

***Pemanfaatan Sampah Plastik Laut sebagai Sumber Energi: Tinjauan Teknologi dan Analisis Ekonomi***

**Urip Mudjiono, Catur Rakhmad Handoko, Annas Singgih Setiyoko,  
Hendro Agus Widodo, Joessianto Eko Poetro**  
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia  
Email: [urip@ppns.ac.id](mailto:urip@ppns.ac.id)

***Abstract***

*Marine plastic waste disrupts ecosystems and indicates a loss of potential energy in Indonesia. This study reviews three waste-to-energy (WtE) technologies: pyrolysis, gasification, and incineration. It is based on quantitative data analysis and economic evaluation. The energy potential, with a plastic calorific value of 43–46 MJ/kg and the efficiency parameters of each technology, was calculated using data on unmanaged plastic waste volume and leakage into the ocean. The results show that 3.22 million tons per year of mismanaged plastic could be incinerated to generate approximately 32,323 GWh of electricity. Conversely, plastic leakage into the ocean (0.48 to 1.29 million tons) has the potential to produce 4,818 to 12,949 GWh of electricity; gasification could yield 5,957 GWh from mismanaged plastic and 888 to 2,387 GWh from marine waste, while incineration could produce around 1,610 to 4,325 GWh from marine waste. Small-scale pyrolysis requires a larger initial investment but is capable of producing high-quality liquid fuel. Economic analysis shows that gasification has a payback period of approximately two years with an internal rate of return above 38%. The results indicate that pyrolysis is the most promising technology for utilizing marine plastic waste in Indonesia. However, its implementation requires regulations, infrastructure, and collaboration with national waste management programs.*

**Keywords:** *Marine Plastic Waste, Waste-To-Energy, Pyrolysis, Gasification, Incineration, Energy Potential, Economic Analysis.*

**A. Pendahuluan**

Produksi plastik global telah meningkat lebih dari 400 juta ton per tahun, namun hanya sekitar 9 % yang didaur ulang secara efektif<sup>1</sup>. Bahan plastik ini sulit terurai secara alami dan dapat terakumulasi di lingkungan selama ratusan tahun. Indonesia sebagai negara kepulauan dengan populasi lebih dari 275 juta jiwa menjadi salah satu penyumbang utama sampah plastik laut. Menurut studi terkini, Indonesia menghasilkan sekitar 42,1 juta ton sampah rumah tangga setiap tahunnya. Dari jumlah tersebut, sekitar 7,8 juta ton berupa sampah plastik, dan lebih dari

---

<sup>1</sup> Y. Zahrah, J. Yu, et X. Liu. « How Indonesia's Cities Are Grappling with Plastic Waste: An Integrated Approach towards Sustainable Plastic Waste Management », *Sustainability* 16, n° 10 (2024). <https://doi.org/10.3390/su16103921>.

58 % plastik tidak terkelola dengan baik <sup>2</sup>. Ketidakmampuan sistem dalam pengumpulan sampah menyebabkan sebagian besar plastik ini dibakar secara terbuka (47 %) atau dibuang ke TPA dan badan air <sup>3</sup>.

Jambeck dkk. memperkirakan bahwa Indonesia menghasilkan sekitar 3,22 juta ton plastik salah kelola per tahun; 83 % dari sampah plastik tersebut tidak terkelola, dan antara 0,48 sampai 1,29 juta ton bocor ke laut <sup>4</sup>. Laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menunjukkan bahwa total timbulan sampah nasional mencapai 68,5 juta ton pada 2022, menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan produksi sampah terbesar di kawasan <sup>5</sup>. Krisis ini diperparah oleh rendahnya tingkat daur ulang—kegiatan daur ulang formal hanya menyumbang ~10 % dari total plastik terkelola <sup>6</sup>.

Pemanfaatan sampah sebagai sumber energi terbarukan menjadi pendekatan menarik dalam menanggulangi persoalan sampah sekaligus mendukung ketahanan energi. Teknologi waste-to-energy (WtE) seperti pyrolysis, gasifikasi, dan insinerasi memungkinkan konversi sampah padat menjadi listrik atau bahan bakar. Pyrolysis menguraikan plastik pada suhu tinggi tanpa oksigen untuk menghasilkan minyak pirolisis dengan nilai kalor tinggi <sup>7</sup>; gasifikasi mengubah plastik menjadi gas sintesis yang dapat diolah menjadi listrik dengan yield sekitar 1850 kWh per ton plastik <sup>8</sup>; sementara insinerasi menghasilkan listrik 500–600 kWh per ton sampah melalui pembakaran langsung <sup>9</sup>.

Penelitian WtE di Indonesia masih terfokus pada sampah darat, sehingga potensi pemanfaatan sampah plastik laut belum banyak dikaji. Kajian ini bertujuan untuk: (1) menghitung potensi energi dari sampah plastik laut di Indonesia melalui pyrolysis, gasifikasi, dan insinerasi; (2) membandingkan efisiensi energi dan kelayakan ekonomi masing-masing teknologi; serta (3) memberikan rekomendasi kebijakan untuk implementasi WtE pada sampah laut. Dengan demikian, riset ini diharapkan memperkaya literatur pengelolaan sampah laut dan memberikan solusi integratif untuk masalah sampah dan energi di Indonesia.

---

<sup>2</sup> Zahrah, Yu, et Liu.

<sup>3</sup> Zahrah, Yu, et Liu.

<sup>4</sup> J. R. Jambeck et al. « Plastic waste inputs from land into the ocean », *Science* 347, n° 6223 (2015) : 768-71. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.

<sup>5</sup> A. Budiyarto, B. Clarke, et K. Ross. « Overview of waste bank application in Indonesian regencies », *Waste Management & Research* 43, n° 3 (2024) : 306-21. <https://doi.org/10.1177/0734242X241242697>.

<sup>6</sup> Jambeck et al., « Plastic waste inputs from land into the ocean ».

<sup>7</sup> P. K. Ghodke et al. « Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons », *Processes* 11, n° 1 (2023) : 71. <https://doi.org/10.3390/pr11010071>.

<sup>8</sup> B. Xu et al. « Advancing Sustainable Energy: Environmental and Economic Assessment of Plastic Waste Gasification for Syngas and Electricity Generation Using Life Cycle Modeling », *Energies* 17, n° 4 (2024) : 860-907.

<sup>9</sup> A. B. Zubair et al. « From Trash to Treasure: Systematic Evaluation of Potential and Efficiency of Waste-to-Energy Incineration for Electricity Generation », *Waste* 3, n° 4 (2023) : 39. <https://doi.org/10.3390/waste3040039>.

## B. Hasil

### Statistik Sampah Plastik dan Kebocoran ke Laut

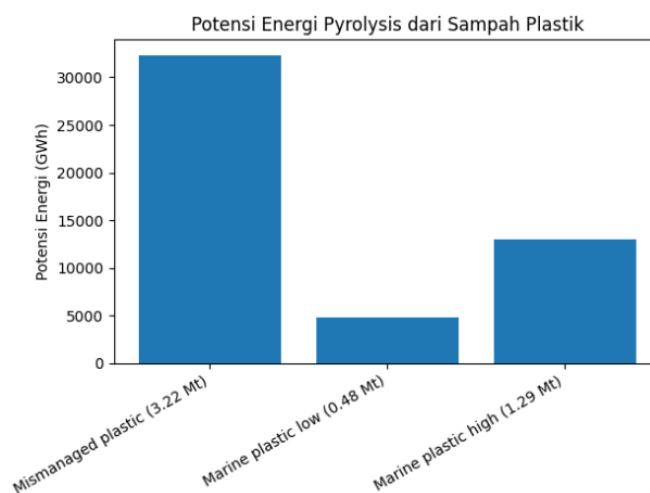
Tabel 1 menyajikan ringkasan data timbulan sampah nasional, jumlah sampah plastik, mismanaged plastic, dan kebocoran ke laut. Data menunjukkan bahwa dari 7,8 juta ton plastik yang dihasilkan setiap tahun, 3,22 juta ton tidak terkelola<sup>10</sup>. Kebocoran ke laut berkisar 0,48 hingga 1,29 juta ton per tahun<sup>11</sup>. Proporsi sampah plastik terhadap total timbulan sampah berkisar 17–19 %<sup>12</sup>.

**Tabel 1.** Ringkasan data sampah plastik Indonesia.

Parameter	Nilai
Timbulan sampah nasional (2022)	68,5 juta ton/tahun
Sampah plastik total	7,8 juta ton/tahun
Plastik salah kelola	3,22 juta ton/tahun
Kebocoran sampah plastik ke laut	0,48–1,29 juta ton/tahun
Persentase plastik tidak terkelola	58 %

### Potensi Energi dari Mismanaged Plastic

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa mismanaged plastic (3,22 juta ton) berpotensi menghasilkan energi listrik yang sangat besar melalui WtE. Dengan asumsi nilai kalor 44,61 MJ/kg dan efisiensi pyrolysis 81 %, potensi energi pyrolysis mencapai sekitar 32 323 GWh (setara 32,3 TWh) per tahun. Gasifikasi menghasilkan sekitar 5 957 GWh per tahun, sedangkan insinerasi hanya sekitar 1 771 GWh. Gambar 1 dan Gambar 2 memperlihatkan potensi energi dari pyrolysis dan gasifikasi untuk sampah plastik salah kelola serta rentang sampah laut.

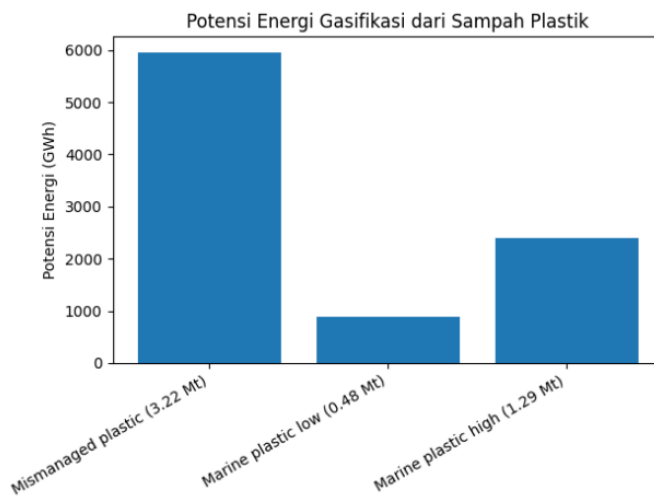


<sup>10</sup> Zahrah, Yu, et Liu, « How Indonesia's Cities Are Grappling with Plastic Waste: An Integrated Approach towards Sustainable Plastic Waste Management »; Jambeck et al., « Plastic waste inputs from land into the ocean ».

<sup>11</sup> Jambeck et al., « Plastic waste inputs from land into the ocean ».

<sup>12</sup> Budiarto, Clarke, et Ross, « Overview of waste bank application in Indonesian regencies ».

**Gambar 1.** Potensi energi pyrolysis dari mismanaged plastic dan sampah laut (rendah dan tinggi).



**Gambar 2.** Potensi energi gasifikasi dari mismanaged plastic dan sampah laut (rendah dan tinggi).

### Potensi Energi dari Sampah Plastik Laut

Untuk sampah plastik yang bocor ke laut, potensi energi bervariasi tergantung skenario. Pada batas bawah (0,48 juta ton/tahun), pyrolysis dapat menghasilkan sekitar 4 818 GWh, gasifikasi 888 GWh, dan insinerasi 264 GWh. Pada batas atas (1,29 juta ton/tahun), potensi energi pyrolysis mencapai 12 949 GWh, gasifikasi 2 386 GWh, dan insinerasi 711 GWh. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jumlah plastik yang bocor ke laut secara langsung mempengaruhi besarnya energi yang dapat diambil.

### Perbandingan Teknologi WtE

Tabel 2 merangkum perbandingan tiga teknologi WtE utama berdasarkan literatur. Pyrolysis memiliki yield energi tertinggi ( $\approx 9\,900$  kWh/ton) dan efisiensi 81 %, tetapi biaya investasi relatif besar dan perlu infrastruktur lanjutan untuk memurnikan minyak pirolisis. Gasifikasi menghasilkan 1 850 kWh/ton dengan payback period 2,06 tahun dan IRR 38,2 %<sup>13</sup>; emisi dapat dikendalikan melalui sistem pemurnian gas. Insinerasi paling sederhana, tetapi yield energi rendah (500–600 kWh/ton) dan menimbulkan emisi gas rumah kaca lebih tinggi.

**Tabel 2.** Perbandingan teknologi WtE untuk sampah plastik.

Teknologi	Yield energi	Efisiensi	Kelebihan	Kekurangan
-----------	--------------	-----------	-----------	------------

<sup>13</sup> Xu et al., « Advancing Sustainable Energy: Environmental and Economic Assessment of Plastic Waste Gasification for Syngas and Electricity Generation Using Life Cycle Modeling ».

Pyrolysis	~9 900 kWh/ton (oil to electricity) [4]	81 %	Menghasilkan minyak berkalori tinggi; emisi rendah; cocok untuk plastik campuran	Investasi tinggi; perlu fasilitas pemrosesan minyak
Gasifikasi	1 850 kWh/ton [5]	30–40 %	Payback period 2,06 tahun; IRR 38 %; syngas dapat diolah menjadi listrik atau bahan bakar	Emisi tar dan partikel; memerlukan pembersihan gas
Insinerasi	500–600 kWh/ton [6]	20–25 %	Teknologi paling matang dan sederhana; pengurangan volume sampah	Emisi CO <sub>2</sub> dan polutan; efisiensi rendah; isu penerimaan publik

### Analisis Ekonomi

Analisis pada fasilitas gasifikasi 50 ton/hari menunjukkan pendapatan tahunan sekitar USD 4,79 juta dengan OPEX USD 4,05 juta; payback period 2,06 tahun dan IRR 38,2 %<sup>14</sup>. Dengan asumsi pengolahan mismanaged plastic sebesar 50 ton/hari, fasilitas ini dapat menghasilkan 33,76 GWh listrik per tahun. Pyrolysis skala kecil (360 ton/tahun) menghasilkan 160 ton minyak pirolisis yang dapat dikonversi menjadi 500 MWh listrik dan 60 MWh panas, dengan investasi EUR 41 000 dan pendapatan EUR 45 000 per tahun, sehingga payback period sekitar satu tahun<sup>15</sup>. Insinerasi memiliki biaya investasi dan operasi relatif rendah namun revenue juga kecil karena yield energi rendah. Biaya eksternal emisi gasifikasi dihitung sebesar USD 26,43 per ton plastik<sup>16</sup>; pyrolysis menghasilkan emisi lebih rendah karena proses tanpa oksigen.

### C. Pembahasan

Hasil riset menunjukkan bahwa pemanfaatan sampah plastik laut sebagai sumber energi memiliki potensi signifikan, terutama melalui pyrolysis. Energi listrik 4 818–12 949 GWh per tahun dari sampah laut setara dengan sekitar 4–12 % total konsumsi listrik nasional (sekitar 100 TWh pada 2022). Jika dikombinasikan dengan pengolahan mismanaged plastic, potensi energi pyrolysis dapat mencapai 32 323 GWh, yang dapat memasok kebutuhan listrik rumah tangga di berbagai wilayah pesisir.

<sup>14</sup> Xu et al.

<sup>15</sup> Thuong, Kipuw, et Hermawan, « Harnessing Pyrolysis for Industrial Energy Autonomy and Sustainable Waste Management ».

<sup>16</sup> Xu et al., « Advancing Sustainable Energy: Environmental and Economic Assessment of Plastic Waste Gasification for Syngas and Electricity Generation Using Life Cycle Modeling ».

### **Implikasi Teknologi**

Pyrolysis menonjol karena efisiensi energi tinggi dan fleksibilitas bahan baku. Nilai kalor plastik (43–46 MJ/kg) setara dengan bahan bakar fosil<sup>17</sup>, sehingga minyak pirolisis dapat menggantikan diesel atau digunakan untuk pembangkit. Gasifikasi menawarkan keuntungan ekonomi dengan payback period cepat; syngas dapat digunakan untuk listrik atau diolah menjadi hidrogen. Insinerasi merupakan pilihan terakhir karena yield rendah dan isu emisi; namun teknologi ini dapat diterapkan pada lokasi dengan infrastruktur terbatas dan jumlah sampah besar.

### **Kelayakan Ekonomi dan Lingkungan**

Model ekonomi menunjukkan gasifikasi layak diterapkan secara komersial. Namun, pyrolysis skala industri membutuhkan investasi besar; dukungan pemerintah dan insentif fiskal diperlukan. Penerapan pyrolysis pada sampah laut juga menghadapi tantangan logistik (pengumpulan dan pembersihan plastik laut). Dari sisi lingkungan, pyrolysis dan gasifikasi memiliki jejak karbon lebih rendah dibandingkan insinerasi. Gasifikasi menghasilkan tar yang harus diolah; insinerasi menghasilkan abu dan emisi polutan, sehingga perlu sistem filtrasi canggih<sup>18</sup>.

### **Kebijakan dan Strategi Implementasi**

Untuk memaksimalkan potensi energi sampah plastik laut, Indonesia perlu mengintegrasikan program WtE dalam strategi pengelolaan sampah nasional. Pemerintah dapat mendorong investasi melalui skema public–private partnership, seperti yang telah dilakukan di TPPAS Benowo Surabaya<sup>19</sup>. Pemetaan hotspot sampah laut harus dilakukan untuk menentukan lokasi fasilitas WtE. Kebijakan insentif, seperti feed-in tariff khusus untuk energi dari sampah, dapat meningkatkan daya tarik investasi. Selain itu, program pengurangan sampah di sumbernya (reduce, reuse, recycle) tetap harus menjadi prioritas, sehingga WtE berperan sebagai opsi akhir (end-of-pipe) yang bernilai tambah.

### **Keterbatasan dan Agenda Riset Lanjut**

Penelitian ini menggunakan data sekunder dengan asumsi efisiensi teknologi konstan; variasi komposisi plastik laut dan kontaminan (misalnya biofouling) dapat mempengaruhi yield energi. Kajian lanjut perlu melakukan eksperimen laboratorium untuk menilai performa pyrolysis pada plastik laut yang terkontaminasi. Selain itu, analisis siklus hidup

---

<sup>17</sup> Ghodke et al., « Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons ».

<sup>18</sup> Zubair et al., « From Trash to Treasure: Systematic Evaluation of Potential and Efficiency of Waste-to-Energy Incineration for Electricity Generation ».

<sup>19</sup> Budiarto, Clarke, et Ross, « Overview of waste bank application in Indonesian regencies ».

(LCA) harus dilakukan untuk menilai dampak lingkungan secara menyeluruh dan membandingkan emisi WtE dengan alternatif pengelolaan sampah lainnya.

#### D. Kesimpulan

Kajian ini menegaskan bahwa sampah plastik laut di Indonesia merupakan sumber energi terbarukan yang belum dimanfaatkan secara optimal. Dengan memanfaatkan teknologi pyrolysis, gasifikasi, atau insinerasi, sampah plastik salah kelola dan sampah laut dapat dikonversi menjadi listrik dan bahan bakar. Pyrolysis memberikan potensi energi tertinggi, sementara gasifikasi menawarkan keseimbangan antara efisiensi energi dan kelayakan ekonomi. Insinerasi sebaiknya digunakan sebagai pelengkap ketika pilihan lain tidak tersedia. Untuk merealisasikan potensi ini, pemerintah perlu menetapkan regulasi yang mendukung investasi Waste-to-Energy (WtE), termasuk feed-in tariff dan insentif pajak, mengembangkan infrastruktur pengumpulan sampah laut dan logistik pemilahan, mengintegrasikan WtE dengan program pengurangan sampah dan daur ulang untuk mencapai target nasional pengurangan sampah 30% dan penanganan 70% pada 2025, melakukan sosialisasi dan edukasi publik terkait manfaat WtE serta dampaknya terhadap lingkungan, serta mendorong riset dan proyek percontohan pyrolysis untuk sampah laut di wilayah pesisir. Dengan langkah strategis tersebut, Indonesia dapat mengubah krisis sampah plastik laut menjadi peluang energi terbarukan, sekaligus mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.

#### Referensi

- Alqarzaee, F., & Ahmed, U. (2025). Techno-Economic Assessment of Power Generation from Waste Plastic Via Integrated Methane Reforming and Chemical Looping Technologies. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03283-3>
- Bramantiyo, R., Lestianingrum, E., & Cahyono, R. B. (2024). Utilization of Plastic Waste as an Alternative Fuel in Cement Industry for Improved Energy Sustainability. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 24(3), 321-327.
- Budiyarto, A., Clarke, B., & Ross, K. (2024). Overview of waste bank application in Indonesian regencies. *Waste Management & Research*, 43(3), 306-321. <https://doi.org/10.1177/0734242X241242697>
- Ghodke, P. K., Sharma, A. K., Moorthy, K., Chen, W.-H., Patel, A., & Matsakas, L. (2023). Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons. *Processes*, 11(1), 71. <https://doi.org/10.3390/pr11010071>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Kang, S., Byun, J., Kim, M., & Lee, S. (2025). Sustainable chemical processing of municipal plastic waste: Techno-economic and life cycle assessment of incineration, gasification, and pyrolysis oil production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 137, 652-664.
- Khoironi, A., Hadiyanto, H., & Anggoro, S. (2023). Economic feasibility study of pyrolysis technology for marine plastic waste conversion into fuel oil in coastal areas of Central Java. *Journal of Ecological Engineering*, 24(5), 189-198.

- Mallick, K., Sahu, A., Dubey, N. K., & Das, A. P. (2023). Harvesting marine plastic pollutants-derived renewable energy: A comprehensive review on applied energy and sustainable approach. *Journal of Environmental Management*, 345, 119371.
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. *Waste Management*, 131, 393-410.
- Purnomo, C. W., Kurniawan, W., & Aziz, M. (2024). Techno-economic analysis of waste-to-energy plant integrated with plastic waste preprocessing in Indonesia. *Energy Reports*, 11, 245-256.
- Rahmawati, S., & Syamsudin, M. (2023). Potensi energi listrik dari sampah plastik laut di perairan Bali: Studi kasus pirolisis skala pilot. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 156-165.
- Sari, G. L., & Trihadiningrum, Y. (2022). Marine plastic debris in Indonesia: A review on distribution, impacts, and conversion to energy. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113986.
- Thuong, J., Kipuw, A., & Hermawan, M. (2022). Harnessing Pyrolysis for Industrial Energy Autonomy and Sustainable Waste Management. *Sustainability*, 14(19), 12678. <https://doi.org/10.3390/su141912678>
- Xu, B., Yan, R., Chen, Y., Wang, Y., Wang, Q., & He, M. (2024). Advancing Sustainable Energy: Environmental and Economic Assessment of Plastic Waste Gasification for Syngas and Electricity Generation Using Life Cycle Modeling. *Energies*, 17(4), 860-907.
- Zahrah, Y., Yu, J., & Liu, X. (2024). How Indonesia's Cities Are Grappling with Plastic Waste: An Integrated Approach towards Sustainable Plastic Waste Management. *Sustainability*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/su16103921>
- Zhang, F., Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., & Zhang, P. (2024). Economic analysis of plastic waste gasification for power generation in coastal regions. *Energy Conversion and Management*, 301, 118045.
- Zubair, A. B., Ogunwusi, I. O., Zakariyya, A. M., & Bello, B. I. (2023). From Trash to Treasure: Systematic Evaluation of Potential and Efficiency of Waste-to-Energy Incineration for Electricity Generation. *Waste*, 3(4), 39. <https://doi.org/10.3390/waste3040039>