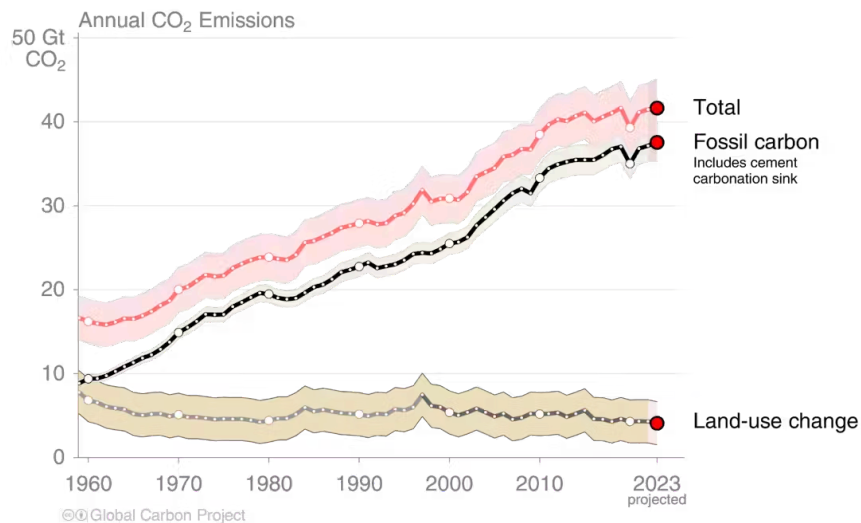


PENDAHULUAN

Indonesia tengah menghadapi urgensi untuk beralih ke energi berkelanjutan seiring dengan menipisnya cadangan energi fosil dan meningkatnya dampak negatif penggunaannya (Indonesia Energy Transition Outlook, 2020). Bahan bakar hidrokarbon seperti minyak bumi dan batubara menjadi penyumbang utama emisi CO₂, yang berdampak pada polusi udara, masalah kesehatan, dan pemanasan global (International Energy Agency, 2022). Sebagai respons, pemerintah menargetkan 23% bauran energi berasal dari energi baru terbarukan (EBT) pada 2025 serta pengurangan emisi gas rumah kaca hingga 41% pada 2030 (Zahira & Fadillah, 2022). Untuk mempercepat transisi ini, salah satu strategi yang diambil adalah mendorong adopsi *biofuel*, khususnya biodiesel, sebagai alternatif energi yang lebih ramah lingkungan



Gambar 1. Energi Fosil sebagai Sumber Emisi Berbahaya
(Sumber: Kompas.com)

Di antara berbagai bahan baku, minyak jelantah atau *waste cooking oil* (WCO) menjadi pilihan unggul karena ketersediaannya yang melimpah dan kemampuannya dalam mengurangi limbah rumah tangga (Yaakob et al., 2013). Namun, biodiesel dari minyak jelantah masih memiliki kelemahan, seperti kestabilan oksidatif rendah, kandungan FFA tinggi, serta proses reaksi yang kurang efisien (Suherman et al., 2023).

Diperlukan katalis yang efektif agar produksi biodiesel minyak jelantah lebih optimal. Oleh karena itu, inovasi ini memanfaatkan CaO yang berasal dari limbah rumah tangga cangkang telur (Viriya-empikul et al., 2010) sebagai katalis heterogen. Untuk meningkatkan performa katalitiknya, dilakukan penambahan (doping) strategis dengan litium (Li) dan magnesium oksida (MgO). Menariknya, litium diperoleh dari endapan limbah pembangkit listrik tenaga panas bumi di Dieng, Jawa Tengah, Indonesia.



Gambar 2. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dieng
(Sumber: Voaindonesia.com)

Dalam operasionalnya, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dieng menghasilkan *brine* dalam jumlah besar sebagai produk sampingan. Limbah tersebut mengandung senyawa logam bernilai, termasuk litium, yang menjadi permasalahan lingkungan akibat penanganannya yang belum optimal. Inovasi ini memanfaatkan limbah tersebut sebagai dopan katalis (Feyzi et al., 2013), dipadukan dengan magnesium oksida (MgO) untuk meningkatkan stabilitas dan mencegah pelepasan litium (Alba-Rubio et al., 2010).

Dengan sistem *Smart Biodiesel Reactor* yang canggih, inovasi ini juga mampu mengoptimalkan proses transesterifikasi melalui pengendalian parameter reaksi secara presisi. Integrasi katalis berbasis limbah ini menjadi langkah strategis sebagai pendekatan *circular economy*. Tidak hanya meningkatkan efisiensi proses produksi, tetapi juga memberikan kontribusi nyata dalam mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri dan rumah tangga.

ISI

Salah satu kendala utama dalam konversi minyak jelantah menjadi biodiesel terletak pada efisiensi proses transesterifikasi yang sangat bergantung pada performa katalis dan desain reaktor (Demirbas, 2009). Katalis konvensional seperti KOH dan NaOH meskipun memiliki aktivitas katalitik tinggi, menimbulkan masalah lingkungan karena bersifat korosif dan sulit dipisahkan dari produk akhir (Fadhil et al., 2012). Sementara itu, katalis heterogen berbasis CaO dari cangkang telur menawarkan solusi lebih ramah lingkungan, namun masih memiliki keterbatasan dalam hal stabilitas termal dan aktivitas katalitik jangka panjang (Yoosuk et al., 2010).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan modifikasi katalis CaO dengan logam alkali seperti K dan Na untuk meningkatkan aktivitas katalitiknya. Namun, katalis tersebut masih mengalami masalah deaktivasi cepat akibat fenomena leaching (pelindian) ion dopan ke dalam campuran reaksi, sehingga menurunkan konversi biodiesel setelah beberapa siklus penggunaan.

Untuk mengatasi berbagai keterbatasan tersebut, kami mengusulkan inovasi pengembangan katalis CaO/Li-MgO hibrid yang berasal dari limbah cangkang telur dan air garam atau *brine* yang berasal dari *geothermal* PLTP Dieng. Lithium (Li) berfungsi sebagai promotor untuk meningkatkan aktivitas katalitik, sedangkan Magnesium Oksida (MgO) bertindak sebagai stabilizer untuk mencegah pelindian Li sekaligus memperpanjang umur katalis. Inovasi ini diintegrasikan ke dalam smart reactor berbasis teknologi ultrasonik dan IoT yang mampu mempersingkat waktu reaksi transesterifikasi menjadi kurang dari 1 jam sekaligus memungkinkan pemantauan kualitas biodiesel secara real-time melalui sistem sensor dan aplikasi mobile. Dengan pendekatan terintegrasi ini, diharapkan produksi biodiesel dari minyak jelantah dapat menjadi lebih efisien, berkelanjutan, dan mudah diadopsi oleh masyarakat luas.

Tabel 1. Data Prakiraan Hasil Eksperimen

Parameter	Perkiraan Hasil	Catatan
Yield Biodiesel	85–99.6%	Peningkatan 4–16% dibanding katalis CaO murni (81,83%)

Waktu Reaksi	2–3 jam	Pengurangan 50% berkat optimasi micro reactor
Viskositas	3,5–4,2 mm ² /s	Memenuhi standar SNI (3,5–5,0 mm ² /s)
Kadar FFA	<0,5%	Esterifikasi awal dengan katalis asam + transesterifikasi dua tahap
Regenerasi Katalis	5 siklus	Aktivitas katalis tetap >80% setelah regenerasi
Pengurangan Biaya Baku	40–50%	Substitusi minyak sawit mentah dengan jelantah
Kapasitas Produksi	5–10 liter/batch	Desain modular untuk skala rumah tangga/UMKM
Fitur Reaktor	Kontrol suhu otomatis, sensor aliran	Integrasi IoT untuk presisi parameter reaksi
Yield Biodiesel	85–90%	Peningkatan 3–8% dibanding katalis CaO murni (81,83%)

Ekstraksi adalah proses yang sangat penting untuk memulihkan litium dari *brine* geothermal. Berbagai metode ekstraksi telah dikembangkan dan disempurnakan, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya sendiri. Berikut adalah perbandingan metode-metode ekstraksi yang ada berdasarkan berbagai penelitian sebelumnya:

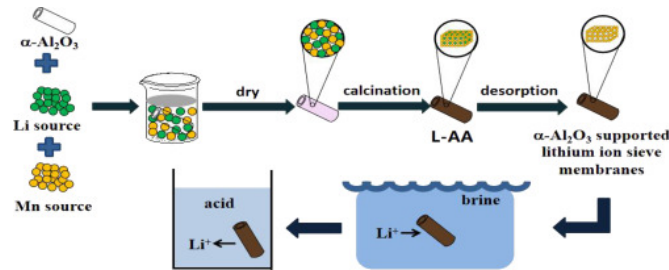
Tabel 2. Berbagai Metode Ekstraksi Lithium dari Brine Geothermal

Metode Ekstraksi	Laju Pemulihan (%)	<i>Final Purity</i> (%)	Kompatibilitas Bahan Baku (Minyak Jelantah)	Konsumsi Energi (kWh/kg Li)	Estimasi Biaya Total (IDR)	Referensi
------------------	--------------------	-------------------------	---	-----------------------------	----------------------------	-----------

Ekstraksi Pelarut	68–80	95–98	Spesifik terhadap Brine dengan Li banyak	70–100	Rp 12 – 37 Juta	(Wahyudi et al., 2023)
Presipitasi Kimia	75.8	99.5 (Li ₂ CO ₃)	Luas	~150	Rp 600 Juta	(Nikkhah et al., 2025)
Capacitive Deionization (CDI)	~70	90–95	Rendah-sedang	~50	Rp 7 – 20 Juta	(Bist et al., 2023)
Adsorpsi membran	88	99	Sedang-Tinggi	~80	Rp 50 – 100 Juta	(Vera et al., 2023)
Adsorpsi saringan ion	90–95	>99	Rendah-Sedang	~50	Rp 19 – 50 Juta	(Chen et al., 2024)
Electrochemical Intercalation	85–92	99–99.5	Tinggi	~60–70	Rp 26 – 75 Juta	(Liu et al., 2023)

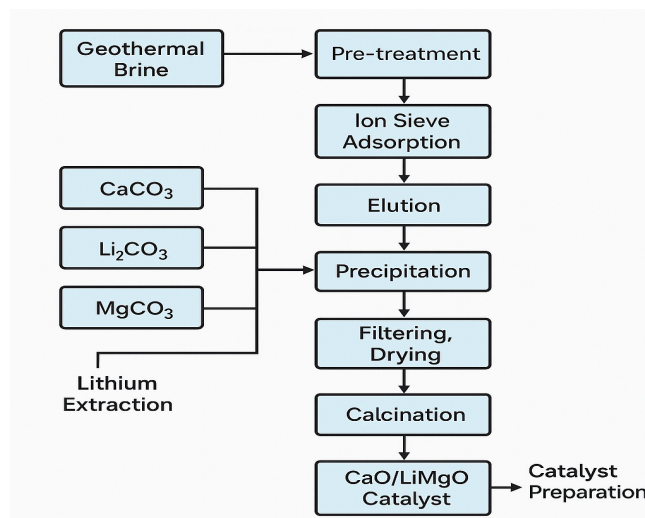
Berdasarkan perbandingan dari berbagai metode ekstraksi litium *geothermal brine* diatas, didapatkan metode yang paling sesuai adalah metode Adsorpsi Saringan Ion karena mempunyai pemulihan Li yang tinggi, produk kemurnian tinggi (cukup untuk katalis heterogen), minim logam berat atau kontaminan lainnya, biaya yang terjangkau, dan kompatibilitas produk yang baik dengan CaO dan MgO, membuatnya menjadi pilihan terbaik untuk diimplementasikan untuk inovasi ini. Menurut penelitian Chen et al. (2024) ekstraksi lithium dalam penelitian ini menggunakan material penyerap yang dimodifikasi untuk meningkatkan selektivitas terhadap ion lithium. Ion lithium diserap dari air garam, kemudian dipulihkan dengan larutan desorpsi, memungkinkan ekstraksi yang efisien dan berkelanjutan. Metode ini memungkinkan untuk lebih ramah lingkungan dibandingkan ekstraksi tradisional.

Kelemahan dari metode ekstraksi ini adalah, penggunaan litium sebagai bahan awal dalam sintesis adsorben itu sendiri. Komponen utama dalam metode ekstraksi Adsorpsi Saringan Ion yang dipilih yaitu $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$ (LMO) menggunakan substrat keramik $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ berbentuk tabung. Berikut adalah diagram alir proses ekstraksi yang dilakukan:



Gambar 3. Mekanisme proses ekstraksi lithium

(Sumber: Xue et al., 2020)



Gambar 4. Diagram alir proses ekstraksi Li dilanjutkan pembuatan katalis

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Sistem Smart *Biodiesel Reactor* merupakan rangkaian modular praktis yang dirancang untuk proses transesterifikasi minyak jelantah secara efisien menggunakan katalis heterogen CaO/Li/MgO . Seperti terlihat pada Gambar 5, sistem ini terdiri dari Tangki Penyimpanan Katalis, Reaktor Transesterifikasi, Pompa Air/Minyak, Tangki Pencucian Biodiesel, dan Tangki Penyimpanan Biodiesel Murni. Komponen-komponen ini didesain untuk mendukung pengolahan aliran kontinu, yang secara signifikan meningkatkan kendali proses dan skalabilitas.



Gambar 5. Desain Smart Reactor

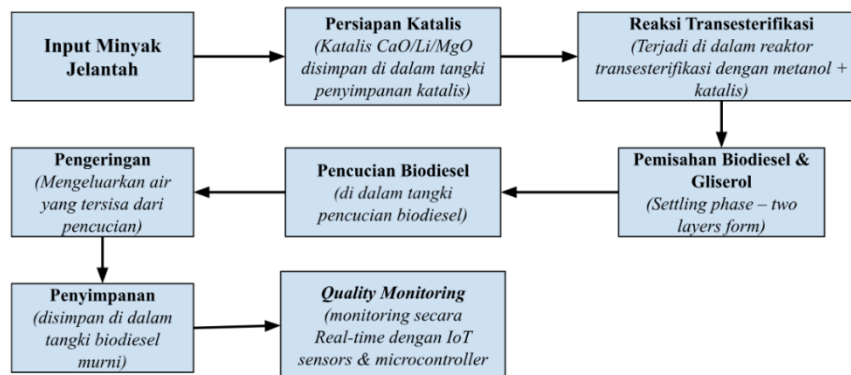
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Inovasi utama dalam prototipe ini adalah integrasi sistem pemantauan *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan pelacakan terus-menerus terhadap parameter kritis seperti suhu, viskositas, dan laju alir, serta penilaian kualitas biodiesel secara *real-time*. Fitur ini memungkinkan deteksi dini anomali dan menjamin konsistensi standar produk tanpa perlu sering pengambilan sampel manual (Rose et al., 2015).

Dibandingkan dengan reaktor biodiesel konvensional, desain ini menawarkan beberapa keunggulan. Reaktor ini lebih hemat ruang dan portabel, cocok untuk digunakan di lokasi pedesaan maupun industri. Aliran kontinu dan katalis heterogen mengurangi waktu henti serta menyederhanakan proses pemisahan, sehingga meminimalkan limbah dan biaya operasional (Subaderi et al., 2022). Selain itu, sistem IoT meningkatkan otomatisasi, mengurangi kebutuhan pengawasan manusia secara terus-menerus, dan meningkatkan faktor keselamatan. Secara keseluruhan, reaktor cerdas ini menjadi alternatif modern, efisien, dan skalabel dibandingkan reaktor batch tradisional dalam produksi biodiesel.

Proses produksi biodiesel dalam sistem *Smart Reactor* ini mengikuti urutan sistematis. Setiap komponen memiliki peran spesifik dan terintegrasi untuk memastikan konversi minyak jelantah menjadi biodiesel berkualitas tinggi berlangsung efisien. Proses dimulai dengan penyimpanan katalis CaO/Li/MgO , dilanjutkan dengan pemompaan bahan baku ke dalam reaktor transesterifikasi, tempat reaksi kimia utama terjadi. Setelah reaksi selesai, campuran hasil reaksi

dialirkan ke tangki pencucian untuk menghilangkan pengotor, dan biodiesel yang telah dimurnikan kemudian disimpan dalam tangki penyimpanan biodiesel murni. Sepanjang proses, sistem pemantauan IoT yang terpasang pada titik-titik kunci, termasuk tangki penyimpanan akhir, secara kontinu melacak kualitas dan status produksi secara *real-time*.



Gambar 6. Diagram alir dari *Smart Reactor*
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Implementasi pada inovasi ini berfokus pada komersialisasi dari *Smart Biodiesel Reactor* untuk produksi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis CaO/Li/MgO. Reaktor ini portabel, hemat energi, dan memanfaatkan limbah rumah tangga serta *brine* dari pembangkit listrik panas bumi Dieng. Distribusi dan penyebaran teknologi reaktor CaO/Li/MgO akan dilakukan melalui berbagai saluran strategis untuk menjangkau pasar secara efektif. Target penjualan dengan mendukung model bisnis B2B dan B2G akan difokuskan kepada produsen biodiesel dan perusahaan energi terbarukan, seperti Pertamina dan Shell, yang mendukung transisi energi bersih. Namun, kolaborasi dengan institusi riset dan pemerintah tetap akan diperlukan mendorong adopsi dengan bantuan adanya berupa insentif atau investasi guna mendukung energi berkelanjutan.

Selain itu, untuk mendapatkan minyak jelantah dan cangkang telur yang dibutuhkan, maka perlu dilakukan kemitraan dengan rumah tangga, restoran, atau tempat pengolahan makanan untuk mengumpulkan minyak goreng bekas dan cangkang telur tersebut.

PENUTUP

Adopsi biofuel menjadi strategi krusial untuk menghadapi masalah polusi dan keterbatasan energi serta mempercepat transisi energi yang lebih ramah lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan *Smart Reactor* dengan katalis heterogen CaO/Li/MgO menawarkan solusi menjanjikan untuk produksi biodiesel dari minyak jelantah. Integrasi sistem pemantauan berbasis IoT meningkatkan kendali proses produksi dan jaminan kualitas, sehingga konsistensi mutu biodiesel dapat terjaga. Desainnya yang kompak dan modular menjadikan solusi ini mudah diskalakan dan diimplementasikan, khususnya di daerah terpencil atau off-grid seperti Dieng yang memiliki pembangkit geotermal dan limbah rumah tangga melimpah. Reaktor biodiesel cerdas ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif yang mengubah minyak jelantah menjadi energi bersih sekaligus bukti nyata kemandirian energi berkelanjutan di Indonesia, dengan desain compact berbasis IoT yang siap digunakan dari skala rumahan hingga industri.

REFERENCES

- Alba-Rubio, A. C., Santamaría-González, J., Mérida-Robles, J. M., Moreno-Tost, R., Martín-Alonso, D., Jiménez-López, A., & Maireles-Torres, P. (2010). Heterogeneous transesterification processes by using CaO supported on zinc oxide as basic catalysts. *Catalysis Today*, 149(3-4), 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.11.015>
- Bist, N., et al. (2023). Rare earth element extraction from geothermal brine using hybrid capacitive-deionisation process. *Energy Reports*, 9, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.019>
- Chen, Q., Chen, Z., Li, H., & Ni, B. J. (2024). Advanced lithium ion-sieves for sustainable lithium recovery from brines. *Sustainable Horizons*, 9, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.sushor.2024.100093>
- Feyzi, M., Hassankhani, A., & Rafiee, H. R. (2013). Preparation and characterization of Cs/Al/Fe₃O₄ nanocatalysts for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 71, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.010>

International Energy Agency (IEA). (2022). *An Energy Sector Roadmap to Net Zero Emissions in Indonesia*.

<https://www.iea.org/reports/indonesia-energy-transition>

Indonesia Energy Transition Outlook. (2020). *Indonesia's Energy Transition: A Pathway to Sustainable Energy*. Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources.

Kompas.com. (2024, April 25). Mengapa kita harus khawatir peningkatan gas metana? *Kompas*. <https://www.kompas.com/>

Liu, Y., et al. (2023). Electrochemical Intercalation of Lithium from Geothermal Brine Using Layered Oxide Cathodes. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.003>

Nikkhah, H., et al. (2025). Sustainable process design for lithium recovery from geothermal brines using chemical precipitation. *Journal of Chemical Engineering*, 9(4), 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.jche.2025.01.019>

Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). The internet of things: An overview. *The Internet Society (ISOC)*, 80(15), 1-53. <https://www.internetsociety.org/>

Suherman, S., Abdullah, I., Sabri, M., & Silitonga, A. S. (2023). Evaluation of physicochemical properties composite biodiesel from waste cooking oil and *Schleichera oleosa* oil. *Energies*, 16(15), 5771. <https://doi.org/10.3390/en16155771>

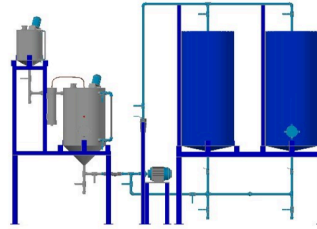
Subaderi, S. (2022). Perancangan Reaktor Biodiesel Dari Limbah Minyak Goreng Sistem Batch Semiotomatis. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 14(1), 59-65. <https://doi.org/10.24853/envirotek.v14i1.3054>

Vera, M., et al. (2023). Advanced Membrane Adsorption for Lithium Recovery. *Journal of Membrane Science*. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.120089>

- Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., & Faungnawakij, K. (2010). Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresource Technology*, 101(10), 3765–3767. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.050>
- Wahyudi, A., Fadillah, E. A., Yuwono, S. D., & Sari, R. M. (2023). Lithium extraction from geothermal brine in Indonesia: A review. *Mineral Economics*, 36(1), 151–164. <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00281-2>
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., & Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>
- Zahira, N. P., & Fadillah, D. P. (2022). Kebijakan dan Tantangan Transisi Energi di Indonesia: Meningkatkan Kontribusi Energi Terbarukan. *Jurnal Energi Terbarukan*, 15(3), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2022.07.006>
- Xue, F., Zhang, X., Niu, Y., Yi, C., Ju, S., & Xing, W. (2020). Preparation and evaluation of α -Al₂O₃ supported lithium ion sieve membranes for Li⁺ extraction. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(9), 2312-2318.

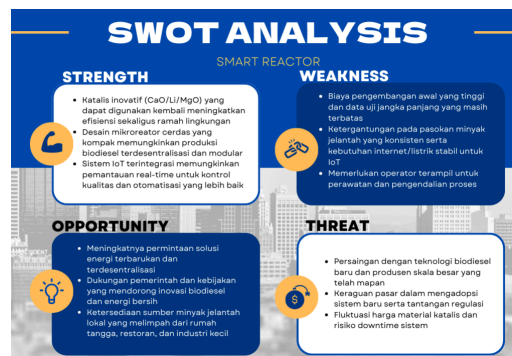
APPENDIX

Lampiran 1 – Tampilan *Smart Reactor* analisis SWOT



Gambar 7. Gambar *Smart Reactor* dari depan

Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 8. *SWOT Analysis*

Sumber: Dokumen Pribadi



Lampiran 2. Hasil Turnitin

BiosynergistDEM_ Universitas Gadjah Mada_SINTESIS
PRODUKSI BIODIESEL DARI LIMBAH MINYAK GORENG RUMAH
TANGGA MENGGUNAKAN KATALIS CaO_Li_MgO YANG
DISINERGIKAN DENGAN LIMBAH BRINE GEOTERMAL
(SCALING) DI K

ORIGINALITY REPORT

4%

SIMILARITY INDEX

4%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

[zombiedoc.com](#)

Internet Source

1%

2

[ekon.go.id](#)

Internet Source

1%

3

[open.lshtm.ac.uk](#)

Internet Source

1%

4

[surabaya.bisnis.com](#)

Internet Source

1%

5

[adoc.pub](#)

Internet Source

<1%

6

[lppm.ulm.ac.id](#)

Internet Source

<1%

7

[narotama.ac.id](#)

Internet Source

<1%

8

[p3m.pens.ac.id](#)

Internet Source

<1%

Exclude quotes On

Exclude matches Off

Exclude bibliography On