

Kajian Karakteristik *Municipal Solid Waste* dan Potensi *Waste to Energy* di Yogyakarta

M. Idris¹, Martomo Setyawan^{1*}, Siti Jamilatun¹, Hutri Puspita Sari¹, Lutfi Jihandari²

¹Departemen Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Jend. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, 55166, Indonesia

²Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang KM.21, Jatinangor, Sumedang, 45363, Indonesia

*Corresponding Author: martomo.setyawan@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Jumlah penduduk di Yogyakarta mencapai 3.668.719 jiwa yang dapat memproduksi *municipal solid waste* (MSW) sebesar 1.506,77 ton/hari, sehingga Yogyakarta menghadapi tantangan signifikan dalam pengelolaan MSW. Peningkatan volume MSW ini tidak hanya menjadi beban bagi sistem pengelolaan MSW yang ada, tetapi juga menimbulkan berbagai masalah lingkungan dan kesehatan bagi masyarakat jika tidak ditangani dengan baik. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur ini yang bertujuan untuk menganalisis komposisi dan karakteristik MSW, serta mengevaluasi berbagai teknologi *waste to energy* (WtE) yang potensial untuk diterapkan di daerah ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa MSW di Yogyakarta didominasi oleh sisa makanan sebesar 50,56%, kemudian diikuti oleh sampah plastik sebesar 27,94%, dan kertas/karton sebesar 13,63%. Komposisi ini mencerminkan pola konsumsi dan gaya hidup masyarakat perkotaan. Karakteristik fisik-kimia sampah bervariasi, dengan plastik memiliki nilai kalor tertinggi sebesar 30,7 MJ/kg, diikuti oleh karet/kulit sebesar 25,45 MJ/kg dan kertas/karton sebesar 12,4 MJ/kg. Variasi ini mempengaruhi potensi energi yang dapat dihasilkan dari berbagai jenis sampah sehingga pemilihan teknologi yang tepat untuk mengolah MSW menjadi energi sangat diperlukan untuk memaksimalkan potensi energi dari MSW. Teknologi WtE yang dibahas meliputi teknologi insinerasi, gasifikasi, pirolisis, *anaerobic digestion*, dan *dark fermentation*. Teknologi tersebut menghasilkan produk energi yang berbeda-beda seperti listrik, panas, *syngas*, bio-oil, biochar, biogas dan hidrogen. Implementasi teknologi WtE di Yogyakarta menghadapi tantangan seperti kebutuhan investasi besar, kompleksitas operasional, dan rendahnya tingkat pemisahan MSW di sumber. Sehingga proses optimalisasi pengelolaan MSW dan penerapan teknologi WtE di Yogyakarta memerlukan pendekatan terpadu yang mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan sosial, serta peningkatan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah.

Kata kunci: *Municipal solid waste*; Tantangan; Teknologi; *Waste to energy*; Yogyakarta.

ABSTRACT

The population of Yogyakarta reaches 3,668,719 people who can produce municipal solid waste (MSW) of 1,506.77 tons/day, so that Yogyakarta faces significant challenges in MSW management. The increase in MSW volume is not only a burden on the existing MSW management system, but also causes various environmental and health problems for the community if not handled properly. Therefore, this literature study was conducted which aims to analyze the composition and characteristics of MSW, as well as evaluate various waste to energy (WtE) technologies that have the potential to be applied in this area. The results of the analysis show that MSW in Yogyakarta is dominated by food waste of 50.56%, followed by plastic waste of 27.94%, and paper/cardboard of 13.63%. This composition reflects the consumption patterns and lifestyles of urban communities. The physical-chemical characteristics of waste vary, with plastic having the highest calorific value of 30.7 MJ/kg, followed by rubber/leather of 25.45 MJ/kg and paper/cardboard of 12.4 MJ/kg. This variation affects the potential energy that can be generated from various types of waste, so selecting the right technology to process MSW into energy is essential to maximize the energy potential of MSW. The WtE technologies discussed include incineration, gasification, pyrolysis, anaerobic digestion, and dark fermentation. These technologies produce different energy products such as electricity, heat, *syngas*, bio-oil, biochar, biogas, and hydrogen. The implementation of WtE technology in Yogyakarta faces challenges such as the need for large investments, operational complexity, and low levels of MSW separation at the source. Thus, the

process of optimizing MSW management and implementing WtE technology in Yogyakarta requires an integrated approach that considers technical, economic, and social aspects, as well as increasing community participation in waste management.

Keyword: *Municipal solid waste; Challenges; Technology; Waste to energy; Yogyakarta.*

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi di Provinsi Yogyakarta telah mengakibatkan peningkatan signifikan dalam produksi *municipal solid waste* (MSW) (Elsha & Budiarto, 2023). Dengan jumlah penduduk mencapai 3.668.719 jiwa pada tahun 2020 (BPS, 2020), Yogyakarta menghadapi tantangan besar dalam pengelolaan MSW yang dihasilkan setiap harinya. Data pada tahun 2023, provinsi ini menghasilkan sekitar 1.506,77 ton MSW per hari (SIPSN, 2023c), yang menggambarkan besarnya skala permasalahan yang dihadapi. Peningkatan volume MSW ini tidak hanya menjadi beban bagi sistem pengelolaan MSW yang ada, tetapi juga menimbulkan berbagai masalah lingkungan dan kesehatan masyarakat jika tidak ditangani dengan baik (Idris et al., 2024). Sistem pengelolaan MSW yang masih mengandalkan metode konvensional sudah ketinggalan zaman. Metode ini, yang dikenal sebagai skema "kumpul-angkut-buang" seperti yang terlihat pada gambar 1, hanya berfokus pada pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan MSW tanpa pengolahan lebih lanjut. Akibatnya, skema ini mempercepat proses penuhnya tempat pembuangan akhir (TPA) (Nanda et al., 2023).



Gambar 1. Skema konvensional dalam pengelolaan MSW.

TPA Piyungan sebagai lokasi utama pembuangan sampah di Yogyakarta, menjadi fokus perhatian dalam upaya pengelolaan MSW (Sihombing & Darmawan, 2020). Karakteristik MSW yang masuk ke TPA Piyungan sangat beragam, mencakup sampah organik, anorganik, dan berbagai jenis sampah lainnya (Nugraha et al., 2020). Pemahaman yang mendalam tentang komposisi dan karakteristik MSW ini menjadi kunci dalam mengembangkan strategi pengelolaan MSW yang efektif dan berkelanjutan. Dengan menganalisis jenis-jenis MSW yang masuk ke TPA dapat memberikan informasi tentang pola konsumsi masyarakat, efektivitas program daur ulang yang ada, serta potensi pemanfaatan sampah untuk berbagai keperluan (Elsha & Budiarto, 2023; Idris et al., 2024).

Selain itu, tren global menuju ekonomi sirkular dan pemanfaatan sumber daya terbarukan telah mendorong eksplorasi potensi *waste to energy* (WtE) (Nanda et al., 2023). MSW, yang sebelumnya dianggap sebagai masalah, kini dilihat sebagai sumber daya potensial untuk menghasilkan energi (Febriani et al., 2024; Idris et al., 2024). Teknologi seperti insinerasi, gasifikasi, pirolisis, *dark fermentation*, dan *anaerobic digestion* yang dapat mengubah MSW menjadi sumber energi terbarukan (Shovon et al., 2024; Sihombing & Darmawan, 2020). Teknologi ini tidak hanya membantu mengurangi

volume sampah yang masuk ke TPA, tetapi juga berkontribusi pada diversifikasi sumber energi dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil (Lisbona et al., 2023).

Dalam konteks Yogyakarta, pemanfaatan sampah sebagai sumber energi dapat menjadi solusi ganda untuk mengatasi masalah pengelolaan MSW dan kebutuhan energi (Elsha & Budiarto, 2023). Dengan tingginya volume MSW yang dihasilkan setiap hari, potensi energi yang dapat dihasilkan cukup signifikan. Misalnya, melalui teknologi *anaerobic digestion*, sampah organik dapat diubah menjadi biogas yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik atau bahan bakar kendaraan. Sementara itu, sampah anorganik yang tidak dapat didaur ulang bisa diproses melalui insinerasi untuk menghasilkan panas yang dapat dikonversi menjadi listrik (Jamilatun et al., 2023; Lisbona et al., 2023; Shovon et al., 2024).

Namun, implementasi teknologi konversi WtE memerlukan kajian mendalam tentang karakteristik MSW yang ada. Faktor-faktor seperti komposisi sampah, kadar air, nilai kalor, dan kandungan MSW perlu dianalisis secara cermat untuk menentukan teknologi yang paling sesuai dan efisien. Selain itu, aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan juga harus dipertimbangkan untuk memastikan keberlanjutan dan penerimaan masyarakat terhadap proyek-proyek WtE. Oleh karena itu paper ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik MSW di Yogyakarta dan potensi teknologi pengolahannya dengan harapan dapat menghasilkan model pengelolaan sampah yang terintegrasi. Diharapkan hasil dari paper ini dapat mendukung upaya Yogyakarta dalam mentransformasi pengelolaan sampah dari pendekatan konvensional menuju sistem pengelolaan berbasis ekonomi sirkular yang ramah lingkungan, sekaligus memberikan solusi alternatif untuk mengurangi beban TPA Piyungan dan menghasilkan energi terbarukan.

2. METODOLOGI

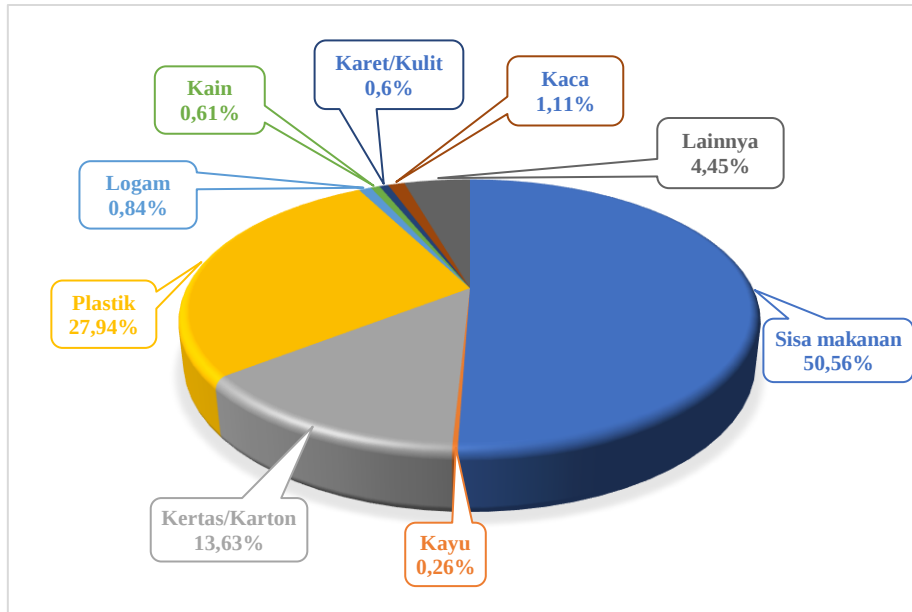
Penelitian ini merupakan studi literatur yang memanfaatkan data sekunder dari database akademik Google Scholar dan Scopus, fokus pada publikasi terkait MSW dan WtE. Pemilihan kedua platform ini didasarkan pada popularitasnya di kalangan peneliti. Kriteria inklusi dalam penelitian ini adalah jurnal ilmiah yang telah terpublikasi dari tahun 2012-2024, yang membahas potensi WtE dari MSW. Sementara itu, kriteria eksklusi mencakup jurnal ilmiah, baik nasional maupun internasional, yang diterbitkan sebelum tahun 2012 dan tidak ada kaitannya potensi WtE dari MSW. Untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas penelitian, peneliti menerapkan strategi metode "*snowball sampling*" dengan menelusuri referensi dan sitasi dari artikel yang ditemukan, serta melakukan pencarian umum melalui Google untuk mengakses regulasi, laporan, dan pedoman yang mungkin tidak tersedia dalam literatur ilmiah. Metode penelitian ini dirancang untuk meminimalisasi bias dalam pemilihan sumber dan memberikan gambaran komprehensif tentang topik penelitian ini. Dengan pendekatan metodologis yang sistematis dan ketat ini diharapkan dapat menghasilkan temuan penelitian yang dapat dipercaya dengan penyajian tinjauan yang menyeluruh dan seimbang mengenai topik yang dikaji dan memanfaatkan beragam sumber informasi untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang karakteristik MSW di Yogyakarta dan potensi pengelolaannya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

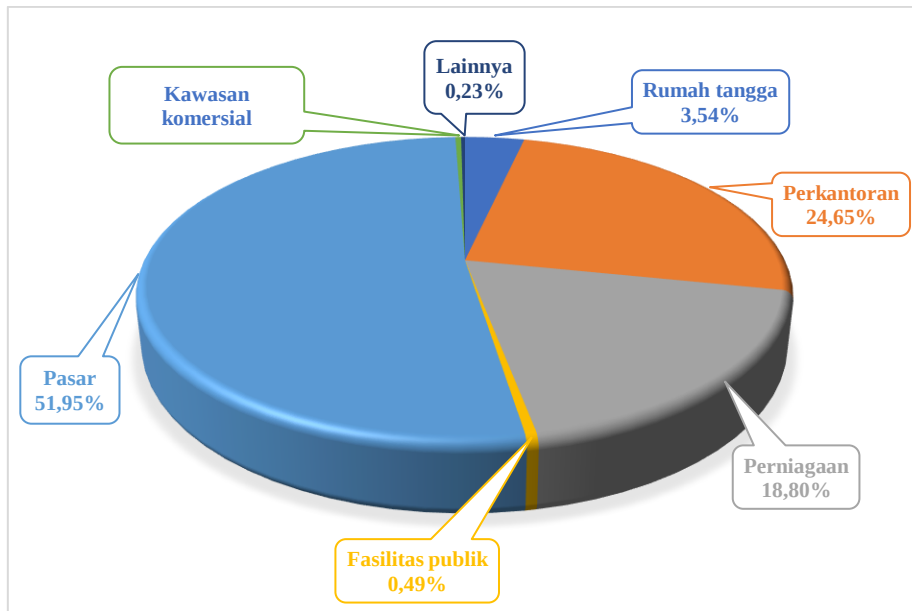
3.1 Komposisi MSW di Yogyakarta

Berdasarkan gambar 2. MSW di Yogyakarta didominasi oleh sisa makanan dengan proporsi sebesar 50,56% atau setara dengan 761,82 ton/hari yang menunjukkan tingginya jumlah sampah organik. Limbah makanan ini sangat cocok digunakan dalam proses pengolahan biologis seperti *anaerobic digestion* dan *dark fermentation* (Dastjerdi et al., 2019; Sharma et al., 2020). Sedangkan sampah plastik menempati urutan kedua terbanyak di Yogyakarta dengan 27,94%, kemudian diikuti oleh sampah kertas/karton sebesar 13,63%, kaca sebesar 1,11%, logam sebesar 0,84%, kain mencapai

0,61%, karet/kulit menyumbang 0,6% dan kayu sebesar 0,26%. Terdapat juga kategori “lainnya” yang mencapai 4,45%, mencakup berbagai jenis sampah yang tidak masuk dalam kategori utama. Data ini mencerminkan komposisi sampah yang beragam, dengan dominasi sampah organik dan plastik sebagai komponen terbesar setelahnya.



Gambar 2. Komposisi MSW berdasarkan jenisnya di Yogyakarta.
Sumber: (SIPSN, 2023a).



Gambar 3. Komposisi sampah berdasarkan sumbernya di Yogyakarta.
Sumber: (SIPSN, 2023b).

Komposisi MSW di Yogyakarta berdasarkan sumbernya ditunjukkan pada gambar 3. Sumber MSW merupakan salah satu faktor penting untuk menentukan karakteristik MSW (Qonitan et al., 2021). Diantara sektor-sektor seperti pasar secara signifikan merupakan sumber yang paling dominan berdasarkan persentase terhadap total timbulan MSW di semua kota. Menurut (Romianingsih, 2023), sumber utama MSW kota di Yogyakarta adalah sektor pasar, yang menghasilkan 51,95% atau setara

dengan 782,77 ton MSW dari total produksi per hari. Selain itu, Qonitan et al., (2021) menyebutkan bahwa daerah pemukiman, industri skala kecil, kawasan komersial, pasar, dan fasilitas umum adalah sumber utama timbulan MSW di Indonesia.

3.2 Karakteristik MSW di Yogyakarta

Analisis parameter fisik-kimia MSW seperti kadar air, *volatile matter*, *fixed carbon*, kadar abu, nilai kalor, dan komposisi unsur adalah kunci dalam mengevaluasi potensi pengolahan dan pemanfaatan MSW (Raharjo & Ariska, 2022; Zhou et al., 2014). Karakterisasi MSW di Yogyakarta tidak hanya menggambarkan tantangan pengelolaan, tetapi juga membuka peluang inovasi untuk pemanfaatan MSW sebagai sumber daya, baik untuk pemulihan material maupun konversi energi (Elsha & Budiarto, 2023). Karakteristik MSW di Yogyakarta ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik MSW di Yogyakarta.

Komposisi	Kadar air (%wt)	Volatile matter (%wt)	Fixed carbon (%db)	Kadar abu (%db)	Nilai kalor (MJ/kg)	C (%db)	H (%wt)	O (%wt)	N (%db)	S (%db)	Referensi
Sisa makanan	84,84	64,64	6,89	28,49	2,26	40,42	5,8	41,06	3,45	0,43	(Sevillano et al., 2021)
Kayu	40,15	67,74	24,15	8,12	2,24	44,53	5,08	39	0,9	0,12	(Soria-Verdugo et al., 2023)
Kertas/karton	38,93	44,94	19,26	35,8	12,4	33,34	5,81	42,24	1,98	0,32	(Elsha & Budiarto, 2023)
Plastik	17,89	88,09	4,07	7,84	30,7	61,44	10,98	10,6	-	-	(Gandidi et al., 2017)
Logam	6	-	-	94	-	-	-	-	-	-	(Dastjerdi et al., 2019)
Kain	41,72	82,84	12,34	4,83	-	58,78	4,46	36,54	1,84	0,13	(Elsha & Budiarto, 2023)
Karet/kulit	8,43	55,88	1,23	42,9	25,45	46,32	1,3	-	3,81	0,13	(Sihombing & Darmawan, 2020)
Kaca	3	-	-	97	-	-	-	-	-	-	(Dastjerdi et al., 2019)
Lainnya	-	-	-	-	-	51,27	5,74	40,58	1,95	0,44	(Elsha & Budiarto, 2023)

Berdasarkan tabel 1. sisa makanan memiliki kadar air tertinggi sebesar 84,84% dan *volatile matter* yang cukup tinggi yakni 64,64%, namun memiliki nilai kalor yang rendah yaitu 2,26 MJ/kg. Kayu dan kertas/karton memiliki kadar air sekitar 40% dengan nilai kalor yang berbeda-beda, 2,24 MJ/kg untuk kayu dan 12,4 MJ/kg untuk kertas/karton. Plastik menunjukkan karakteristik yang menarik dengan kadar air terendah 17,89%, *volatile matter* tertinggi 88,09%, dan nilai kalor yang tinggi 30,7 MJ/kg, menunjukkan potensi energi yang baik (Gandidi et al., 2017; Inayat et al., 2022). Karet/kulit memiliki kadar abu tertinggi yaitu 42,9% dengan nilai kalor yang cukup baik 25,45 MJ/kg. Komposisi kimia untuk MSW di Yogyakarta ini bervariasi, dengan plastik memiliki kandungan karbon tertinggi sebesar 61,44% dan sisa makanan memiliki kandungan oksigen tertinggi sebesar 41,06%. Variasi karakteristik ini mempengaruhi potensi pengolahan dan pemanfaatan energi dari MSW di Yogyakarta (Elsha & Budiarto, 2023; Sihombing & Darmawan, 2020).

3.3 Teknologi Konversi WtE

Pengelolaan MSW di Yogyakarta dapat mengadopsi teknologi biokimia seperti *dark fermentation* atau *anaerobic digestion* karena MSW yang didominasi oleh sampah organik, yang berasal dari pasar dan rumah tangga (Shovon et al., 2024). Namun, teknologi termokimia seperti insinerasi, pirolisis dan gasifikasi juga relevan untuk diterapkan, mengingat masih ada sekitar 49,18% MSW yang tidak dapat diolah dengan teknologi *dark fermentation* atau *anaerobic digestion*. Baik menggunakan teknologi biokimia ataupun termokimia, energi yang terkandung dalam MSW dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, bahan bakar, dan biogas. Pemanfaatan teknologi tersebut dapat mengurangi kebutuhan lahan pembuangan MSW dan memberikan manfaat ekonomi serta lingkungan secara berkelanjutan (Jamilatun et al., 2023; Lisbona et al., 2023). Tabel 2. menyajikan daftar teknologi yang digunakan untuk menghasilkan energi dari MSW. Setiap proses memiliki batasan dan kondisi tersendiri untuk produksi energi. Adapun skema teknologi WtE dapat dilihat pada gambar 4.

Tabel 2. Teknologi pengolahan MSW menjadi energi.

Teknologi	Suhu Operasi (°C)	Efisiensi Produksi Energi (%)	Produk Energi	Potensi Energi Panas (MJ/kg)	Referensi
Insinerasi	850-1200	21	Energi panas dan listrik	11,89	(Dastjerdi et al., 2019; Idris et al., 2024; Rhohman & Muslimim Ilham, 2019)
Gasifikasi	750-1500	35	Syngas, energi panas dan listrik,	12,16	(Chanthakett et al., 2021; Dastjerdi et al., 2019; Jurado et al., 2021; Shovon et al., 2024)
Pirolisis	300-800	20,5	Bio-oil, syngas, biochar, energi panas dan listrik,	8,91	(Aini et al., 2022; Dastjerdi et al., 2019; Gandidi et al., 2017; Jamilatun et al., 2023)
Anaerobic digestion	15-60	35	Biogas	3,4	(Dastjerdi et al., 2019; Nanda et al., 2023; Santos et al., 2019; Scarlat et al., 2015)
Dark fermentation	30-60	8,06-35,11	Hidrogen (H ₂), dan volatile fatty acid (VFA)	-	(Osman et al., 2020; Qu et al., 2022; Talapko et al., 2023)

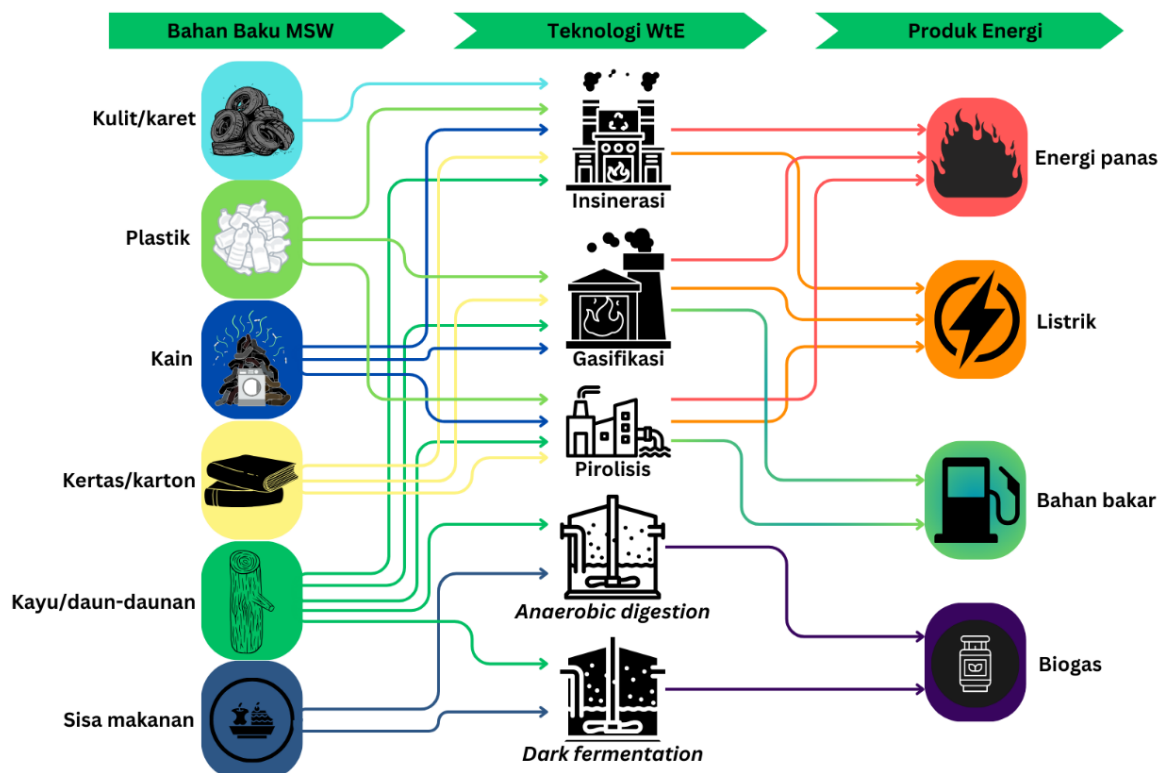
3.3.1 Insinerasi

Insinerasi adalah metode yang banyak diadopsi untuk mengubah MSW menjadi energi panas dengan tambahan O₂. Selama proses berlangsung, bahan baku dibakar pada suhu tinggi di atas 800°C, menghasilkan energi panas, gas, dan abu (Idris et al., 2024). Energi panas yang dihasilkan pada metode ini dapat dikonversi untuk menghasilkan listrik (Lisbona et al., 2023). Abu yang dihasilkan dari pembakaran dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan dan semen (Rhohman & Muslimim Ilham, 2019). Beberapa faktor mempengaruhi metode insinerasi MSW, antara lain komposisi, kadar air, nilai

kalor dan keberadaan unsur inert dalam sampah (Sihombing & Darmawan, 2020). Namun, pengoperasian pabrik insinerasi memerlukan pemantauan dan pengolahan gas buang, yang mengakibatkan peningkatan biaya, yang merupakan kelemahan signifikan dari metode ini (Lisbona et al., 2023).

3.3.2 Gasifikasi

Gasifikasi adalah metode yang mengubah MSW menjadi gas sintetis (*syngas*) melalui konversi termokimia pada suhu tinggi (Jamilatun et al., 2023; Sihombing & Darmawan, 2020). Proses gasifikasi terdiri dari beberapa tahap, termasuk penghilangan kelembaban melalui pengeringan, pelepasan komponen yang mudah menguap melalui pirolisis selama devolatilisasi, dan reaksi karbon dengan zat gasifikasi (udara, oksigen, atau uap) pada suhu antara 750-1500°C (Shovon et al., 2024). Komposisi *syngas* dapat berbeda berdasarkan bahan baku dan kondisi proses gasifikasi dan biasanya mengandung campuran CO, H₂, CH₄, CO₂, dan kontaminan seperti uap air, senyawa belerang, H₂S, dan NH₃ (Jurado et al., 2021). Misalnya, gasifikasi dengan menambahkan oksigen murni menghasilkan kombinasi CO dan hidrogen dengan sedikit nitrogen, sedangkan memanfaatkan udara sekitar akan menghasilkan bahan bakar gas dengan konsentrasi nitrogen tinggi dan sedikit daya pemanas (Chanthakett et al., 2021; Jurado et al., 2021). Gasifikasi menawarkan banyak manfaat, seperti keserbagunaan dalam menggunakan *syngas* untuk produksi listrik, bahan bakar, dan kimia (Chanthakett et al., 2021). Namun, tantangan yang masih perlu ditangani, seperti menyederhanakan operasi, meningkatkan kapasitas produksi ke kapasitas yang lebih besar (Shovon et al., 2024).



Gambar 4. Skema Teknologi Konversi WtE.

3.3.3 Pirolisis

Pirolisis adalah metode perlakuan termal yang beroperasi pada suhu 300–800°C tanpa tambahan oksigen. Teknik ini menghasilkan gas pirolisis, bio-oil dan biochar, dimana hasil dan kualitasnya

tergantung pada laju pemanasan, suhu proses, dan waktu tinggal (Jamilatun et al., 2022, 2023). Pada teknologi ini, komponen yang paling menarik adalah fraksi cairnya, yang dapat digunakan untuk membuat biofuel yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Selain itu, fraksi gas adalah gas sintesis yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi, seperti dalam proses gasifikasi. Biochar sebagai fraksi padatnya dapat digunakan sebagai pupuk pada industri pertanian dan dapat juga digunakan sebagai absorben (Aini et al., 2022; Jamilatun & Setyawan, 2012; Lisbona et al., 2023). Namun, tantangan yang dihadapi oleh para peneliti adalah biofuel yang dihasilkan dari proses pirolisis masih banyak mengandung kontaminasi, sehingga membutuhkan proses pembersihan sebelum digunakan. Selain itu, pirolisis MSW masih memerlukan penelitian lebih lanjut sehingga layak secara ekonomi (Gandidi et al., 2017).

3.3.4 Anaerobic Digestion

Anaerobic digestion adalah proses biologis di mana mikroorganisme mendegradasi sampah organik tanpa adanya oksigen, yang menghasilkan biogas yang kaya akan gas metana (Uddin et al., 2021). Komposisi biogas yang dihasilkan dari proses ini biasanya 50–75% CH₄, 25–50% CO₂, dan 1–15% gas lainnya misalnya, uap air, NH₃ dan H₂S (Nanda et al., 2023). Proses *anaerobic digestion* melalui serangkaian langkah untuk menguraikan sampah organik dan mengubahnya menjadi metana. Langkah pertama disebut "hidrolisis", dan itu terjadi ketika senyawa organik kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lemak dalam limbah dipecah menjadi zat organik terlarut seperti gula, asam amino, dan asam lemak. Kemudian masuk ke proses fermentasi, molekul organik terurai menjadi asam asetat, H₂, dan CO₂. Langkah terakhir adalah metanogenesis, yaitu proses pembuatan gas metana. Gas metana adalah sumber energi yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik (Dastjerdi et al., 2019; Santos et al., 2019). Menurut studi yang dilakukan Scarlat et al., (2015), menyebutkan bahwa 1 ton sampah organik dapat melepaskan sekitar 150 kg gas metana dengan komposisi 60% bahan organik dan 40% kadar air dengan menggunakan teknologi ini. Namun, tantangan utama pada proses *anaerobic digestion* adalah durasi respons mikroba yang biasanya sekitar 20-40 hari (Nanda et al., 2023).

3.3.5 Dark Fermentation

Dark fermentation adalah proses biologis untuk menghasilkan energi yang berlangsung tanpa kehadiran cahaya (Kargi et al., 2012; Osman et al., 2020). Proses ini memanfaatkan bahan organik untuk memproduksi hidrogen dengan bantuan organisme hidup, mengubah energi biologis menjadi bentuk energi lain (Esercizio et al., 2021). Bioreaktor sering digunakan dalam teknologi ini karena biaya operasionalnya yang rendah (Mona et al., 2020). Metode ini menawarkan beberapa keuntungan, seperti produksi hidrogen dari limbah organik dan pengendalian limbah biologis yang berpotensi mencemari lingkungan (Osman et al., 2020). Selain itu, *dark fermentation* dapat memanfaatkan air limbah sebagai bahan baku, sehingga turut berkontribusi dalam pengolahan air limbah (Talapko et al., 2023). Biaya produksinya relatif rendah berkat ketersediaan limbah organik yang melimpah dan murah dibandingkan dengan bahan baku hidrogen lainnya. Namun, kelemahan dari metode ini adalah kapasitas produksi hidrogen yang lebih rendah dibandingkan dengan metode lain (Qu et al., 2022). Meskipun begitu, *dark fermentation* tetap dianggap ramah lingkungan karena menghasilkan lebih sedikit polutan selama prosesnya (Shovon et al., 2024).

3.4 Tantangan Pengaplikasian WtE di Yogyakarta

Pengaplikasian teknologi WtE untuk pengolahan MSW di Yogyakarta memiliki tantangan yang kompleks. Insinerasi dan gasifikasi membutuhkan investasi awal yang besar dan biaya operasional tinggi, serta memerlukan pemantauan ketat terhadap emisi untuk mencegah dampak lingkungan (Lisbona et al., 2023). Pirolisis, meskipun mampu menghasilkan bahan bakar cair, membutuhkan

teknologi canggih dan kontrol suhu tinggi, yang membuat pengoperasiannya lebih rumit dan mahal (Gandidi et al., 2017). Di sisi lain, *anaerobic digestion* dan *dark fermentation*, meski lebih ramah lingkungan dan cocok untuk limbah organik, namun memiliki keterbatasan dalam kapasitas produksi energi dan bergantung pada pasokan limbah organik berkualitas secara konsisten (Nanda et al., 2023; Shovon et al., 2024).

Tantangan lain muncul dari rendahnya tingkat pemisahan MSW di sumber, seperti pemisahan pada sektor rumah tangga sehingga dapat menurunkan efisiensi proses konversi. Terbatasnya infrastruktur pendukung dan fasilitas pemrosesan MSW juga menjadi hambatan dalam penerapan teknologi ini secara optimal. Selain itu, kapasitas TPA Piyungan yang hampir penuh dan keterbatasan lahan di sekitarnya memperburuk kondisi, memaksa pemerintah dan pengelola sampah mencari solusi berkelanjutan dengan cepat (Elsha & Budiarto, 2023; Sihombing & Darmawan, 2020). Di tengah pertumbuhan populasi dan peningkatan volume MSW, keterlibatan masyarakat dalam memilah dan mengelola sampah juga perlu ditingkatkan agar teknologi WtE dapat diimplementasikan secara efektif dan berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Yogyakarta menghasilkan MSW sebesar 1.506,77 ton/per hari, dengan karakteristik yang didominasi oleh sampah organik, terutama sisa makanan sebesar 50,56%, diikuti oleh plastik 27,94% dan kertas/karton 13,63%. Komposisi ini mempengaruhi karakteristik fisik-kimia sampah, seperti kadar air, *volatile matter*, dan nilai kalor, yang bervariasi antar jenis sampah. Plastik memiliki potensi energi tertinggi dengan nilai kalor 30,7 MJ/kg, sementara sampah organik memiliki kadar air tinggi namun nilai kalor rendah. Berbagai teknologi WtE seperti insinerasi, gasifikasi, pirolisis, *anaerobic digestion*, dan *dark fermentation* dapat diaplikasikan untuk mengolah MSW menjadi energi, masing-masing dengan kelebihan dan tantangannya sendiri. Namun, penerapan teknologi WtE di Yogyakarta menghadapi berbagai tantangan, termasuk kebutuhan investasi besar, kompleksitas operasional, dan masalah pemisahan sampah di sumber. Optimalisasi pengelolaan MSW dan implementasi teknologi WtE di Yogyakarta memerlukan pendekatan terpadu yang mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan sosial, serta peningkatan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah, terutama mengingat volume MSW yang signifikan yang dihasilkan setiap harinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, N. A., Jamilatul, S., & Pitoyo, J. (2022). Pengaruh Tipe Biomassa pada Produk Pirolisis : A Review. *Agroindustrial Technology Journal*, 6(1), 89–101. <https://doi.org/10.21111/atj.v6i1.7559>
- BPS. (2020). *Sensus Penduduk 2020*. Badan Pusat Statistik. Diakses dari: <https://sensus.bps.go.id/main/index/sp2020>
- Chanthakett, A., Arif, M. T., Khan, M. M. K., & Oo, A. M. T. (2021). Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste. *Journal of Environmental Management*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112661>
- Dastjerdi, B., Strezov, V., Kumar, R., & Behnia, M. (2019). An evaluation of the potential of waste to energy technologies for residual solid waste in New South Wales, Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109398>
- Elsha, W., & Budiarto, R. (2023). Comparative Study of Waste to Energy (WtE) Technology in Municipal Solid Waste Management (MSWM) in Yogyakarta. *Journal of Industrial Engineering and Education*, 1(2), 53–65. <https://jieee.bksti.org/index.php/iee/article/view/19>

- Esercizio, N., Lanzilli, M., Vastano, M., Landi, S., Xu, Z., Gallo, C., Nuzzo, G., Manzo, E., Fontana, A., & D'Ippolito, G. (2021). Fermentation of biodegradable organic waste by the family thermotogaceae. *Resources*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/resources10040034>
- Febriani, A. V., Idris, M., & Hakim, L. (2024). Tranformasi Minyak Jelantah menjadi Renewable Energy Dalam Perspektif Al Islam dan Kemuhammadiyah. *Jurnal Kemuhammadiyah dan Integrasi Ilmu*, 2(2), 193-202.
- Gandidi, I. M., Susila, M. D., & Pambudi, N. A. (2017). Production of valuable pyrolytic oils from mixed Municipal Solid Waste (MSW) in Indonesia using non-isothermal and isothermal experimental. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 357–361. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.003>
- Idris, M., Setyawan, M., & Mufrodi, Z. (2024). Teknologi Insinerasi Sebagai Solusi Pengolahan Sampah Perkotaan dan Pemulihan Energi : A Review. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2024, April*. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/22490/10451>
- Idris, M., Setyawan, M., & Suharto, T. E. (2024). Effect of Flow Rate Ratio of Air and Waste Cooking Oil on Combustion Temperature and Furnace Efficiency. *Eksergi*, 22(1), 25-32.
- Inayat, A., Rocha-Meneses, L., Ghenai, C., Abdallah, M., Shanableh, A., Al-Ali, K., Alghfeli, A., & Alsuwaidi, R. (2022). Co-pyrolysis for bio-oil production via fixed bed reactor using date seeds and plastic waste as biomass. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101841>
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., Amelia, S., Ma'arif, A., Hakika, D. C., & Mufandi, I. (2022). Experimental Study on The Characterization of Pyrolysis Products from Bagasse (Saccharum Officinarum L.): Bio-oil, Biochar, and Gas Products. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 7(3), 565–582.
- Jamilatun, S., Pitoyo, J., & Setyawan, M. (2023). Technical, Economic, and Environmental Review of Waste to Energy Technologies from Municipal Solid Waste. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 581–593. <https://doi.org/10.14710/jil.21.3.581-593>
- Jamilatun, S., & Setyawan, M. (2012). Kondensasi Asap Pirolisis Tempurung Kelapa Menjadi Asap Cair (Liquid Smoke) Berbasis pada Luas Transfer Perpindahan Panas. *Symposium in Industrial Technology*, 25–32.
- Jurado, L., Papaefthimiou, V., Thomas, S., & Roger, A. C. (2021). Upgrading syngas from wood gasification through steam reforming of tars over highly active Ni-perovskite catalysts at relatively low temperature. *Applied Catalysis B: Environmental*, 299, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120687>
- Kargi, F., Eren, N. S., & Ozmihci, S. (2012). Bio-hydrogen production from cheese whey powder (CWP) solution: Comparison of thermophilic and mesophilic dark fermentations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(10), 8338–8342. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.162>
- Lisbona, P., Pascual, S., & Pérez, V. (2023). Waste to energy: Trends and perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100494>
- Mona, S., Kumar, S. S., Kumar, V., Parveen, K., Saini, N., Deepak, B., & Pugazhendhi, A. (2020). Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): A review. *Science of the Total Environment*, 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138481>

- Nanda, M. A., Sugandi, W., Wijayanto, A. K., Imantho, H., Sutawijaya, A., Nelwan, L. O., Budiastira, I. W., & Seminar, K. B. (2023). The Waste-to-Energy (WtE) Technology to Support Alternative Fuels for Agriculture in the Context of Effective Solid Waste Management in the Jabodetabek Area, Indonesia. *Energies*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/en16247980>
- Nugraha, C. S., Darda, A. A., & Hermawan, W. F. (2020). Pengelolaan Sampah Melalui Empowerment Masyarakat dengan Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Teknik Thermal Converter di DI TPST Piyungan. *Jurnal Ilmiah Penalaran Dan Penelitian Mahasiswa*, 4(1), 20–28. <https://tirto.id/tpst-piyungan-jogjakarta->
- Osman, A. I., Deka, T. J., Baruah, D. C., & Rooney, D. W. (2020). Critical challenges in biohydrogen production processes from the organic feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 8383–8401. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00965-x/Published>
- Qonitan, F. D., Suryawan, I. W. K., & Rahman, A. (2021). Overview of Municipal Solid Waste Generation and Energy Utilization Potential in Major Cities of Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1858(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012064>
- Qu, X., Zeng, H., Gao, Y., Mo, T., & Li, Y. (2022). Bio-hydrogen production by dark anaerobic fermentation of organic wastewater. *Frontiers in Chemistry*, 10(September), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.978907>
- Raharjo, S., & Ariska, Z. A. (2022). Analysis on Waste to Energy Potential of Padang Municipal Solid Waste for Sustainable Future. *Jurnal Presipitasi*, 19(2), 280–289.
- Rhohman, F., & Muslimim Ilham, M. (2019). Analisa dan Evaluasi Rancang Bangun Insinerator Sederhana dalam Mengelola Sampah Rumah Tangga. *Jurnal Mesin Nusantara*, 2(1), 52–60.
- Romianingsih, N. P. W. (2023). Waste to energy in Indonesia: opportunities and challenges. *Journal of Sustainability, Society, and Eco-Welfare*, 1(1), 60–69. <https://doi.org/10.61511/jssew.v1i1.2023.180>
- Santos, R. E. dos, Santos, I. F. S. dos, Barros, R. M., Bernal, A. P., Tiago Filho, G. L., & Silva, F. das G. B. da. (2019). Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management*, 231, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>
- Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Mofor, L. (2015). Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1269–1286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>
- Sevillano, C. A., Pesantes, A. A., Peña Carpio, E., Martínez, E. J., & Gómez, X. (2021). Anaerobic digestion for producing renewable energy-the evolution of this technology in a new uncertain scenario. *Entropy*, 23(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/e23020145>
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>
- Shovon, S. M., Akash, F. A., Rahman, W., Rahman, M. A., Chakraborty, P., Hossain, H. M. Z., & Monir, M. U. (2024). Strategies of managing solid waste and energy recovery for a developing country – A review. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24736>

- Sihombing, A. L. S. M., & Darmawan, R. (2020). Municipal Solid Waste Characteristic and Energy Potential in Piyungan Landfill. *Applied Mechanics and Materials*, 898, 58–63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.898.58>
- SIPSN. (2023a). *Komposisi Sampah Berdasarkan Jenisnya di Yogyakarta*. Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. Diakses dari: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- SIPSN. (2023b). *Komposisi Sampah Berdasarkan Sumbernya di Yogyakarta*. Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. Diakses dari: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/sumber>
- SIPSN. (2023c). *Timbulan Sampah Yogyakarta*. Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan. Diakses dari: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/timbulan>
- Soria-Verdugo, A., Cano-Pleite, E., Passalacqua, A., & Fox, R. O. (2023). Effect of particle shape on biomass pyrolysis in a bubbling fluidized bed. *Fuel*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127365>
- Talapko, D., Talapko, J., Erić, I., & Škrlec, I. (2023). Biological Hydrogen Production from Biowaste Using Dark Fermentation, Storage and Transportation. *Energies*, 16(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en16083321>
- Uddin, M. N., Siddiki, S. Y. A., Mofijur, M., Djavanroodi, F., Hazrat, M. A., Show, P. L., Ahmed, S. F., & Chu, Y. M. (2021). Prospects of Bioenergy Production From Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini Review. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.627093>
- Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., & Zhang, Y. (2014). An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 36, pp. 107–122). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.024>