

Pendekatan Ekonomi Sirkular Dalam Industri Tembakau : Mendaur Ulang Limbah WWTP Menjadi Kompos Kaya Nutrisi Melalui Proses Anaerobik

Tri Figur Fuad*, Abdul Wahid

Program Studi Teknik Industri, Universitas Yudharta Pasuruan, Indonesia

*Koresponden email: trifigurfuad@gmail.com

Diterima: 28 Juni 2025

Disetujui: 04 Juli 2025

Abstract

The implementation of circular economy principles is crucial for industries to achieve sustainability, including the tobacco industry which generates significant organic waste in the form of sludge from its Wastewater Treatment Plant (WWTP). This study demonstrates a circular economy model by upcycling WWTP sludge into nutrient-rich compost using anaerobic digestion (AD) technology. The AD process was conducted on the sludge at a laboratory scale under mesophilic temperature conditions. The quality of the final compost product (digestate) was evaluated based on physicochemical parameters and compared with national compost quality standards. The results showed that the AD process successfully transformed the sludge into a stable and nutrient-rich material. The final product's C/N ratio reached 20:1, which is ideal for soil application. The contents of total N (1.6%), Phosphorus (P_2O_5 1.1%), and Potassium (K_2O 0.9%) indicate its potential as an effective organic fertilizer. The quality of the compost produced was proven to meet the SNI 19-7030-2004 quality standard. This study confirms that upcycling sludge via AD is a feasible and effective approach to implementing a circular economy in the tobacco industry, turning a waste burden into a valuable product and supporting sustainable agriculture.

Keywords: *anaerobic digestion; circular economy; compost; upcycling; industrial sludge; tobacco industry*

Abstrak

Penerapan prinsip ekonomi sirkular menjadi krusial bagi industri untuk mencapai keberlanjutan, termasuk pada industri tembakau yang menghasilkan limbah organik signifikan berupa sludge dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Penelitian ini mendemonstrasikan model ekonomi sirkular melalui *upcycling* sludge IPAL menjadi kompos kaya hara menggunakan teknologi pencernaan anaerobik (*anaerobic digestion*/AD). Proses AD dilakukan pada sludge dalam skala laboratorium pada rentang suhu mesofilik. Kualitas produk kompos akhir (digestate) dievaluasi berdasarkan parameter fisikokimia dan dibandingkan dengan standar mutu kompos nasional. Hasil penelitian menunjukkan proses AD berhasil mentransformasi sludge menjadi material stabil yang kaya unsur hara. Rasio C/N produk akhir mencapai 20:1, ideal untuk aplikasi tanah. Kandungan N-total (1,6%), Fosfor (P_2O_5 1,1%), dan Kalium (K_2O 0,9%) menunjukkan potensinya sebagai pupuk organik yang efektif. Kualitas kompos yang dihasilkan terbukti memenuhi standar mutu SNI 19-7030-2004. Studi ini mengkonfirmasi bahwa *upcycling* sludge melalui AD merupakan pendekatan yang layak dan efektif untuk mengimplementasikan ekonomi sirkular di industri rokok, mengubah beban limbah menjadi produk bernilai, serta mendukung pertanian berkelanjutan.

Kata Kunci: *ekonomi sirkular; upcycling; sludge industri; kompos; pencernaan anaerobik; industri tembakau*

1. Pendahuluan

Transisi menuju model ekonomi sirkular (Circular Economy/CE) telah menjadi paradigma utama dalam upaya mencapai pembangunan industri yang berkelanjutan [1][2]. Model ini menantang pendekatan linear tradisional "ambil-pakai-buang" dengan mempromosikan sistem regeneratif di mana limbah diminimalkan dan sumber daya dijaga dalam siklus penggunaan selama mungkin [3]. Implementasi CE di sektor industri tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga untuk menciptakan nilai tambah dari aliran limbah, yang sebelumnya dianggap sebagai beban biaya [4]. Dalam konteks ini, setiap limbah industri dipandang sebagai potensi bahan baku untuk proses lainnya, mendukung prinsip *zero waste* dan efisiensi sumber daya.

Industri tembakau, sebagai salah satu sektor manufaktur yang signifikan di banyak negara termasuk Indonesia, menghadapi tantangan lingkungan yang serupa. Proses produksi rokok menghasilkan limbah dalam berbagai bentuk, terutama limbah cair dengan beban organik yang tinggi [5]. Untuk memenuhi regulasi lingkungan, industri wajib mengolah air limbahnya melalui Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) atau *Wastewater Treatment Plant* (WWTP)[6][7]. Meskipun efektif menjernihkan air, proses IPAL menghasilkan produk sampingan dalam jumlah besar, yaitu lumpur atau *sludge* [4]. *Sludge* ini, yang merupakan endapan kaya bahan organik dan mikroorganisme, jika tidak dikelola dengan tepat, akan menumpuk dan berpotensi menjadi sumber pencemaran sekunder di lahan pembuangan [8]

Pengelolaan *sludge* IPAL secara konvensional seringkali terbatas pada pengeringan di *Sludge Drying Bed* (SDB) dan pembuangan ke *landfill*, yang tidak sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular [9]. Namun, kandungan bahan organiknya yang tinggi menjadikan *sludge* sebagai kandidat ideal untuk proses *upcycling*, yaitu mengubah limbah menjadi produk dengan nilai yang lebih tinggi. Salah satu jalur *upcycling* yang paling menjanjikan adalah mengubah *sludge* menjadi pupuk organik atau kompos [10]. Transformasi ini tidak hanya menyelesaikan masalah penumpukan limbah, tetapi juga menghasilkan produk yang dapat meningkatkan kesuburan tanah.

Di antara berbagai teknologi pengolahan biologis, pencernaan anaerobik (*Anaerobic Digestion*/AD) menonjol sebagai metode yang sangat efektif untuk stabilisasi *sludge* organik[11][12]. Proses AD bekerja dalam kondisi tanpa oksigen, di mana konsorsium mikroorganisme mendegradasi senyawa organik kompleks menjadi produk yang lebih stabil, yaitu biogas dan *digestate* (residu padat dan cair yang kaya hara) [13]. [14] *Digestate* yang dihasilkan memiliki rasio C/N yang lebih rendah, menjadikannya prekursor yang sangat baik untuk kompos berkualitas tinggi [15].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mendemonstrasikan pendekatan ekonomi sirkular di industri rokok dengan melakukan *upcycling* pada *sludge* IPAL menjadi kompos kaya hara melalui metode AD[16]. Studi ini akan menganalisis perubahan karakteristik fisikokimia *sludge* selama proses dan mengevaluasi kualitas kompos akhir berdasarkan parameter kunci yang ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI).

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif skala laboratorium untuk mengevaluasi efektivitas proses AD dalam mentransformasi *sludge* IPAL menjadi produk *digestate* yang stabil. Tahapan penelitian meliputi: (1) Karakterisasi bahan baku; (2) Pelaksanaan proses AD; (3) Karakterisasi produk akhir; dan (4) Analisis komparatif dengan SNI.

Penelitian dilaksanakan selama empat bulan (Maret-Juni 2025). Sampel *sludge* diambil dari fasilitas IPAL PT Karyadibya Mahardika, Pasuruan. Proses AD dilakukan di laboratorium internal, sedangkan analisis parameter kimia kompleks dilakukan di Balai Penerapan Modernisasi Pertanian (BPMP) Jawa Timur.

2.1 Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan adalah *sludge* IPAL dari unit SDB PT Karyadibya Mahardika, inokulum (starter) dari reaktor anaerobik aktif, akuades, dan reagen kimia untuk analisis laboratorium. Peralatan yang digunakan meliputi reaktor *batch* anaerobik (2 L), inkubator, timbangan analitik, pH meter, termometer, oven, *muffle furnace*, dan peralatan gelas laboratorium lainnya.

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dibagi menjadi tiga tahap utama.

1. *Tahap Pra-Eksperimen*: Sampel *sludge* diambil dari SDB dan dikarakterisasi awal untuk parameter fisik (Kadar Air, Total Solids/TS, Volatile Solids/VS) dan kimia (pH, C-organik, N-total, P-total, K-total, dan rasio C/N).
2. *Tahap Eksperimen (AD)*: Reaktor AD diisi dengan substrat (*sludge*) dan inokulum pada rasio S/I 2:1 berdasarkan VS. *Headspace* reaktor di-*flushing* dengan gas N_2 untuk menciptakan kondisi anaerob. Reaktor diinkubasi pada suhu mesofilik (35 ± 2 °C) selama 30 hari (*Hydraulic Retention Time*/HRT). Suhu dan pH dipantau secara berkala.
3. *Tahap Pasca-Eksperimen*: Setelah 30 hari, residu padat (*digestate*) dipanen, dikering-anginkan, dan dianalisis untuk parameter kualitas akhir yang sama dengan karakterisasi awal.

2.3 Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif dan komparatif. Efektivitas proses dievaluasi dengan membandingkan parameter sebelum dan sesudah AD. Kualitas produk akhir dibandingkan dengan standar SNI 19-7030-2004. Efisiensi reduksi VS dihitung dengan rumus:

$$\text{VS Reduction (\%)} = [(\text{VS}_{\text{in}} - \text{VS}_{\text{out}}) / \text{VS}_{\text{in}}] \times 100\% \quad (1)$$

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Awal Sludge IPAL

Karakteristik awal sludge penting untuk memahami potensinya sebagai substrat. Hasil analisis disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Karakteristik fisikokimia sludge IPAL sebelum proses ad

Parameter	Satuan	Hasil Analisis
Fisik		
Warna	-	Coklat Gelap
Kadar Air (KA)	%	78,0
Volatile Solids (VS)	% TS	65,0
Kimia		
pH	-	6,2
C-Organik	%	35,8
N-Total	%	0,8
P-Total (P ₂ O ₅)	%	0,4
K-Total (K ₂ O)	%	0,3
Rasio C/N	-	44,7:1

Sludge awal memiliki kandungan organik tinggi (VS 65,0%), menjadikannya substrat potensial untuk proses biologis [5]. Namun, rasio C/N yang sangat tinggi (44,7:1) dan pH yang sedikit asam (6,2) menunjukkan perlunya stabilisasi. Rasio C/N yang tinggi dapat menghambat dekomposisi karena defisiensi nitrogen bagi mikroorganisme [10]. Kondisi ini memperkuat justifikasi penggunaan AD untuk merombak karbon dan menstabilkan material.

3.2 Kinerja Proses dan Kualitas Kompos Akhir

Proses AD berjalan stabil selama 30 hari, ditandai dengan pH yang meningkat dan stabil pada rentang netral (6,8-7,2). Hal ini mengindikasikan proses metanogenesis berjalan baik [8]. Reduksi VS tercatat sebesar 48%, menunjukkan dekomposisi bahan organik yang efektif. Setelah proses AD dan pematangan, kualitas kompos akhir dievaluasi dan dibandingkan dengan standar SNI, seperti terlihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perbandingan Kualitas Kompos Akhir Dengan Standar SNI

Parameter	Satuan	Hasil Kompos	SNI 19-7030-2004	Status
Kadar Air	%	45,0	< 50	Memenuhi
pH	-	7,1	6,8–7,49	Memenuhi
Rasio C/N	-	20:1	15–25	Memenuhi
N-Total	%	1,6	> 0,40	Memenuhi
P ₂ O ₅	%	1,1	> 0,13	Memenuhi
K ₂ O	%	0,9	> 0,20	Memenuhi

Hasil analisis menunjukkan proses *upcycling* berhasil mentransformasi sludge mentah menjadi kompos matang yang memenuhi seluruh parameter kunci SNI. Perubahan paling signifikan adalah penurunan drastis rasio C/N dari 44,7:1 menjadi 20:1. Penurunan ini terjadi karena sebagian besar karbon diubah menjadi biogas, sementara nitrogen terkonservasi dalam digestate [9]. Rasio 20:1 menandakan kompos telah matang dan tidak akan menyebabkan imobilisasi nitrogen di tanah.

Selain itu, terjadi peningkatan konsentrasi unsur hara makro akibat efek pemekatan, di mana hilangnya massa karbon organik membuat unsur hara yang tersisa menjadi lebih terkonsentrasi [7].

Kandungan N, P, dan K pada kompos akhir jauh melampaui standar minimum SNI, menunjukkan produk ini berpotensi sebagai pupuk organik yang efektif.

3.3 Implikasi bagi Ekonomi Sirkular

Studi ini berhasil mendemonstrasikan kelayakan teknis dari penerapan model ekonomi sirkular pada pengelolaan limbah industri rokok. Proses *upcycling* sludge IPAL secara efektif mengubah limbah menjadi produk bernilai tambah (pupuk organik). Pendekatan ini menawarkan keuntungan strategis berupa pengurangan beban lingkungan, penciptaan nilai ekonomi, dan peningkatan citra keberlanjutan perusahaan, sejalan dengan paradigma ekonomi sirkular global [2].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pencernaan anaerobik (AD) merupakan metode yang sangat efektif untuk valorisasi sludge IPAL industri rokok, mampu mentransformasi limbah dengan rasio C/N tinggi menjadi material stabil.
2. Produk akhir dari proses *upcycling* ini adalah kompos berkualitas tinggi yang memenuhi seluruh parameter kunci SNI 19-7030-2004, dengan rasio C/N ideal (20:1) dan kandungan hara N, P, K yang jauh melampaui standar.
3. Studi ini mendemonstrasikan kelayakan model ekonomi sirkular untuk mengubah beban limbah industri rokok menjadi produk bernilai tambah, mendukung prinsip industri berkelanjutan.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan melakukan optimasi proses dalam skala pilot, uji aplikasi kompos pada tanaman (uji agronomi), serta analisis kandungan logam berat untuk menjamin keamanan produk jangka panjang.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Karyadibya Mahardika atas izin dan penyediaan sampel sludge serta kepada pihak laboratorium Balai Penerapan Modernisasi Pertanian (BPMP) Jawa Timur yang telah membantu dalam analisis sampel.

6. Daftar Pustaka

- [1] H. Hidayat and A. H. P. Hamzah, "Implementasi Konsep Ekonomi Sirkular Untuk Mewujudkan Industri Karet Remah Berkelanjutan," vol. 14, no. 01, pp. 1–15, 2024.
- [2] P. Suwignyo *et al.*, "Literature Review Model Circular Economy Dan Potensi," vol. 4, pp. 122–131, 2021.
- [3] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. Jan, "The Circular Economy e A new sustainability paradigm?," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 757–768, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [4] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppälä, "Circular Economy : The Concept and its Limitations," *Ecol. Econ.*, vol. 143, pp. 37–46, 2018, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.
- [5] Pertiwi, Ikayana, and Gaguk Apriyanto. "Pengaruh Kinerja Keuangan Terhadap Strategi Bisnis Di Era Society 5.0 Dengan Keunggulan Kompetitif Sebagai Variabel Intervening." *Jurnal Ekonomi Manajemen* 29.1 (2025).
- [6] Y. Kurniawati and N. Maqfiroh, "Analisis Effluent Limbah Cair PT DNP Indonesia. Pulogadung, Jakarta Timur," *J. Ilm. Kesehat.*, vol. 11, no. 1, pp. 64–72, 2019.
- [7] W. S. Mangoting, Y. M. Sari, and R. S. Sarungallo, "Efeksi Pengolahan Air Limbah padktivitas Penerapan Instalaa PT Geoservices Effectiveness of the Implementation of Wastewater Treatment Facilities at PT Geoseservice," vol. 2, pp. 12–22, 2024.
- [8] G. R. Cahyaningnugroho and E. N. Hidayah, "Potensi Pemanfaatan Lumpur Dari Proses Pengolahan Air Limbah Industri," *Nusant. Hasana J.*, vol. 3, no. 2, pp. 22–26, 2023.
- [9] M. F. Ummah and W. Herumurti, "Pengeringan Lumpur Ipal Biologis Pada Unit Sludge Drying Bed (SDB)," *J. Purifikasi*, vol. 18, no. 1, pp. 39–48, 2018.
- [10] V. K. Nguyen *et al.*, "Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge," *Fuel*, vol. 285, no. April 2020, p. 119105, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119105.
- [11] Stylianou, Marinos, et al. "Electrochemical treatment of cattle wastewater samples." *Waste and Biomass Valorization* 11 (2020): 5185-5196.
- [12] J. Kazimierowicz and D. Marcin, "Aerobic Granular Sludge as a Substrate in Anaerobic Digestion — Current Status and Perspectives," 2022.

- [13] P. Ghosh, G. Shah, S. Sahota, and L. Singh, *Biogas production from waste : technical overview , progress , and challenges*. INC, 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-821264-6.00007-3.
- [14] A. Singlitico, J. Goggins, and R. F. D. Monaghan, "Evaluation of the potential and geospatial distribution of waste and residues for bio-SNG production : A case study for the Republic of Ireland," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, no. September 2018, pp. 288–301, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.032.
- [15] A. Raheem *et al.*, "Opportunities and Challenges in Sustainable Treatment and Resource Reuse of Sewage Sludge : A Review," *Chem. Eng. J.*, 2017, doi: 10.1016/j.cej.2017.12.149.
- [16] A. N. Bimanto and K. Sa, "Di PT Energi Agro Pengolahan Limbah Spent Wash Dengan Metode Anaerobic Digestion Nusantara," vol. 6, no. 9, pp. 354–361, 2020.