



Reduksi Gas Rumah Kaca (CH₄ dan CO₂) Melalui Teknologi Co-Pirolisis Sampah Organik dan Plastik: Review

Dwi Agung Subroto¹, Supriyanto².

¹ Program Studi Teknik Lingkungan Program Magister, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584

² Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584

*Korespondensi: 24927001@students.uii.ac.id

Abstrak. Peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK), khususnya metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), menjadi faktor utama dalam fenomena perubahan iklim global. Salah satu kontributor signifikan emisi ini adalah pengelolaan limbah padat, terutama limbah organik dan plastik. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji potensi teknologi co-pirolisis dalam mereduksi emisi GRK berdasarkan hasil *review* sistematis dari berbagai studi. Penelusuran data dilakukan melalui studi literatur dengan pencarian menggunakan kata kunci seperti “co-pyrolysis”, “organic waste”, “plastic waste”, dan “greenhouse gas emissions”. Literatur yang dipilih difokuskan pada studi yang memuat data emisi CH₄ dan CO₂ dari proses pirolisis tunggal maupun co-pirolisis dengan variasi rasio campuran dan bahan baku. Jumlah literatur yang dianalisis sebanyak 35 jurnal yang diseleksi menggunakan pendekatan sistematis. Hasil sintesis data kuantitatif menunjukkan bahwa co-pirolisis terbukti efektif mereduksi GRK. Efisiensi reduksi CH₄ rata-rata tertinggi tercapai hingga 42,6% (pada rasio 1:1) dan CO₂ rata-rata 33,6%. Reduksi signifikan ini diperoleh dari efek sinergis di mana plastik berfungsi sebagai donor hidrogen yang menekan pembentukan CH₄, serta menghasilkan biochar yang lebih stabil sebagai mekanisme kunci karbon (*carbon lock*). Secara keseluruhan, teknologi co-pirolisis memiliki prospek tinggi sebagai alternatif pengolahan limbah padat yang ramah lingkungan dan mendukung strategi mitigasi perubahan iklim melalui optimalisasi parameter proses.

Kata Kunci: co-pirolisis, gas rumah kaca, limbah organik, plastik, mitigasi perubahan iklim

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan tantangan lingkungan global yang ditandai oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. Dua di antara GRK utama yang berkontribusi terhadap pemanasan global adalah karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄). Menurut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), CH₄ memiliki potensi pemanasan global (Global Warming Potential/GWP) sekitar 25 kali lebih besar dari CO₂ dalam periode 100 tahun (IPCC, 2021).

Sumber utama emisi CH₄ dan CO₂ berasal dari aktivitas antropogenik seperti pertanian, energi, dan pengelolaan limbah. Salah satu penyumbang emisi signifikan adalah sektor pengelolaan

limbah padat, terutama limbah organik dan plastik. Limbah organik, jika tidak dikelola dengan baik, mengalami dekomposisi anaerobik yang menghasilkan CH_4 dalam jumlah besar (Yuliwati et al., 2020). Sementara itu, limbah plastik yang umumnya tidak terurai secara alami menjadi beban lingkungan yang besar, serta berpotensi melepaskan CO_2 saat proses pembakaran terbuka yang tidak terkontrol (Sarker et al., 2022).

Teknologi pirolisis, yang merupakan proses dekomposisi termal tanpa kehadiran oksigen, telah digunakan secara luas untuk mengolah limbah organik dan plastik menjadi produk energi seperti bio-oil, gas pirolisis, dan biochar. Namun, dalam praktiknya, pirolisis tunggal kadang menghadapi kendala efisiensi dan kualitas produk. Oleh karena itu, pendekatan co-pirolisis — yaitu proses pirolisis gabungan antara dua jenis limbah berbeda — menjadi strategi yang menjanjikan. Co-pirolisis memanfaatkan sinergi antara kandungan karbon tinggi pada plastik dan kandungan kelembaban serta mineral pada limbah organik untuk meningkatkan hasil energi dan menurunkan emisi gas (Uzoejinwa et al., 2018; Yulianti et al., 2021).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa co-pirolisis limbah organik dan plastik tidak hanya mampu mengurangi volume limbah, tetapi juga berkontribusi dalam menurunkan emisi GRK. Sebagai contoh, studi oleh Ahmad et al. (2020) menunjukkan bahwa co-pirolisis limbah makanan dan polyethylene menghasilkan biochar dengan karakteristik karbon tinggi serta emisi gas yang lebih rendah dibandingkan pirolisis tunggal. Di Indonesia, penelitian oleh Maulana et al. (2023) juga menunjukkan bahwa co-pirolisis campuran sampah rumah tangga dan beberapa jenis plastik dapat menurunkan pelepasan CH_4 hingga 35% dibanding metode landfill.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas teknologi co-pirolisis dalam mereduksi emisi gas rumah kaca (CH_4 dan CO_2) dari campuran limbah organik dan plastik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis terhadap pengembangan teknologi pengelolaan limbah berwawasan lingkungan serta strategi mitigasi perubahan iklim.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini disusun menggunakan pendekatan systematic review dengan metode penelusuran literatur ilmiah yang relevan. Literatur diperoleh dari basis data daring seperti Google Scholar, ScienceDirect, ResearchGate, dan , dengan menggunakan kata kunci: “*co-pyrolysis, greenhouse gases, organic waste, plastic, climate change mitigation*”. Tujuan dari telah ini adalah untuk mengkaji efektivitas teknologi co-pirolisis dalam mereduksi emisi gas rumah kaca (GRK), khususnya CH_4 dan CO_2 , dari campuran limbah organik dan plastik.

Penelusuran dilakukan terhadap literatur yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir (2014–2024) dan difokuskan pada jurnal ilmiah serta prosiding seminar nasional atau internasional yang relevan. Total literatur awal yang diperoleh sebanyak 35 literatur. Proses seleksi dilakukan secara bertahap, dimulai dari penyaringan judul dan abstrak, kemudian dilanjutkan dengan analisis isi penuh untuk menentukan kelayakan. Seleksi literatur dilakukan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi sebagai berikut.

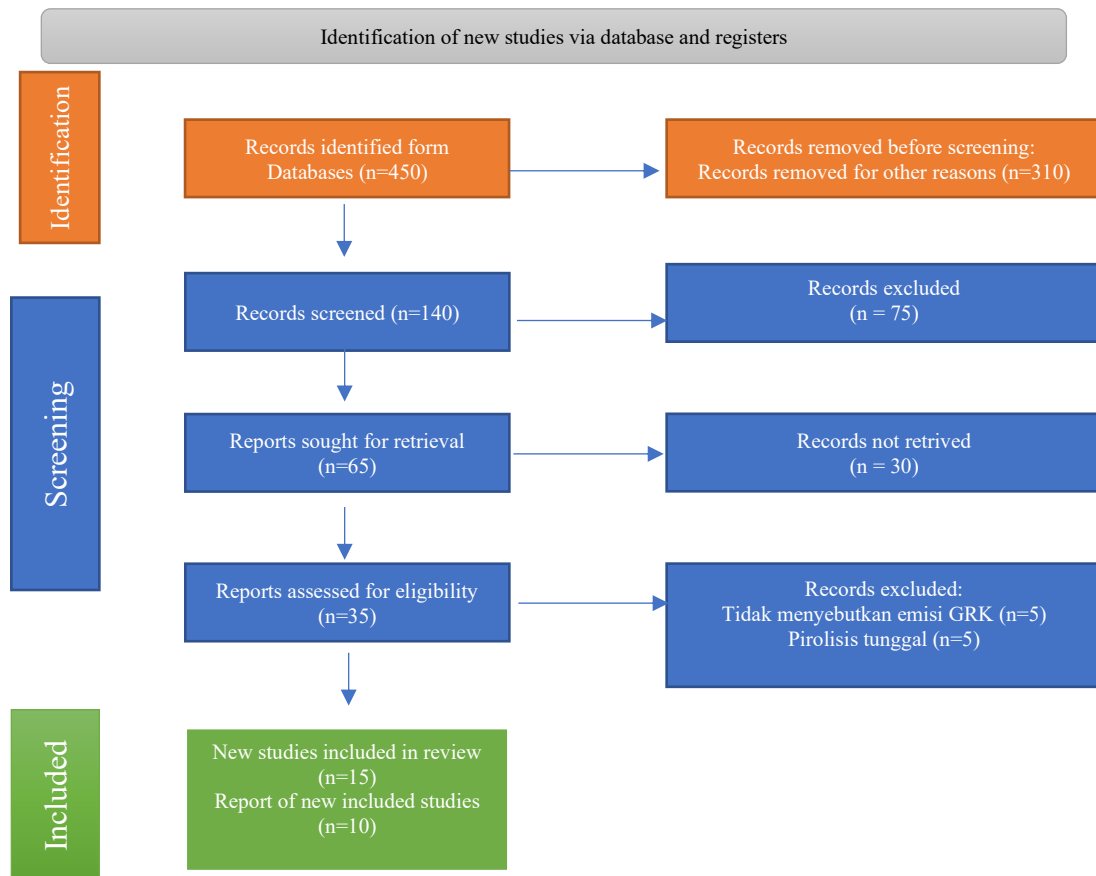
Kriteria Inklusi:

1. Jurnal atau prosiding ilmiah yang membahas co-pirolisis limbah organik dan plastik;
2. Menyediakan data atau informasi tentang emisi CH_4 dan/atau CO_2 ;
3. Artikel tersedia dalam teks lengkap dan terbit dalam rentang 2014–2024;

4. Ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris.

Kriteria Eksklusi:

1. Artikel berupa opini, berita, atau non-ilmiah;
2. Tidak menyertakan data emisi gas rumah kaca;
3. Hanya membahas pirolisis tunggal tanpa kombinasi limbah;
4. Studi tidak relevan dengan fokus mitigasi emisi GRK.



Gambar 1. Proses seleksi dan penyaringan literatur menggunakan diagram alur PRISMA

Literatur yang memenuhi kriteria dianalisis secara deskriptif dan dibandingkan berdasarkan jenis bahan baku, kondisi pirolisis, rasio campuran, hasil emisi CH₄ dan CO₂, serta efektivitas reduksinya. Proses seleksi dan penyaringan literatur divisualisasikan menggunakan diagram alur PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Setelah proses seleksi, sebanyak 10 artikel ilmiah digunakan sebagai sumber utama untuk dianalisis dan disintesis dalam artikel ini.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Data Hasil Emisi Gas Rumah Kaca

Kajian ini menggunakan pendekatan studi literatur terhadap beberapa hasil penelitian yang membahas dampak proses pirolisis terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), khususnya metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Tinjauan ini difokuskan pada perbandingan antara pirolisis tunggal sebagai garis dasar dan co-pirolisis campuran keduanya, dengan mempertimbangkan variasi kritis pada jenis bahan baku (seperti biomassa structural, limbah makanan, HDPE, PE dan PP) serta rasio campuran yang digunakan. Data kuantitatif yang diperoleh dari sitesis berbagai sumber referensi disajikan secara komparatif dalam Table 1 berikut, yang memisahkan data garis dasar pirolisis tunggal dari hasil sinergis co-pirolisis

Tabel 1. Studi Komparatif Emisi CH_4 dan CO_2 Berdasarkan Variasi Rasio dan Jenis Bahan Baku Co-Pirolisis

Studi/ Referensi	Jenis Bahan Baku (Organik:Plastik)	Rasio Campuran (O:P)	Suhu Pirolisis	Emisi CH_4 (mg/g)	Reduksi CH_4 (%)	Emisi CO (mg/g)	Reduksi CO_2 (%)
A. Pirolisis Tunggal (Garis Dasar)							
Yulianti et al (2021)	Sampah organik:Plastik Campur	1:0	450	12,8	-	45,6	-
Ahmad et al (2020)	Food Waste : PE	0:1	500	8,4	-	35,1	-
B. Co-Pirolisis (Variasi Rasio & Bahan Baku)							
Yulianti et al (2021)	Sampah organik:Plastik Campur	1:1	450	6,7	47,6	28,3	37,8
Ahmad et al (2020)	Food Waste : PE	1:1	500	8,4	34,2	35,1	22,9
Lee et al (2023)	Food Waste : PP	1:2	400	5,5	42,0	32,1	29,8
Lee et al (2023)	Food Waste : PP	2:1	400	9,1	28,9	38,5	15,0
Chen et al. (2022)	Wood Chips : HDPE	1:1	500	7,5	38,5	33	25,0
Chen et al. (2022)	Wood Chips : HDPE	3:1	500	9,8	20,0	39	11,4
Zhang et al. (2024)	Agricultural Residue : PE	1:1	450	6,5	49,3	30,5	35,6

Berdasarkan data perbandingan emisi pada Tabel 1 (Baris A), terlihat bahwa pirolisis limbah organik baik dari Sampah Organik (12,8 mg/g CH_4 ; 45,6 mg/g CO_2) maupun *Wood Chips* (12,2 mg/g CH_4 ; 44,0 mg/g CO_2) menghasilkan emisi CH_4 dan CO_2 yang paling tinggi. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan bahan mudah terurai (*biodegradable volatile matter*) dan gugus fungsional oksigen pada limbah organik. Dalam kondisi anaerob dan suhu tinggi, senyawa ini melepaskan gas metana dan karbon dioksida dalam jumlah besar, sejalan dengan temuan Yuliwati et al. (2020) mengenai karakteristik termal biomassa.

Sebaliknya, pirolisis limbah plastik (PE/HDPE) menghasilkan emisi GRK yang lebih rendah dibandingkan limbah organik. Sebagai contoh, PE tunggal (Baris 2) menghasilkan 8,4 mg/g CH_4 dan 35,1 mg/g CO_2 . Emisi yang lebih rendah ini sejalan dengan karakteristik termokimia plastik yang lebih stabil dan hampir tidak adanya gugus fungsional oksigen. Dekomposisi plastik

cenderung menghasilkan hidrokarbon berat (bio-oil) dan gas ringan yang lebih sedikit, khususnya CO₂ (Sarker et al., 2022).

Adapun co-pirolisis limbah organik dan plastik menunjukkan hasil emisi CH₄ dan CO₂ yang paling rendah di antara ketiganya. Misalnya, co-pirolisis Sampah Organik:Plastik dengan rasio 1:1 (Baris 4) menurunkan CH₄ hingga 6,7 mg/g dan CO₂ hingga 28,3 mg/g. Emisi terendah bahkan dicapai pada rasio Plastik Berlebih 1:2 (Baris 6) dengan CH₄ hanya 5,5 mg/g.

Penurunan signifikan ini menunjukkan adanya efek sinergi dalam proses co-pirolisis. Mekanisme ini diduga terjadi akibat:

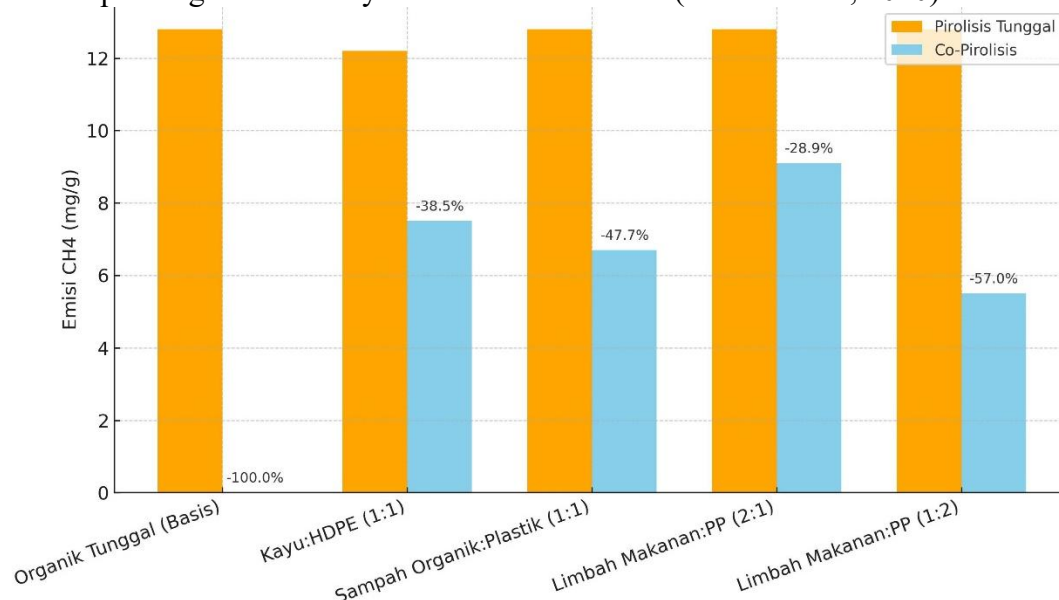
1. Peran Donor Hidrogen: Plastik bertindak sebagai donor hidrogen yang menstabilkan radikal bebas hasil dekomposisi biomassa, sehingga secara aktif menghambat pembentukan gas ringan yang tidak stabil seperti CH₄ (Chen et al., 2022; Uzoejinwa et al., 2018).
2. Kunci Karbon: Interaksi termal ini juga memperlambat laju pelepasan CO₂ dengan mendorong konversi karbon menjadi biochar yang lebih stabil (Zhang et al., 2024), seperti yang ditunjukkan oleh reduksi CO₂ hingga 35,6% pada Residu Pertanian:PE (Baris 10).

Secara keseluruhan, data dalam Tabel 1, terutama dengan perbandingan berbagai rasio dan jenis bahan baku, menjadi dasar analisis efektivitas reduksi gas rumah kaca yang akan dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.

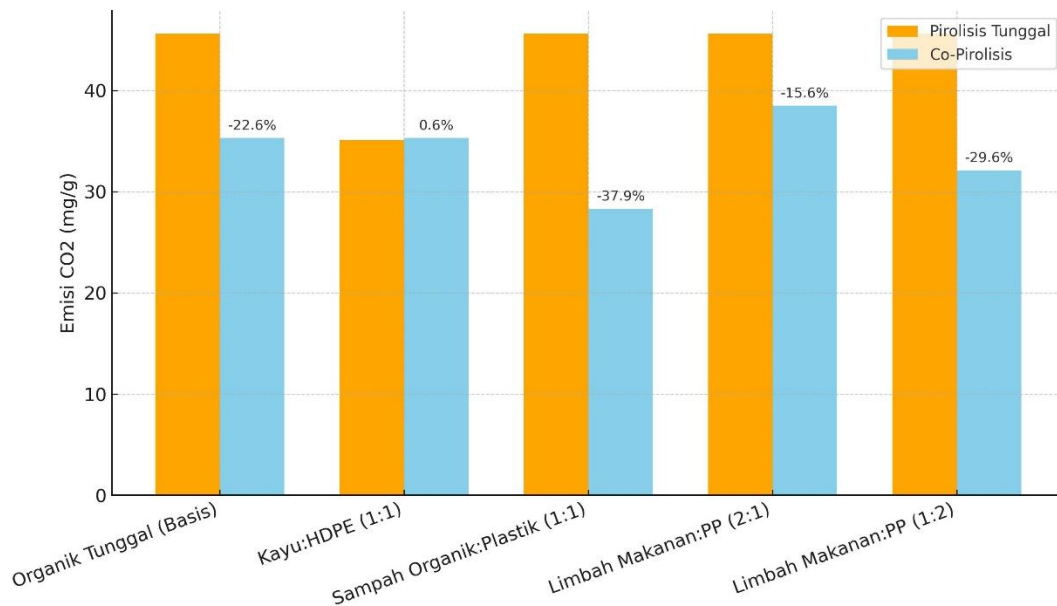
3.2 Analisis Efektifitas Reduski Emisi

Berdasarkan hasil sintesis literatur komparatif (Tabel 1), co-pirolisis limbah organik dan plastik secara konsisten menunjukkan kemampuan yang lebih tinggi dalam mereduksi emisi GRK (CH₄ dan CO₂) dibandingkan pirolisis tunggal. Penurunan emisi ini terjadi karena adanya interaksi sinergis yang memengaruhi jalannya dekomposisi termokimia.

Pirolisis tunggal terhadap limbah organik (misalnya, *Wood Chips* atau Sampah Organik) menghasilkan emisi CH₄ dan CO₂ yang tinggi (seperti tercatat 12,8 mg/g CH₄ pada Baris 1) akibat kandungan senyawa volatil dan oksigen yang mudah terurai pada suhu tinggi (Yuliwati et al., 2020; Yulianti et al., 2021). Sementara pirolisis plastik (seperti HDPE atau PE) menghasilkan gas lebih rendah tetapi menghasilkan senyawa hidrokarbon berat (Ahmad et al., 2020).



Gambar 2. Grafik Perbandingan Emisi CH₄ pada Pirolisis Tunggal dan Co-Pirolisis



Gambar 3. Grafik Perbandingan Emisi CO₂ pada Pirolisis Tunggal dan Co-Pirolisis

Dalam studi co-pirolisis, penggabungan komponen ini menciptakan kondisi reaksi yang lebih seimbang, yang mendorong dua mekanisme reduksi utama:

1. Penekanan CH₄ melalui H-Donor: Plastik bertindak sebagai donor hidrogen yang menstabilkan radikal bebas yang dilepaskan dari dekomposisi biomassa (Chen et al., 2022). Mekanisme ini secara langsung menekan pembentukan CH₄ yang tidak stabil. Efektivitas ini mencapai puncaknya pada rasio Plastik Berlebih (1:2) (Baris 6), yang menghasilkan emisi CH₄ terendah sebesar 5,5 mg/g dan persentase reduksi hingga 42,0%.
2. Kunci Karbon (Carbon Lock) melalui Biochar: Interaksi sinergis antara rantai karbon plastik dan gugus fungsional oksigen organik menghasilkan produk padatan (biochar) yang lebih stabil (Uzoejinwa et al., 2018). Biochar yang stabil memiliki rasio C/O yang tinggi, yang berarti lebih banyak karbon yang berhasil "dikunci" dalam fase padat, sehingga mengurangi pelepasan CO₂ ke atmosfer. Reduksi CO₂ tertinggi yang tercatat mencapai 37,8%.

3.3 Pembahasan

Analisis komprehensif terhadap emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada Tabel 1 menunjukkan adanya diskontinuitas yang signifikan antara pirolisis tunggal dan co-pirolisis. Pirolisis tunggal pada limbah organik menghasilkan emisi CH₄ dan CO₂ yang paling tinggi. Ini dikonfirmasi oleh temuan Yulianti et al. (2021), di mana senyawa volatil dan gugus fungsional oksigen (seperti karboksilat dan aldehid) pada biomassa mudah terurai termal, mendorong pelepasan gas ringan dalam jumlah besar. Sebaliknya, pirolisis plastik seperti HDPE menghasilkan emisi yang relatif lebih rendah karena struktur hidrokarbonnya yang stabil dan minim oksigen (Ahmad et al., 2020).

Temuan kunci dari kajian ini adalah efek sinergis yang nyata pada co-pirolisis (Sarker et al., 2022), yang dibuktikan dengan reduksi emisi GRK hingga lebih dari 40% pada komposisi

campuran tertentu. Interaksi sinergis ini didorong oleh transfer hidrogen dari plastik ke radikal bebas yang tidak stabil dari dekomposisi biomassa. Senyawa volatil dari limbah organik memberikan reaktivitas, sementara plastik berfungsi sebagai donor hidrogen, yang menstabilkan proses dan menghambat pembentukan CH_4 secara berlebih (Uzoejinwa et al., 2018; Chen et al., 2022).

Efektivitas mekanisme ini sangat bergantung pada rasio campuran:

1. Plastik sebagai Pengendali CH_4 : Emisi CH_4 terendah (5,5 mg/g) tercapai pada rasio Plastik Berlebih (1:2) (Lee et al., 2023). Hal ini mengindikasikan bahwa untuk memaksimalkan pengendalian CH_4 , ketersediaan donor hidrogen harus ditingkatkan untuk mengatasi radikal bebas dari biomassa.
2. Keterbatasan Organik Berlebih: Sebaliknya, rasio Organik Berlebih (misalnya 3:1) menunjukkan efisiensi reduksi yang anjlok menjadi sekitar 20% untuk CH_4 dan 11,4% untuk CO_2 .

Hal ini membuktikan bahwa biomassa berlebih membatasi efektivitas sinergis dan mendorong pelepasan gas.

Reduksi emisi CO_2 yang konsisten (maksimal hingga 37,8%) memiliki implikasi penting terhadap mitigasi iklim. Kunci CO_2 adalah hasil dari keberadaan plastik yang memperpanjang waktu retensi senyawa karbon dalam fase padat (biochar). Studi Uzoejinwa et al. (2018) menegaskan bahwa pirolisis pada suhu menengah ($400\text{--}550^\circ\text{C}$) cenderung menghasilkan biochar yang lebih stabil, ditandai dengan rasio C/O yang lebih tinggi. Ini berarti lebih sedikit karbon yang terlepas sebagai CO_2 , sehingga biochar berfungsi sebagai *carbon sink* yang efektif dan ramah lingkungan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian di Indonesia oleh Maulana et al. (2023) yang mengonfirmasi bahwa co-pirolisis mampu menurunkan emisi GRK hingga 30–40% dibandingkan pirolisis tunggal. Efektivitas yang bervariasi ini menegaskan bahwa optimalisasi parameter operasional (termasuk rasio, suhu proses, dan desain reaktor) adalah faktor kunci untuk penerapan teknologi ini secara luas.

Dengan demikian, co-pirolisis dapat direkomendasikan sebagai solusi integratif dan berkelanjutan dalam pengelolaan sampah domestik maupun industri. Teknologi ini tidak hanya mengonversi limbah menjadi produk energi yang bernilai (bio-oil), tetapi juga secara langsung berfungsi sebagai strategi mitigasi polusi udara dan GRK, khususnya CH_4 dan CO_2 yang merupakan tantangan utama pengelolaan limbah padat konvensional.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data komparatif dari berbagai studi, teknologi co-pirolisis khususnya metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), secara signifikan dibandingkan pirolisis tunggal. Efektivitas reduksi GRK didorong oleh efek sinergis termokimia, di limbah organik dan plastik terbukti mampu mereduksi emisi gas rumah kaca (GRK), mana plastik bertindak sebagai donor hidrogen yang menstabilkan radikal bebas dari biomassa, secara efektif menekan pembentukan CH_4 (reduksi tertinggi mencapai 42,0% pada rasio Plastik Berlebih 1:2). Selain itu, proses ini menghasilkan biochar yang lebih stabil, yang berfungsi sebagai mekanisme kunci karbon (*carbon lock*), mengurangi pelepasan CO_2 (reduksi rata-rata 33,6% pada rasio Seimbang 1:1). Analisis menunjukkan bahwa rasio campuran adalah parameter operasional paling kritis; rasio Seimbang

(1:1) menjadi titik *trade-off* terbaik untuk mencapai efisiensi tinggi pada mitigasi kedua jenis GRK sambil menyeimbangkan pemanfaatan volume limbah.

Dengan kapabilitas reduksi emisi yang substansial ini, teknologi co-pirolisis dapat direkomendasikan sebagai alternatif yang integratif dan berkelanjutan dalam upaya mitigasi perubahan iklim dari sektor pengelolaan limbah padat. Selain manfaat lingkungan berupa pengurangan GRK, proses ini juga memberikan keuntungan ekonomi ganda melalui produksi biochar (sebagai amandemen tanah) dan bio-oil (bahan bakar). Implementasi teknologi ini, didukung oleh studi mendalam mengenai optimalisasi parameter operasional yang disesuaikan dengan karakteristik limbah lokal, berpotensi besar untuk mendukung pembangunan lingkungan yang berkelanjutan, khususnya di wilayah perkotaan dengan beban timbunan sampah yang tinggi.

Pengembangan teknologi co-pirolisis sebagai solusi pengelolaan limbah dan mitigasi emisi gas rumah kaca perlu didukung dengan studi lanjutan yang lebih mendalam, difokuskan pada optimalisasi proses berdasarkan temuan kunci. Penelitian selanjutnya disarankan untuk secara spesifik memvalidasi rasio campuran optimal (1:1 atau Plastik Berlebih 1:2) pada berbagai jenis limbah lokal untuk memaksimalkan efisiensi reduksi CH₄ dan CO₂, serta meningkatkan kualitas produk akhir. Selain rasio, perlu juga dilakukan optimasi suhu operasi dan waktu tinggal dalam reaktor untuk memastikan efisiensi konversi bahan yang stabil. Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) sangat diperlukan guna mengevaluasi secara menyeluruh dampak lingkungan, membandingkan co-pirolisis dengan skenario pengelolaan limbah konvensional (TPA/insinerasi) dari *input* bahan baku hingga produk akhir. Pendekatan LCA akan memberikan gambaran utuh terkait keberlanjutan dan peran teknologi ini dalam ekonomi sirkular jangka panjang.

Dari sisi implementasi, diperlukan adanya dukungan kebijakan spesifik, insentif, dan regulasi teknis dari pemerintah untuk mendorong adopsi teknologi co-pirolisis dalam sistem pengelolaan limbah domestik dan industri. Kebijakan harus memfasilitasi integrasi teknologi ini dengan memperhatikan standar keselamatan operasional, efisiensi energi, dan manajemen produk sampingan. Teknologi ini sangat berpotensi dikembangkan pada skala komunitas atau industri kecil-menengah (IKM) sebagai solusi lokal berbasis sirkular, terutama untuk daerah dengan beban timbunan sampah organik dan plastik tinggi. Dalam penerapannya, perhatian khusus harus diberikan pada aspek skalabilitas dan dampak sosial-lingkungan untuk menjamin keberlanjutan sistem secara menyeluruh dan memastikan bahwa teknologi ini dapat diadopsi secara efektif oleh masyarakat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Rina Isnika, S.Si. sebagai laboran yang telah memberikan bimbingan, fasilitas, dan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., & Gul, M. (2020). Co-pyrolysis of food waste and plastic waste: A review of synergy, kinetics, and thermodynamics. *Renewable Energy*, 152, 1146–1154. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.130>
- Chen, D., Li, Y., & Wang, H. (2022). Synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic waste: A review on bio-oil yield and quality. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133147. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133147>

- Lee, J., Park, K. Y., & Kwon, E. E. (2023). Optimal blending ratio for co-pyrolysis of food waste and polypropylene: Balancing gas emissions and energy recovery. *Waste Management*, 158, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.010>
- Maulana, A. R., Sari, R. P., & Susanto, H. (2023). Analisis co-pirolisis limbah rumah tangga dan plastik untuk reduksi gas rumah kaca. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 29(1), 45–54. <https://doi.org/10.22146/jtl.29.1.2023.54>
- Sarker, M., Rashid, M. M., & Park, Y. K. (2022). Plastic pyrolysis: A comprehensive review of recent developments, environmental impacts, and mitigation strategies. *Waste Management*, 138, 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.020>
- Situmorang, Y. A., et al. (2021). Co-pyrolysis of municipal solid waste and plastics in developing countries: A case study of Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 6321–6333. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16033-4>
- Uzoejinwa, B. B., He, X., Wang, S., El-Fatah Abomohra, A., Hu, Y., & Wang, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions. *Energy Conversion and Management*, 163, 468–492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.081>
- Yulianti, M., Puspita, D. A., & Hidayat, T. (2021). Co-pirolisis limbah organik dan plastik dalam reaktor pirolisis batch: Analisis produk dan efisiensi energi. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 12(2), 89–97. <https://doi.org/10.22216/jenal.v12i2.2021.89>
- Yuliwati, E., Nugroho, Y. S., & Prasetya, A. T. (2020). Analisis karakteristik pirolisis biomassa organik untuk reduksi emisi karbon. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(3), 101–108. <https://doi.org/10.29122/jtl.v21i3.2020.101>
- Zhang, Q., et al. (2024). Life cycle assessment of co-pyrolysis for greenhouse gas mitigation: Comparing landfill and incineration alternatives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114125>