

LAPORAN PENELITIAN

PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK PP DAN PE MENGUNAKAN KATALIS FCC JENIS SPENT (*SPENT CAT*)



Disusun oleh :

JOAN ADHEISA NUARI (3335200018)

M. AKBAR DWIRAHARJA (3335200034)

JURUSAN TEKNIK KIMIA-FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA

CILEGON-BANTEN

2024

LEMBAR PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN
PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK PP DAN PE
MENGUNAKAN KATALIS FCC JENIS SPENT (*SPENT CAT*)

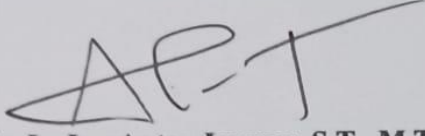
Disusun oleh:

JOAN ADHEISA NUARI	(3335200018)
M. AKBAR DWIRAHARJA	(3335200034)

Telah Disetujui Oleh Dosen Pembimbing dan Telah dipertahankan di hadapan Dewan Penguji

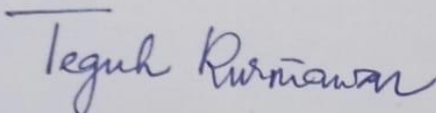
Pada tanggal 04 Oktober 2024

Dosen Pembimbing

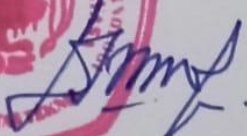


Prof. Dr. Ir. Ing Anton Irawan, S.T., M.T., ASEAN Eng.
NIP: 197510012008011007

Dosen Penguji I	Dosen Penguji I
------------------------	------------------------

 <u>Prof. Dr. Teguh Kurniawan, S. T.,</u> <u>M.T., PhD</u> NIP: 198305062006041002	 <u>Endang Suhendi, ST.,M. Eng.</u> NIP: 197707052003121001
---	---

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng.
NIP: 197510222005011002



PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

NAMA : M. Akbar Dwiraharja
Joan Adheisa Nuari

NIM : 3335200034
3335200018

JURUSAN : Teknik Kimia

JUDUL : Pirolisis Campuran Limbah Plastik PP dan PE Menggunakan Katalis FCC Jenis Spent (*Spent Cat*)

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian dengan judul tersebut adalah benar karya penulis sendiri dengan arahan dari dosen pembimbing dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiasi dalam penelitian ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Cilegon, 31 Januari 2025



M. Akbar Dwiraharja

NIM.3335200034



Joan Adheisa Nuari

NIM.3335200018

ABSTRAK

PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK PP DAN PE MENGGUNAKAN KATALIS FCC JENIS SPENT (*SPENT CAT*)

Oleh :

Joan Adheisa Nuari (3335200018)

M. Akbar Dwiraharja (3335200034)

Pirolisis merupakan salah satu metode dalam pengolahan sampah plastik yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar minyak. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui pengaruh rasio campuran plastik PP dan PE serta rasio katalis terhadap kualitas dan kuantitas produk minyak pirolisis. Setelah itu, produk minyak pirolisis yang dihasilkan dianalisa kelayakan keekonomiannya. Metode pirolisis pada penelitian ini dilakukan pada suhu 350°C selama 60 menit dengan variasi campuran plastik PP dan PE dalam 500 gram yaitu 1:1, 2:1, dan 3:1 serta memvariasikan rasio penambahan *spent catalyst FCC* sebanyak 5%, 10%, dan 15% wt terhadap campuran plastik PP dan PE. Produk minyak pirolisis dilakukan uji viskositas, densitas, dan GC-MS. Penelitian ini dilakukan di Gedung 5 Pertamina Technology Innovation (TI). Hasil yang didapatkan pada penelitian ini ialah pada variasi campuran plastik PP dan PE terbaik dengan menghasilkan banyak produk minyak pirolisis terdapat pada rasio 3:1 sebesar 81,56%wt sedangkan pada variasi rasio penambahan *spent catalyst FCC* dengan campuran plastik PP dan PE 3:1 kualitas produk minyak terbaik terdapat pada penambahan katalis 15%wt sedangkan kuantitas minyak terbanyak pada penambahan katalis 10%wt yaitu sebesar 81,56%wt. Nilai viskositas dan densitas berturut-turut yang didapatkan tidak jauh berbeda yaitu sebesar 1,27 – 1,31 cSt dan 0,769 – 0,770 g/cm³. Berdasarkan analisa ekonomi bahwa produk minyak pirolisis yang dihasilkan tidak ekonomis karena biaya operasional lebih mahal daripada harga jual produknya.

Kata Kunci : Pirolisis, Spent Catalyst FCC, PP, PE

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya kami dapat menyelesaikan Penelitian yang berjudul Pirolisis Campuran Plastik PP dan PE Menggunakan Katalis FCC Jenis Spent (*Spent Cat*). Laporan ini disusun sebagai syarat menyelesaikan salah satu mata kuliah di jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Kami menyadari keterbatasan pengetahuan, pengalaman dan kemampuan menulis, sehingga laporan ini tidak luput dari kekurangan. Oleh karena itu, penelitian laporan ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dalam kesempatan ini kami ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang ikut terlibat dalam setiap proses pembuatan tugas akhir ini sampai dengan selesai, yaitu :

1. Prof. Dr. Ir. H. Fatah Sulaiman, S.T., M.T. Selaku Rektor Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
2. Prof. Dr. Jayanudin, S.T., M.Eng. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
3. Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Program Studi Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Prof. Dr. Ir. Ing Anton Irawan, S.T., M.T., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan, memotivasi dan penuh kesabaran serta dukungan yang berlimpah hingga laporan ini terselesaikan.
5. Fuqan Aulia, M.Sc. dan Dwi Widianoro S.T Selaku pembimbing lapangan yang telah memberikan motivasi sebagai perbaikan diri, memberikan ilmu dan arahan serta bimbingannya semasa melakukan penelitian di Pertamina TI Pulogadung
6. Segenap dosen dan staff Program Studi Teknik Kimia Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah mendidik serta memberikan ilmunya kepada kami.

7. Rekan-rekan mahasiswa utamanya dari Program Studi Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas dukungan dan kerjasamanya selama menempuh pendidikan.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu memberikan pemikiran demi kelancaran dan keberhasilan penyusunan ini.

Semoga segala kebaikan yang dihadirkan dalam segala bentuk selalu dibalas oleh Allah SWT. Kami menyadari banyak sekali segala kekurangan dalam menyusun laporan penelitian karena keterbatasan pengetahuan, namun kami berharap laporan penelitian ini memiliki kebermanfaatan bagi semua pembaca.

Jakarta, 20 Agustus 2024

Penulis 1,



Joan Adheisa Nuari

NIM: 3335200018

Penulis 2,



M. Akbar Dwiraharja

NIM: 3335200034

DAFTAR ISI

LAPORAN PENELITIAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pirolisis.....	5
2.2 Jenis - Jenis Plastik.....	5
2.4 Pengaruh Katalis Pada Pirolisis Plastik.....	6
2.5 Mekanisme Pirolisis Katalitik	9
2.6 Spent Cat FCC.....	9
BAB III METODE PENELITIAN	11
3.1 Tahapan Penelitian.....	11
3.1.1 Preparasi bahan.....	11
3.1.2 Proses Pirolisis	11
3.1.3 Pengujian Densitas	12
3.1.4 Pengujian Viscositas	13
3.1.5 Pengujian GC-MS.....	15
3.2 Prosedur Penelitian.....	16
3.2.1 Preparasi Bahan.....	16
3.2.2 Proses Pirolisis	16
3.2.3 Pengujian Densitas	16

3.2.4	Pengujian Viskositas	17
3.2.5	Pengujian GC-MS.....	17
3.3	Alat dan Bahan	18
3.3.1	Alat	18
3.3.2	Bahan.....	19
3.4	Variabel Penelitian.....	19
3.5	Metode Pengumpulan dan Analisis Data.....	19
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1	Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Hasil Pirolisis .	20
4.2	Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Hasil Pirolisis	21
4.3	Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Komposisi Produk Minyak Pirolisis.....	22
4.4	Pengaruh Rasio Katalis terhadap Sifat Fisik Minyak Pirolisis.....	26
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	29
5.1	Kesimpulan.....	29
5.2	Saran	29
	DAFTAR PUSTAKA.....	30
	LAMPIRAN.....	33

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan pirolisis termal dan katalitik.....	5
Tabel 2. 2 Analisis proksimat plastik	5
Tabel 2. 3 Pengaruh jenis katalis terhadap hasil pirolisis.....	7
Tabel 4. 1 Komposisi Minyak Pirolisis GC-MS	24
Tabel 4. 2 Sifat Fisik Minyak Pirolisis tiap Variasi Rasio Katalis	26
Tabel 4. 3 Rentang Nilai Viskositas dan Densitas pada Minyak Bumi.....	26
Tabel 4. 4 Biaya operasional pirolisis	27

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1	Diagram Alir Preparasi Plastik	11
Gambar 3. 2	Diagram Alir Proses Pirolisis.....	12
Gambar 3. 3	Diagram Alir Pengujian Densitas	13
Gambar 3. 4	Diagram Alir Pengujian Viskositas.....	14
Gambar 3. 5	Diagram Alir Pengujian GC-MS	15
Gambar 3. 6	Rancangan Alat Pirolisis.....	19
Gambar 4. 1	Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Distribusi Produk	20
Gambar 4. 2	Pengaruh Spent Katalis FCC terhadap Hasil Produk	22
Gambar 4. 3	Efek variasi %katalis terhadap minyak cair pirolisis katalitik dalam analisa GC-MS	25

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan konsumsi bahan bakar minyak dan sampah plastik merupakan dua permasalahan besar yang muncul seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan peningkatan jumlah penduduk (Adoe dkk., 2016). Menurut data Energy Institute ([Energyinst.org](https://www.energyinst.org), 2024), dalam Statistical Review World Energy 2024, konsumsi minyak Indonesia pada tahun 2023 sebesar 1,6 juta barel per hari atau meningkat sebesar 0,4% dari tahun sebelumnya. Sedangkan produksinya hanya 0,6 juta barel per hari menurun sebesar 1,4% dari tahun sebelumnya. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Indonesia masih mengandalkan impor minyak dari negara-negara penghasil minyak.

Selain isu energi, masalah sampah plastik menjadi perhatian besar akhir-akhir ini karena jumlahnya yang sangat banyak. Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) ([Sipsn.menlhk.go.id](https://sipsn.menlhk.go.id), t.t.), pada tahun 2023 jumlah sampah yang tidak terkelola kurang lebih sebesar 8,8 juta ton per tahun dengan komposisi sampah plastik sebesar 18,7% atau sebesar 1,6 juta ton per tahun. Jumlah sampah plastik ini, apabila tidak dikelola dengan baik akan merusak lingkungan, mengancam kehidupan hewan, serta kesehatan manusia.

Salah satu metode pengelolaan sampah plastik adalah pirolisis. Pirolisis dapat mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak alternatif. Metode ini dapat menjawab isu krisis energi serta kelestarian lingkungan. Pirolisis adalah metode untuk mengubah struktur molekul-molekul polimer menjadi komponen kimia lain melalui proses termal tanpa oksigen (O_2) (Irawan dkk., 2023).

Selain menawarkan berbagai keuntungan, teknologi pirolisis termal mempunyai kelemahan, seperti beroperasi pada suhu tinggi, konsumsi energi yang tinggi, dan kualitas minyak yang rendah (Irawan dkk., 2023). Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan pirolisis katalitik. Katalis dapat menurunkan

reaksi suhu karena menyediakan situs aktif di permukaan untuk meningkatkan reaksi pirolisis dengan menurunkan energi aktivasi serta dapat mendorong selektivitas produk akhir (Rahman dkk., 2017). Teknologi pirolisis katalitik ini akan dijadikan metode riset untuk melihat seberapa optimal penambahan *Spent FCC Catalyst* dalam proses pengolahan sampah plastik untuk menghasilkan minyak yang bernilai jual.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Irawan dkk., 2023), pirolisis katalitik plastik PP (Limbah kemasan air mineral gelas) dan PE (Limbah tutup botol plastic) dengan penambahan zeolit alam Bayah menghasilkan minyak pirolisis sebesar 67% dan 70% pada suhu optimum 400°C. Hasil tersebut akan dibandingkan dengan penelitian ini, dengan memvariasikan campuran sampah plastik PE dan PP serta penambahan *Spent FCC Catalyst*, untuk melihat seberapa optimal minyak pirolisis yang dihasilkan. Oleh karena itu, dapat dirumuskan perumusan masalah seperti berikut ini:

1. Bagaimana pengaruh rasio campuran sampah plastik PE dan PP dengan penambahan *Spent FCC Catalyst* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh rasio penambahan *Spent Catalyst FCC* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan?
3. Bagaimana kelayakan keekonomisan produksi minyak pirolisis yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini diantaranya sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh campuran sampah plastik dengan penambahan *Spent FCC Catalyst* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan.
2. Mengetahui pengaruh rasio penambahan *spent catalyst FCC* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan.
3. Mengetahui kelayakan ekonomi terhadap minyak pirolisis yang dihasilkan.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode pirolisis katalitik dalam menghasilkan bahan bakar minyak. Bahan baku yang digunakan berupa sampah plastik PP dan PE yang didapatkan dari lingkungan sekitar Pertamina Technology Innovation (TI) Pulogadung. Katalis yang digunakan adalah *Spent FCC Catalyst* didapatkan dari Pertamina TI. Penelitian ini dilakukan di Gedung 5 Pertamina TI.

DAFTAR PUSTAKA

- Adoe, D. G. H., Bunganaen, W., Krisnawi, I. F., & Soekwanto, F. A. (2016). *Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer*. <http://ejournal-fst-unc.com/index.php/LJTMU>
- Aguado, J., Serrano, D. P., Escola, J. M., Garagorri, E., & Fernaâ Ndez, J. A. (t.t.). *Catalytic conversion of polyolefins into fuels over zeolite beta*.
- Aisien, E. T., Otuya, I. C., & Aisien, F. A. (2021). Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst. *Environmental Technology and Innovation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101455>
- Aisien, F. A., & Aisien, E. T. (2023). Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100020>
- Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). Dalam *Journal of Environmental Management* (Vol. 197, hlm. 177–198). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. Dalam *Energy Conversion and Management* (Vol. 115, hlm. 308–326). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Das, P., & Tiwari, P. (2018). The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel. *Waste Management*, 79, 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.021>
- Degnan, T. F. (2000). Applications of zeolites in petroleum refining. Dalam *Topics in Catalysis* (Vol. 13).
- Ditjen Migas. (t.t.). *Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Solar yang Dipasarkan di Dalam Negeri*.
- Energyinst.org. (2024). *Statistical Review of World Energy 2024* (73 ed.). https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0006/1542714/EI_Stats_Review_2024.pdf
- Fermoso, J., Hernando, H., Jana, P., Moreno, I., Přech, J., Ochoa-Hernández, C., Pizarro, P., Coronado, J. M., Čejka, J., & Serrano, D. P. (2016). Lamellar and pillared ZSM-5 zeolites modified with MgO and ZnO for catalytic fast-pyrolysis of eucalyptus woodchips. *Catalysis Today*, 277, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.12.009>

- Gholami, Z., Gholami, F., Tišler, Z., Tomas, M., & Vakili, M. (2021). A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking. *Energies*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/en14041089>
- Handoko, T. (t.t.). *PEMURNIAN ALUMINA DARI SPENT CATALYST MENGGUNAKAN BATCH PRECIPITATOR PADA TAHAP PRESIPITASI*.
- Heikkinen, J. M., Hordijk, J. C., De Jong, W., & Spliethoff, H. (2004). Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 883–900. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.001>
- Heriyanto, H., Suhendi, E., Yusril Nasheh, M., Fathi Rizqillah, M., & Pujiastuti, H. (2024). The Influence of Natural Bayah Zeolite on the Pyrolysis Process of Liquid Fuel Based on HDPE and PP Plastic Waste WORLD CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. Dalam *World Chemical Engineering Journal* (Vol. 8, Nomor 1). <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- Irawan, A., Kurniawan, T., Nurkholifah, N., Melina, M., Nandiyanto, A. B. D., Firdaus, M. A., Alwan, H., & Bindar, Y. (2023). Pyrolysis of Polyolefins into Chemicals Using Low-Cost Natural Zeolites. *Waste and Biomass Valorization*, 14(5), 1705–1719. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01942-3>
- Jung, S. H., Cho, M. H., Kang, B. S., & Kim, J. S. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.009>
- Lee, K.-H., Noh, N.-S., Shin, D.-H., & Seo, Y. (t.t.). *Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst*. www.elsevier.com/locate/polydegstab
- Lopez-Uribe, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.004>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. Dalam *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 102, hlm. 822–838). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Miranda, R., Yang, J., Roy, C., & Vasile, C. (t.t.). *Vacuum pyrolysis of PVC I. Kinetic study*.
- Oyeleke, O. O., Ohunakin, O. S., & Adelekan, D. S. (2021). Catalytic Pyrolysis in Waste to Energy Recovery Applications: A Review. *IOP Conference Series*:

Materials Science and Engineering, 1107(1), 012226.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1107/1/012226>

Ozdemir, C., Şahinkaya, S., Kalıpcı, E., Oden, M. K., Çepelioğullar, Ö., & Pütün, A. E. (t.t.). *Digital Proceeding Of THE ICOEST'2013-, Cappadocia Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life*.

Park, S. S., Seo, D. K., Lee, S. H., Yu, T. U., & Hwang, J. (2012). Study on pyrolysis characteristics of refuse plastic fuel using lab-scale tube furnace and thermogravimetric analysis reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.06.009>

Pertamina. (2021, Januari 29). *Apa Itu Pirolisis? Bisa Ubah Sampah Plastik Jadi BBM*. <https://www.pertamina.com/id/news-room/energia-news/apa-itu-pirolisis-bisa-ubah-sampah-plastik-jadi-bbm>

Rahman, M. T. A., Daud, S., Muhammad, R., Lingkungan, M. T., Dosen,), & Lingkungan, T. (2017). Pengaruh Suhu Dan Porsen Katalis Zeolit Terhadap Yield Pirolisis Limbah Plastik Polypropylene (PP). Dalam *Jom FTEKNIK* (Vol. 4, Nomor 2).

Sipsn.menlhk.go.id. (t.t.). *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. 2024. Diambil 5 Juli 2024, dari <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>

Vogt, E. T. C., & Weckhuysen, B. M. (2015). Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis. Dalam *Chemical Society Reviews* (Vol. 44, Nomor 20, hlm. 7342–7370). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c5cs00376h>