnya situs asam [3].

Berdasarkan dari jurnal Akpanudoh *et.al.* (2005), nilai keasaman atau yang bisa disebut dengan *acidity content* mempunyai rumus sebagai berikut [8]:

$$Acidity Content = \frac{Catalyst Content (\%) \times Catalyst Acidity (\%)}{Pure Catalyst Acidity (\%)}$$

Pure catalyst acidity bernilai 100% sesuai dengan kondisi bahwa pada sistem terdiri dari katalis murni dengan tidak adanya polimer didalam sistem. Contoh perhitungannya yaitu, terdapat katalis sebanyak 50% dan polimer sebanyak 50% dalam sistem dengan *surface acidity* atau *catalyst acidity* sebesar 36%, maka *acidity content* bernilai 17,9% [8].

B. Pengaruh Rasio Si/Al Terhadap Distribusi Yield

Rasio Si/Al pada katalis menjadi pertimbangan yang penting untuk pemilihan produksi *liquid* maupun gas [4]. Komposisi Si atau Al ini sangat berpengaruh terhadap keasaman katalis dan sifat permukaan katalis yang pastinya akan berpengaruh dalam proses *cracking* [2-6]. Maka dari itu, pada subbab ini akan dielaborasi data dan pembahasan terkait rasio Si/Al terhadap distribusi *yield* yang nantinya

akan dikorelasikan dengan konsentrasi dan sifat permukaan katalis (dibahas secara khusus pada point berikutnya). Data *cross-section* disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Berdasarkan data kompilasi, dapat diamati bahwa *liquid yield* rata-rata sebesar 80% wt \pm 12,1, *gas yield* rata-rata sebesar 12,5% wt \pm 14,6, *solid yield* rata-rata sebesar 7,5% wt \pm 3,7. Rasio Si/Al yang optimum berdasarkan rata-rata nilai optimum yaitu 35/65.

Pembentukan *char* disukai oleh zeolit dengan rasio Si/Al yang lebih tinggi yang memiliki situs asam terkuat [2]. Jika rasio Si/Al menurun, keasaman akan meningkat. Keasaman yang terlalu tinggi dapat menghasilkan produk kokas (pengendapan karbon pada permukaan katalis) yang dapat mengarah ke penonaktifan katalis [6]. Rasio Si/Al yang rendah membuat densitas situs asamnya lebih tinggi tetapi dengan kekuatan asam yang lebih rendah yang meningkatkan produksi fraksi yang lebih ringan seperti *liquid* dan gas [2].

Hal serupa juga diungkapkan oleh Kassargy *et. al.* (2017) bahwa rasio Si/Al yang rendah dapat meningkatkan jumlah situs asam, tetapi kekuatan asamnya relatif kurang jelas. Sedangkan, rasio Si/Al yang lebih tinggi dapat menurunkan secara drastis jumlah situs asam [4].

Oleh karena itu, rasio Si/Al yang dipilih untuk penggunaan katalis tampaknya menjadi pertimbangan yang penting untuk pemilihan produksi *liquid* maupun gas [4]. Dengan demikian, rasio Si/Al yang tepat untuk memperoleh keasaman sedang sangatlah diperlukan [6].

C. Pengaruh Sifat Permukaan Terhadap Distribusi Yield

Sifat permukaan katalis pada *literature review* ini dibatasi menjadi dua sifat, yaitu area permukaan dan volume pori. Kedua sifat ini merupakan fitur penting untuk memfasilitasi akses molekul plastik untuk menuju ke situs asam katalis sehingga dapat memulai aktivitas *cracking*. Namun tetapi, komposisi Si dan Al dari katalis juga perlu dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi sifat permukaan [2].

Secara umum, ukuran pori yang lebih besar dapat memberikan proporsi cairan yang lebih tinggi [5]. Hal ini juga berlaku pada area permukaan, area permukaan yang luas dapat memberikan produk *liquid* yang tinggi karena *cracking* yang lebih sering [6]. Selain kedua penjelasan tersebut, masih banyak penjelasan lain dari sifat permukaan katalis dan rasio Si/Al terhadap distribusi *yield* dan salah satunya ditampilkan dalam Tabel 4 dan Gambar 3.

Berdasarkan data kompilasi, dapat diamati bahwa *liquid yield* rata-rata sebesar 70,5 wt% \pm 22, *gas yield* rata-rata sebesar 16,5 wt% \pm 15,64 dan *solid yield* rata-rata sebesar 13% wt \pm 16,22. Lalu, rata-rata optimum dari BET *surface area* dan volume pori sebesar 394 m²g⁻¹ dan 0,94 cm³g⁻¹. Hal ini berarti bahwa katalis yang sedang dipelajari dalam *literature review* ini menunjukkan aktivitas *cracking* yang sangat baik terkait dengan pengaruh *surface area* dan ukuran pori untuk produksi bahan bakar cair.

Specific surface area dan volume pori merupakan fitur yang penting untuk memaksimalkan aktivitas *catalytic cracking* [2]. Ukuran pori yang lebih besar dapat memberikan proporsi cairan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas [5]. Produk *liquid* yang tinggi juga disebabkan oleh luasnya area permukaan spesifik yang menyebabkan lebih banyak *cracking* [6]. Selain peningkatan *surface area* dan volume pori, kehadiran jumlah situs asam yang tinggi dengan

keasaman rendah (terkait dengan rasio Si/Al yang lebih rendah) juga mendukung produksi fraksi yang lebih ringan (*liquid*+gas) [2]. Maka dari itu, area permukaan spesifik dan volume pori memainkan peran penting dalam *cracking*. Namun tetapi, komposisi Si/Al dari katalis juga perlu dipertimbangkan [2].

Korelasi yang baik antara volume pori dan jumlah fraksi cair diamati. Hal ini dikaitkan dengan fakta bahwa untuk volume pori yang lebih tinggi dapat memudahkan molekul besar-menengah untuk mengakses situs asam di dalam struktur pori sehingga dapat mendukung *cracking* yang akhirnya meningkatkan produksi *liquid*. Sehingga, untuk mendapatkan jumlah fraksi cair yang lebih tinggi zeolite dengan volume pori yang lebih tinggi lebih disukai. Sedangkan untuk produksi fraksi gas, zeolit dengan volume pori menengah memberikan hasil yang lebih baik [2].

Pengurangan silikon dari struktur katalis dapat meningkatkan kepadatan situs asam yang kekuatannya rendah. Fitur ini tampaknya mendukung pembentukan produk yang lebih ringan (C rendah) seperti hidrokarbon cair [2]. Semakin tinggi rasio SiO₂/Al₂O₃ pada katalis (kandungan Al dan keasaman yang lebih rendah) biasanya memiliki luas area permukaan yang lebih tinggi juga. Sehingga, meningkatnya rasio SiO₂/Al₂O₃ juga menyebabkan peningkatan tingkat konversi PP menjadi *liquid* dan gas yang disebabkan oleh *specific surface area* yang lebih luas. Maka dari itu, aktivitas katalis diketahui menurun dengan turunnya luas area permukaan [5].

Perilaku rasio Si/Al terhadap area permukaan pada katalis dapat dijelaskan pada penelitian Sangpatch *et. al.* (2019) [6]. Katalis Al-Si sintetis dari alang-alang dengan alumina 60% memperoleh luas area permukaan BET tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa luas area permukaan katalis Al-Si menurun ketika memuat alumina dengan 20 dan 40 wt% karena alumina diendapkan dan disimpan ke dalam pori-pori silika amorf (Gambar 4a). Namun, ketika rasio alumina meningkat menjadi 60 wt%, luas area permukaan silika amorf menjadi lebih tinggi karena difusi alumina ke dalam permukaan silika amorf yang meningkatkan luas area permukaan silika amorf (Gambar 4b). Ketika konsentrasi alumina meningkat menjadi 80 wt%, luas area permukaan silika amorf menurun, karena jumlah alumina yang didifusi, diendapkan, dan disimpan di pori-pori dan permukaan luar sangat tinggi sehingga mengurangi luas area permukaan silika amorf (Gambar 4c) [6].

IV. DISKUSI

Produksi *liquid* secara umum disebabkan oleh penguraian hidrokarbon menjadi hidrokarbon cair yang lebih ringan oleh bantuan katalis [4]. Produksi gas untuk *catalytic cracking* PP disebabkan oleh reaksi *cracking* sekunder atau akibat reaksi *cracking* yang berlebihan [1]. Produksi kokas atau *solid* disebabkan karena beberapa mekanisme seperti aromatisasi dan *dehydrogenation* pada permukaan katalis [4]. Hasil *char* yang rendah menunjukkan bahwa PP telah diurai menjadi zat volatil yang *condensable* dan *non-condensable* untuk pembentukan minyak cair dan gas yang berarti katalis-katalis pada studi ini menunjukkan aktivitas yang baik dalam mengkonversi PP menjadi minyak cair [1].

Berdasarkan penelitian Ahmad *et. al.* (2017) konsentrasi katalis sangat mempengaruhi hasil cairan dan gas [1]. Penggunaan katalis dengan konsentrasi lebih rendah untuk pembentukan minyak cair ditemukan lebih efektif karena dapat menawarkan situs aktif yang lebih banyak di permukaan. Peningkatan hasil gas dengan peningkatan konsentrasi katalis dapat dikaitkan dengan penurunan hasil *liquid* yang mungkin disebabkan karena penambahan katalis yang berlebihan [1]. Secara eksperimental berdasarkan penelitian Sangpatch *et.al.* (2019), konsentrasi katalis silika-alumina sebanyak 10 wt% menunjukkan sifat asam yang sedang untuk mempercepat reaksi [6].

Selain ditinjau dari konsentrasi, katalis pada *literature review* ini juga dipilih karena rasio Si/Al yang sedang. Berdasarkan penelitian Kassargy *et.al.* (2017) rasio Si/Al yang rendah dapat meningkatkan jumlah situs asam, tetapi kekuatan asamnya relatif kurang jelas [4]. Hal ini disambung oleh Sangpatch *et. al.* (2019) yang mengatakan bahwa jika rasio Si/Al menurun, keasaman akan meningkat dan jika dibiarkan terlalu tinggi, maka dapat menyebabkan produksi kokas (pengendapan karbon pada permukaan katalis) yang dapat mengarah ke penonaktifan katalis [6].

Kassargy *et.al.* (2017) juga berpendapat bahwa rasio Si/Al yang lebih tinggi dapat menurunkan secara drastis jumlah situs asam dan berkaitan dengan hal itu Almeida *et. al.* (2018) mengatakan bahwa pembentukan *char* disukai oleh katalis dengan rasio Si/Al yang lebih tinggi [2-4]. Oleh karena itu, pemilihan rasio Si/Al pada katalis dalam proses *cracking* merupakan salah satu kunci untuk meningkatkan produksi *liquid* [4].

Sehingga, dapat digarisbawahi bahwa pengaruh konsentrasi katalis pada *cracking* sangatlah penting. Konsentrasi yang sedikit dirasa cukup efektif untuk pembentukan bahan bakar cair. Nilai sedikit ini berdasarkan nilai modus yaitu 10% wt dan nilai rata-rata optimum yaitu 6,4% wt.

Jika dikorelasikan dengan rasio Si/Al, semakin tinggi konsentrasi katalis, maka akan meningkatkan jumlah relatif Si/Al dari katalis yang dapat menurunkan situs asam. Sehingga menyebabkan produksi *char* yang berlebih karena kurangnya asam untuk proses konversi melalui *cracking*. Semakin rendah konsentrasi katalis, maka akan menurunkan jumlah relatif Si/Al dari katalis yang dapat meningkatkan situs asam (tetapi kekuatan asamnya relatif kurang jelas). Sehingga dapat meningkatkan produk kokas dan gas karena *cracking* yang berlebihan. Maka dari itu, rasio Si/Al sedang sangat diperlukan dan rasio yang optimum untuk produksi bahan bakar cair berdasarkan rata-rata nilai optimum dari kompilasi data *literature review* ini yaitu 35/65.

Specific surface area dan volume pori merupakan fitur penting untuk memfasilitasi akses molekul plastik secara massal untuk menuju ke situs asam katalis sehingga dapat memulai aktivitas *catalytic cracking*. Almeida *et.al.* (2018) menyarankan produksi fraksi yang lebih ringan (*liquid+gas*) terkait dengan area permukaan spesifik dan ukuran pori yang lebih tinggi [2]. Pembentukan *char* disukai atas zeolit dengan rasio Si/Al yang lebih tinggi yang memiliki situs asam terkuat. Di sisi lain, rasio Si/Al yang lebih rendah yang memiliki *densitas* situs asam yang lebih tinggi walaupun kekuatannya lebih rendah tampaknya meningkatkan produksi fraksi yang lebih ringan [2].

Selain itu, volume pori yang tinggi menyebabkan molekul besar hingga sedang dapat lebih mudah mengakses situs asam di dalam struktur pori-pori katalis sehingga memudahkan *cracking* yang akibatnya meningkatkan produksi *liquid*. Maka dari itu, untuk mendapatkan jumlah fraksi cair yang lebih tinggi, katalis dengan volume pori yang lebih tinggi lebih disukai. Sedangkan untuk produksi fraksi gas, katalis dengan volume pori menengah memberikan hasil yang lebih baik [2].

Sehingga, dari pemaparan pembahasan dari berbagai jurnal tadi, dapat ditutup dengan pernyataan bahwa pengaruh *specific surface area* atau area permukaan spesifik dan ukuran pori sangatlah penting dalam proses *cracking*. Area spesifik dan ukuran pori yang bernilai tinggi dirasa cukup efektif karena dua sifat ini merupakan fitur penting untuk memfasilitasi akses molekul plastik untuk menuju ke situs asam dan memulai *cracking*. Jika situs tersebut mudah diakses maka akan terjadi *cracking* yang mudah sehingga dapat meningkatkan produksi *liquid*. Di sisi lain, untuk menargetkan fraksi gas bisa dengan pemilihan ukuran pori yang lebih kecil.

Hal ini juga berkaitan dengan rasio Si/Al, Semakin tinggi rasio Si/Al pada katalis (kandungan Si tinggi tapi Al dan keasamannya rendah) biasanya memiliki luas area permukaan yang lebih tinggi yang dapat meningkatkan tingkat konversi *cracking* secara keseluruhan. Tetapi, kenaikan rasio Si/Al juga dapat menyebabkan kenaikan produk *gas/solid* dan penurunan produk cair. Sedangkan, semakin rendah rasio Si/Al pada katalis dapat menyebabkan penurunan luas area permukaan sehingga akan menurunkan kemampuan *cracking* dari katalis yang dapat menurunkan tingkat konversi *cracking*.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa data, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Konsentrasi katalis pada *cracking* sangatlah penting. Konsentrasi sedikit efektif untuk pembentukan bahan bakar cair (nilai efektif berdasarkan modus dan rata-rata optimum yaitu 10% wt dan 6,42% wt). Jika dikorelasikan dengan rasio Si/Al maka semakin tinggi atau rendah konsentrasi katalis, jumlah relatif Si/Al juga akan terpengaruh. Hal ini dapat meningkatkan produksi *char*, kokas dan/atau gas. Sehingga konsentrasi katalis sedikit agar memperoleh jumlah relatif Si/Al sedang dari katalis sangat diperlukan dengan nilai rasio Si/Al optimum yaitu 35/65. (2) Area permukaan dan ukuran pori yang bernilai tinggi dirasa efektif (nilai efektif berdasarkan nilai rata-rata optimum yaitu $394 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ dan $0,94 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$). Kedua fitur ini digunakan untuk memfasilitasi akses molekul PP untuk memulai *cracking*. Hal ini juga dapat dikorelasikan dengan rasio Si/Al yaitu semakin tinggi atau rendah rasio Si/Al pada katalis, luas area permukaan dari katalis juga akan semakin tinggi atau rendah sehingga dapat mempengaruhi aktivitas *cracking*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., Ishaq, M., Khan, R., Gul, K., & Ahmad, W. 2017. Influence of waste brick kiln dust on pyrolytic conversion of polypropylene in to potential automotive fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126. Elsevier
- [2] Almeida, D., Santos, B. P. S., Marques, M. de F. v., & Henriques, C. A. 2018. Petrochemical feedstock from pyrolysis of waste polyethylene

- and polypropylene using different catalysts. *Fuel*, 215, 515–521. Elsevier
- [3] Kassargy, C., Awad, S., Burnens, G., Kahine, K., & Tazerout, M. 2018. Gasoline and diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite. *Fuel*, 224, 764–773. Elsevier
- [4] Kassargy, C., Awad, S., Burnens, G., Kahine, K., & Tazerout, M. 2017. Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127, 31–37. Elsevier
- [5] Jiraroj, D., Chaipurimat, A., Kerdsa, N., Hannongbua, S., & Tungasmita, D. N. 2016. Catalytic cracking of polypropylene using aluminosilicate catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 529–539. Elsevier
- [6] Sangpatch, T., Supakata, N., Kanokkantaong, V., & Jongsomjit, B. 2019. Fuel oil generated from the cogon grass-derived al–si (*Imperata cylindrica* (L.) Beauv) catalysed pyrolysis of waste plastics. *Heliyon*, 5(8). Elsevier
- [7] Lopez-Urionabarrenechea, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., & Adrados, A. 2012. Catalytic stepwise pyrolysis of packaging plastic waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 96, 54–62. Elsevier
- [8] Akpanudoh, N. S., Gobin, K., & Manos, G. 2005. Catalytic degradation of plastic waste to liquid fuel over commercial cracking catalysts: Effect of polymer to catalyst ratio/acidity content. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 235(1–2), 67–73. Elsevier