

KARAKTERISTIK RDF DARI SAMPAH KOTA TERSELEKSI YANG DIHASILKAN OLEH PYROLYSER ULIR

Dwi Aries Himawanto

Jurusan Teknik Mesin FT Universitas Sebelas Maret / Jl. Ir. Sutami no. 36A
Surakarta Indonesia

E mail: dwiarieshimawanto@gmail.com

Abstrak

Artikel ini membahas mengenai alternatif pengolahan sampah kota sebagai salah satu upaya untuk memecahkan permasalahan pengolahan sampah kota yang dari sisi kuantitas semakin banyak dengan jalan mengubah sampah kota tersebut menjadi energi melalui salah satu alternatif teknologi wastes to energy yaitu melalui teknologi pirolisis. Tujuan dari artikel ini adalah untuk menemukan kondisi temperatur slow pyrolysis yang sesuai dari sampah kota terseleksi (segregated Municipal Solid Wastes (MSW)) guna menghasilkan bahan bakar padat alternatif berupa RDF (Refused Derived Fuel) secara berkesinambungan dengan menggunakan screw pyrolyser. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka dilakukan rekayasa peralatan proses slow pyrolysis secara berkesinambungan dalam skala laboratorium dengan menggunakan screw pyrolyser yang tepat agar menghasilkan Refused Derived Fuel yang memiliki karakteristik produk minimal sama dengan hasil studi sebelumnya. Penelitian dilakukan dengan 5 (lima) variasi temperatur reaktor yaitu 300°C, 350°C, 400°C, 450°C dan 500°C. Dari hasil penelitian yang dilakukan didapatkan prototipe pyrolyser ulir dengan kemampuan proses 6 kg/jam, dengan produk char yang dihasilkan terbaik didapatkan pada komposisi 70 % sampah organik yang dipirolisa pada temperatur pyrolyser 450°C. Char yang dihasilkan mengandung kadar air 1,77 %, kadar abu 9,66 %, volatile matter 66,387 % dan karbon tetap 22,17% serta memiliki nilai kalor 6,86 kkal/gram. Efisiensi proses yang didapatkan berkisar 95,3%.

Kata kunci : sampah kota terseleksi, refused derived fuel, temperatur reaktor, screw pyrolyser

Abstract

This article discusses alternative municipal waste processing as an effort to solve the problem of urban waste processing which is increasing in quantity by converting municipal waste into energy through one of the alternative wastes to energy technologies, i.e pyrolysis technology. The purpose of this article is to find the appropriate slow pyrolysis temperature conditions from selected municipal solid wastes (segregated municipal solid wastes) to produce alternative solid fuels (Refused Derived Fuel) using a screw pyrolyser. To achieve the main objective, then the purpose of the study is specifically detailed to find a design technology pyrolysis slow continuous laboratory-scale system with the proper screw pyrolyser so that the resulting RDF that has at least the same thermal characteristics of the results of previous studies. The studies done with five reactor temperature variations i.e 300°C, 350°C, 400°C, 450°C and 500°C. This study used a prototype screw pyrolyser which have 6 kg/h capacity, and the optimum char products obtained on the composition of organic waste 70% - 30% inorganic waste, which pyrolyses on the condition of the reactor temperature of 450°C. Char which produced contains 1.77% moisture content, 9.66% ash content, 66.38 % volatile matter and 22.17% fixed carbon and has a heating value of 6.86 kcal/gram. Random pyrolysis process for the above condition is 95.3%..

Key words : segregated municipal solid wastes, refused derived fuel, reactor temperature, screw pyrolyser

PENDAHULUAN

Pengolahan sampah kota (MSW, municipal solid wastes) adalah salah satu permasalahan yang dihadapi masyarakat dewasa ini. Permasalahan yang muncul adalah meningkatnya biaya operasional seiring dengan semakin bertambahnya kapasitas sampah yang harus ditangani disisi lain terdapat permasalahan dalam hal

penempatan tempat pembuangan akhir sampah dan pengolahannya yang bila tidak segera diatasi akan memunculkan permasalahan yang serius terhadap lingkungan. Pengolahan sampah kota dapat dikategorikan kedalam 2 kelompok, yaitu sampah organik dan non organik, dimana kasus di Indonesia dan beberapa negara berkembang lainnya, penanganan terhadap problem sampah kota

tersebut dilakukan dengan jalan menimbun dan melakukan pembakaran sampah secara terbuka pada lingkungan terbuka di tempat pembuangan akhir sampah. Penanganan tersebut diatas belum mampu mengurangi sampah hingga 100% dan justru akan memunculkan permasalahan baru berupa munculnya polutan pencemari lingkungan seperti gas-gas hasil pembakaran seperti karbondioksida, NO_x , SO_2 , dan lain-lain.

Karakteristik sampah yang dihasilkan di Indonesia, cukup berbeda dengan karakteristik sampah di luar negeri dimana estimasi jumlah timbulan sampah di Indonesia pada tahun 2020 diperkirakan mencapai 37,49 juta ton/tahun dengan komposisi terbesar adalah sampah organik/sisa makanan (39,6%), sampah plastik (17%), sampah kertas/karton (12,1%) dan sampah kayu (14%). (sumber data : Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2020, sumber alamat laman <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn> akses tanggal 19 Juli 2021 pukul 20.31). Dari data tersebut, tampak bahwa sekitar 70 % sampah yang dihasilkan di Indonesia berjenis biomassa. Sebagai perbandingan potensi timbulan sampah kota di Kota Rajshahi Bangladesh adalah sebesar 358,19 ton/hari dan dari potensi timbulan tersebut diperkirakan dapat dikonversi menjadi listrik sebesar 159,40 MWh/hari. (Habib et al., 2021). Pengolahan sampah menjadi sumber energi juga dipandang menjadi pilihan yang tepat untuk pembuangan limbah di kota-kota Afrika (Makarichi et al., 2019). Sementara itu alternatif *wastes to energy* juga dipandang tepat untuk pengolahan sampah di Quito, Ekuador. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *MSW* kota Quito mengandung 69,3% sampah biodegradable dan 30,7% sampah non-biodegradable. Potensi energi yang dihitung melalui metoda termokimia dan biokimia masing-masing adalah 5970 kWh/tMSW dan 62 kWh/tMSW dan potensi pembangkit listrik diperkirakan masing-masing sebesar 0,78 dan 0,07 MW/tMSW untuk proses biokimia dan termokimia. (Moya, Aldás, López, et al., 2017).

Pirolisis *MSW* juga dianggap sebagai salah satu teknologi yang berkelanjutan untuk mengatasi permasalahan gagal insinerasi sampah di Malaysia yang disebabkan oleh karena tingginya kadar air sampah. Volume limbah dapat dikurangi secara signifikan melalui pirolisis juga sebagai produk bernilai tambah (*bio-oil*, *bio-char* dan *syn-gas*) (Chua

et al., 2019). Sementara itu permasalahan di sektor persampahan perkotaan tetap menjadi tantangan yang harus dipecahkan oleh pemerintah Indonesia dan alternatifnya adalah mengolah sampah menjadi bahan bakar (Qonitan et al., 2021). Pilihan metode termokimia pengolahan *MSW* menjadi energi terdiri atas proses gasifikasi, pirolisis, *torrefaction*, dan karbonisasi hidrotermal (Matsakas et al., 2017).

Namun demikian syarat utama untuk mengubah sampah menjadi sumber energi adalah pemisahan sampah (Alzate et al., 2019). Setelah dipisah, dipilih dan dipilah maka akan dilakukan pengolahan lebih lanjut, dimana dalam konsep pengelolaan sampah kota maka terdapat konsep TPA *mining*, yang menjelaskan bahwa pengolahan sampah di tempat pembuangan sampah diutamakan bahwa sampah tersebut dapat digunakan kembali nanti sebagai bahan sekunder atau Waste to Material (WtM), dan jika tidak mungkin, maka konsep pengolahan selanjutnya adalah *Wastes to Energy* (WtE) (Uche-Soria & Rodríguez-Monroy, 2019). Meskipun metoda *waste to energy* melalui teknologi insinerasi, pirolisis dan gasifikasi cukup efisien dan memberikan hasil yang tinggi tetapi dipandang dapat merusak lingkungan yang berupa emisi gas berbahaya yang tentunya menimbulkan pemanasan global dan efek rumah kaca. (A et al., 2020). Hal lain yang perlu diwaspadai terkait dengan proses pirolisis sampah kota adalah produk cair dari pirolisis lambat *MSW* fraksi organik dikarenakan suhu proses pirolisis merupakan faktor dominan yang mempengaruhi toksisitas dan *COD* dari produk cair. Semakin tinggi suhu pemrosesan, semakin tinggi toksisitas tetapi semakin rendah konten *COD*. (Yang et al., 2018).

Untuk permasalahan sampah di Indonesia, pemerintah Indonesia telah berupaya menjalankan Program *3R* (*Reduce, Reuse and Recycle*) dan *WTE* (*Waste to Energy*) secara bersamaan. Program *3R* bertujuan untuk mengurangi jumlah sampah, sedangkan program *WTE* bertujuan untuk menghasilkan listrik sebagai sumber energi alternatif. Untuk tujuan tersebut telah dikembangkan model *goal programming* dan diselesaikan dengan menggunakan LINGO 11. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proporsi sampah yang optimal melalui program *3R* (*Reduce, Reuse and Recycle*) adalah 49,90% melalui program *WTE* 12,37%. Ini masih

menyisakan sampah yang tidak terolah. Listrik yang dihasilkan dari program *WTE* mencapai 1.229.695 GWh, total emisi yang dapat dihemat adalah 1.809.208,2 ton setara CO₂ dan total penggunaan lahan untuk program tersebut adalah 4.036.239,1 m². Kajian ini dilanjutkan dengan melakukan beberapa kebijakan, yaitu menambah alokasi anggaran program *WTE*, memperketat batas total emisi dari pengelolaan sampah dan mengurangi batas penggunaan lahan untuk pengolahan sampah (Farizal et al., 2018). Sementara itu (Pasek et al., 2013) menyatakan bahwa konversi limbah ke energi (*WTE*) atau energi dari limbah (*EFW*), adalah salah satu teknologi yang paling efektif dan efisien untuk mengurangi volume sampah. Energi yang didapatkan digunakan untuk termal atau pembangkit listrik. Nilai kalor rata-rata 1500 kkal/kg dapat diharapkan dari *MSW* yang diolah sebelumnya untuk digunakan sebagai bahan bakar untuk pembakaran langsung di pabrik *WTE*. Sekitar 800 kW daya listrik dapat dihasilkan dari 50 ton *MSW* per hari.

Melihat kondisi diatas, maka dipandang perlu untuk dilakukan suatu penanganan sampah yang sesuai dengan kondisi Indonesia (yang komposisinya sebagian besar biomassa) dan dapat mengurangi permasalahan yang telah ada, yaitu dengan mengintroduksi teknologi pirolisa yang berupa teknologi *slow pyrolysis* untuk mengubah sampah kota tersebut menjadi *tar (synthetic oil)*, *char (RDF)* dan gas. Pirolisis dipandang mampu menjadi alternatif pemecahan dalam penanganan sampah tersebut jika dibandingkan dengan proses pengolahan yang lain, karena dipandang mempunyai perbandingan pengolahan produk relatif besar, dimana hasil proses mempunyai nilai energi besar dan hasil konversi dapat dimanfaatkan menjadi dasar untuk kegunaan lain dan proses dapat diatur dengan lebih mudah. Secara proses, efisiensi dan produktivitas dari pirolisis dapat ditingkatkan dengan penggunaan katalis alami seperti kaolin. (Gandidi et al., 2017).

Parameter kunci dalam proses *wastes to energy* salah satunya adalah pemilihan suhu kerja dalam proses tersebut, suhu pirolisis dapat bervariasi dari 300°C hingga 800°C. (Moya, Aldás, Jaramillo, et al., 2017). Pirolisis dapat dilakukan dengan sukses pada suhu sekitar 300°C - 400°C tanpa adanya kekhawatiran akan konsentrasi polutan yang tinggi dalam gas buang. (Czajczyńska et al., 2017). Salah

satu permasalahan dalam proses pirolisis adalah proses *tar congestion* yang dalam penelitian yang dilakukan oleh (Wu et al., 2017), hal tersebut dapat dikurangi dengan meneliti pemodelan pirolisis *MSW* dalam sebuah *rotating bed reactor* dan dihasilkan bahwa terjadi pengurangan permasalahan *tar congestion* secara efektif dan didapatkan gas yang lebih bersih dan dengan nilai kalor yang tinggi.

Hasil proses pirolisis berupa padatan (arang atau *char*), cairan (berupa *tar*) dan gas, dimana perbandingan banyaknya produk yang dihasilkan sangat tergantung pada kondisi pirolisis yang dilakukan, yaitu besarnya suhu akhir proses pirolisis, waktu penahanan suhu pirolisis, laju pemanasan yang dilakukan, tekanan pada ruang pirolisis serta katalis yang digunakan. Secara definisi, proses pirolisis adalah proses degradasi termal (*thermal degradation*) dari bahan bakar berbentuk padat yang terjadi dalam keadaan oksigen terbatas, dan produk yang dihasilkan berupa gas, *tar* dan *char* (Di Blasi, 2008). Pendapat tersebut didukung oleh (Chhabra et al., 2016) yang menyatakan bahwa proses pirolisis merupakan proses degradasi termal yang dilakukan dalam kondisi tanpa adanya oksigen dan dilakukan pada rentang suhu 300°C hingga 850°C, proses degradasi termal yang terjadi terdiri atas dua buah proses dekomposisi yaitu dekomposisi primer dari bahan bakar padat dan reaksi kedua dari produk organik dengan komponen volatil yang dapat terkondensasi (*tar*) menjadi gas dengan berat molekular yang rendah dan *char*.

Penelitian yang dilakukan oleh (Matzusawa et al., 2007), menunjukkan bahwa melalui pengolahan karbonisasi, nilai kalor arang *MSW* dapat mencapai 50% dari batubara dan hasil tersebut dipandang dapat menjadi alternatif pengganti batubara. Sementara itu, terkait pengolahan sampah makanan melalui proses co-pirolisis dan co-gasifikasi bersama kayu Eik dengan rasio 2 : 1 diteliti dalam sebuah reaktor *fixed bed tubular* dan didapatkan hasil bahwa co-pirolisis dan co-gasifikasi biomassa kayu dan limbah makanan adalah metode yang layak untuk mengurangi akumulasi limbah makanan dan menghasilkan produk bernilai tambah. (Nagy & Dobó, 2020). Proses co-pirolisis berbagai komponen *MSW* untuk mendapatkan bahan bakar dengan nilai kalor tinggi diteliti sebagai salah satu solusi alternatif pengganti bahan bakar fosil konvensional dan dihasilkan bahwa

terdapat interaksi sinergis antar berbagai komponen *MSW* (terutama plastik) dalam menghasilkan bahan bakar dengan nilai kalor yang sebanding dengan bahan bakar fosil konvensional. (Sipra et al., 2018).

Namun demikian, dari uraian penelitian-penelitian diatas, dipandang perlu untuk meneliti tentang karakterisasi proses pirolisis lambat dari *MSW* yang banyak dihasilkan terutama di Indonesia dan masih belum banyak dilakukan, terutama dalam satu proses yang kontinu, oleh karena itulah maka dalam paper ini akan dibahas pirolisis sampah kota terseleksi secara kontinu dalam sebuah *screw pyrolyser*.

METODE

Pengambilan data dimulai dengan cara pengumpulan bahan baku di tempat pembuangan akhir sampah, dengan memilah dan memilih sampah, sampah yang diteliti dalam artikel ini adalah sampah yang tidak dapat dimanfaatkan oleh pemulung serta tidak memiliki nilai ekonomis, penelitian dilanjutkan dengan penelitian secara eksperimental didalam laboratorium.

Material Penelitian

Bahan yang digunakan adalah sampah kota terseleksi (*segregated MSW*), yang dibedakan atas sampah organik dan sampah anorganik, dimana jenis sampah yang digunakan adalah sampah yang belum terolah secara maksimal di TPAS (tempat pembuangan akhir sampah), penentuan jenis sampah yang diolah dilakukan melalui

pengamatan dan wawancara dengan pemulung dan pengolah sampah yang ada di sekitar TPAS Putri Cempo Surakarta. Sampah organik yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampah bambu dan sampah daun pisang, sementara sampah anorganik yang dipilih sebagai material penelitian berupa sampah *styrofoam* dan sampah kemasan.

Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian pengaruh kondisi operasi pirolisis adalah *screw pyrolyser* seperti terlihat dalam Gambar 1. Alat pirolisis sistem ulir yang digunakan dalam penelitian ini berpengerak motor listrik berdaya 2 PK, reaktor pirolisis yang digunakan berupa 2 buah tabung konsentris dengan diameter 0,2 m dan 0,3 m, dan terdapat rongga diantara kedua tabung tersebut sebagai tempat aliran udara panas untuk mengatur suhu pirolisis, *pyrolyser* tersebut mendapat panas dari pembakaran gas *LPG*, dimana untuk menjamin homogenitas suhu maka api yang berasal dari pembakaran *LPG* tersebut dimasukan kedalam reaktor melalui empat buah titik pada *pyrolyser*. Untuk menggerakkan bahan baku masuk kedalam *pyrolyser* maka digunakan *screw* yang ditempatkan kedalam reaktor berdiameter 0,2 m, panjang *pyrolyser* adalah 1,5 m. Dan guna menjamin suhu dalam *pyrolyser* homogen, maka kecepatan proses diatur dengan menggunakan pereduksi kecepatan dengan rasio 1 : 40. .



Gambar 1. *Screw pyrolyser* yang digunakan (sumber : Himawanto dkk. (2012))

Pengumpulan Data

Langkap awal penelitian dimulai dengan pengumpulan bahan baku yang

berupa sampah kota terseleksi (*segregated municipal solid wastes, segregated MSW*). Sampah kota terseleksi yang dimaksudkan

disini adalah sampah kota yang tidak terolah secara maksimal di tempat pembuangan akhir sampah. Bahan-bahan tersebut dikeringkan hingga kadar airnya tidak lebih dari 10 %, untuk kemudian diuji nilai kalor dan diuji *proximate*-nya dengan menggunakan standar ASTM 2015 untuk uji nilai kalor, kadar air dengan standar pengujian ASTM D-3173 , kadar abu sesuai dengan standar pengujian ASTM D-3174, kandungan *volatile matter* dengan standard ASTM D-3175 dan kadar *fixed carbon* sesuai dengan standar pengujian ASTM D-3172. Kemudian bahan baku tersebut dihaluskan hingga lolos ukuran saringan 20 *mesh*.

Tahapan berikut adalah mencampur material penelitian dengan perbandingan persentase berat 70% sampah organik, dasar pemilihan komposisi ini adalah komposisi riil sampah yang dihasilkan di Indonesia adalah 70% sampah organik-30% sampah anorganik. Terminologi sampah organik pada penelitian ini didefinisikan sebagai campuran sampah daun pisang dan sampah bambu, sementara terminologi sampah non organik mengacu pada campuran sampah kemasan-sampah *styrofoam*

Sampel kemudian dipirolisis dalam *screw pyrolyser*. Panas untuk proses pirolisis didapatkan dengan memanaskan dinding luar *pyrolyser* dengan menggunakan panas api dari *LPG* dan untuk menjamin meratanya pemanasan, maka pemanasan dilakukan dengan menggunakan 4 (empat) titik pemanasan. Variasi temperatur akhir yang diteliti adalah 300°C, 350°C, 400°C , 450°C

dan 500°C, pengukuran temperatur dilakukan pada ujung keluaran dari *screw pyrolyser*.

Analisa Data

Analisa data dilakukan terhadap *char (RDF)* yang didapatkan dari proses tersebut diatas diuji *heating value* nya dan diuji *proximate* nya dan juga dilakukan perhitungan terhadap randemen proses pirolisis (prosentase produk yang dihasilkan terutama *char*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Unjuk Kerja *Screw Pyrolyser* yang Digunakan Dalam Penelitian

Screw pyrolyser yang dibuat dalam artikel ini memiliki kapasitas 6 kg/jam dalam kondisi *pyrolyser* dipanasi, rendahnya kapasitas *screw pyrolyser* diduga karena adanya asap cair yang melekat pada ulir serta pada bagian dalam *pyrolyser* hal tersebut mengakibatkan *char* yang dihasilkan sulit untuk didorong keluar (Himawanto et al., 2010), kondisi tersebut kemungkinan karena adanya asap cair yang terkondensasi dalam reaktor, sehingga menyebabkan *char* yang terbentuk mengeras sehingga *char* tersebut sulit untuk keluar dari *pyrolyser*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut (Wu et al., 2017), menyatakan bahwa salah satu permasalahan dalam proses pirolisis adalah proses *tar congestion* yang dapat dikurangi dengan melakukan pirolisis dalam *rotating bed reactor* dan didapatkan gas yang lebih bersih dan dengan nilai kalor yang tinggi.



Gambar 2. Fenomena Tar yang Menggumpal Dalam Penelitian
(sumber : <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/handle/11617/3860>)

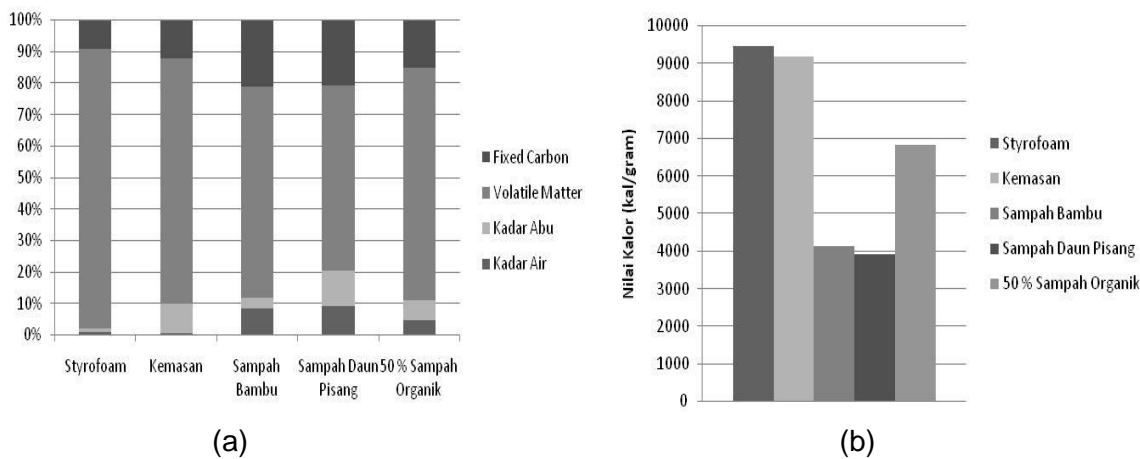
Karakteristik Bahan Baku

Dalam gambar 3 disajikan gambar hasil uji nilai kalor dan proksimat dari bahan baku (sampah *styrofoam*, sampah kemasan, sampah bambu, sampah daun pisang) serta hasil uji *proximate* dan nilai kalor sampah

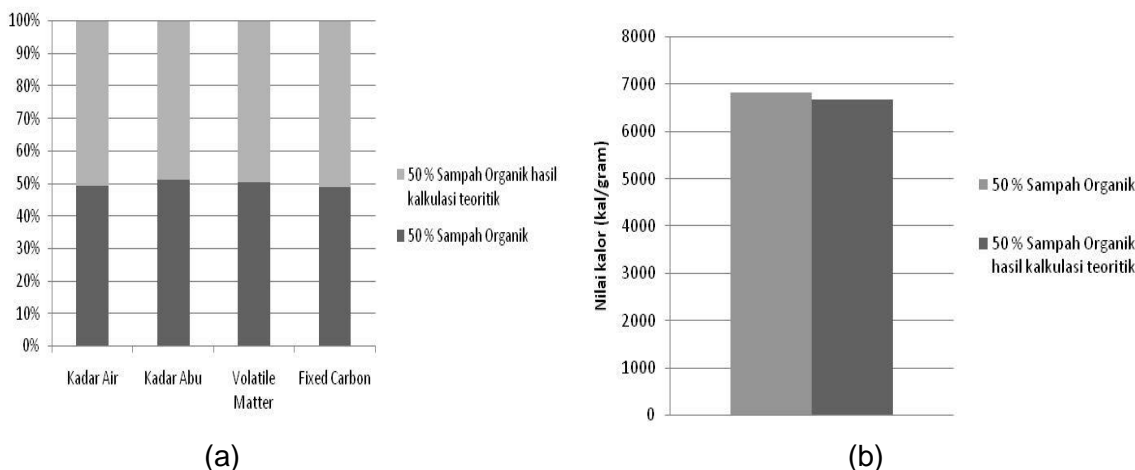
campuran antara 50% sampel organik dan 50% sampel anorganik. Pengujian *proximate* dan nilai kalor sampah campuran 50% sampah organik 50%-sampah anorganik bertujuan untuk verifikasi dengan perhitungan teoritik sifat *proximate* dan nilai kalor sampel

campuran. Perhitungan teoritik dilakukan dengan menjumlahkan sifat-sifat bahan baku proposional dengan komposisinya, karena tidak ada reaksi kimia yang terlibat. Dalam gambar 4 disajikan perbandingan antara hasil pengujian laboratoris dan hasil perhitungan

teoritik untuk sampel 50% sampah organik – 50% sampah nonorganik, dari gambar tersebut, tampak bahwa perbedaan antara hasil uji laboratoris dan perhitungan teoritik tidak signifikan



Gambar 3. Hasil uji karakteristik bahan baku (a) hasil uji proximate (b) hasil uji nilai kalor



Gambar 4. Hasil Perbandingan Antara Hasil Pengujian Laboratoris dan Perhitungan Teoritis (a) uji proximate (b) uji nilai kalor

Sebagai pembandingan dari hasil penelitian yang menyatakan bahwa sampah bambu memiliki nilai kalor sebesar 4.133,66 kal/gram, adalah hasil penelitian yang dilakukan oleh (Kalita et al., 2009), yang menyatakan bahwa nilai kalor dari serbuk bambu sebesar 3.524 kal/gram. Sementara itu, limbah kemasan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai kalor 9.191,164 kal/gram. Sampah kemasan merupakan sampah pembungkus makanan ringan, yang dalam proses pembuatannya terutama berbahan baku plastik berjenis LDPE (*Low Density Poly Ethylene*). Menurut (Sørum, n.d.) nilai kalor LDPE mencapai 46,6 MJ/kg (11.137,4 kal/gram). Perbedaan antara hasil

yang dihasilkan dalam artikel ini ini dengan nilai kalor LDPE kemungkinan disebabkan karena sampah kemasan tidak 100% terbuat dari LDPE, namun terdapat adanya material aditif atau tambahan sehingga mampu membuat nilai kalor dari LDPE turun. Sehingga dapat dilihat besarnya nilai kalor tergantung pada jenis bahan tambahan atau lapisan yang terdapat dalam kemasan tersebut. Sementara itu, limbah styrofoam memiliki nilai kalor 9,450 kkal/gram, hal ini mendekati hasil penelitian (Sørum, n.d.) yang menyatakan bahwa nilai kalor polystyrene sebagai bahan baku pembuatan styrofoam adalah sebesar 10.061,9 kal/gram (42,1 MJ/kg). Literatur lain menyatakan bahwa nilai kalor untuk plastik

yang bebas dari *chlorine* (*chlorine free plastic*) adalah sebesar 43.448 kJ/kg dan nilai kalor untuk plastik yang terklorinasi (*chlorinated*) dalam hal ini PVC adalah sebesar 21.172 kJ/kg (Sipra et al., 2018). Melihat kondisi diatas, tampak bahwa komponen-komponen sampah kota terseleksi (*segregated municipal solid wastes*) yang digunakan dalam artikel ini memiliki potensi kalor yang cukup besar untuk diolah lebih lanjut. Semetara itu untuk sampel plastik, (Sharuddin et al., 2018) menyatakan bahwa untuk plastic yang bisasa digunakan (semisal PET, HDPE, LDPE, PP dan PS) temperatur degradasi termal dimulai pada suhu 350°C kecuali untuk PVC yang mulai terdegradasi mulai suhu yang lebih rendah yaitu mulai suhu 220°C

Nilai *heating value* untuk sampel-sampel non organik lebih besar daripada sampel-sampel organik meskipun *fixed carbon* nya lebih rendah, hal ini disebabkan karena bahan utama penyusun sampel non organik berasal dari produk turunan minyak bumi, sehingga nilai kalor yang dimiliki lebih besar. Sementara itu, untuk nilai kalor sampel organik, tampak bahwa nilai kalor daun pisang lebih besar daripada nilai kalor bambu meskipun *fixed carbon* nya lebih kecil, hal ini diduga karena persentase komponen utama penyusun biomassa yang berbeda.

Sifat Char yang Dihasilkan Akibat Variasi Suhu Reaktor

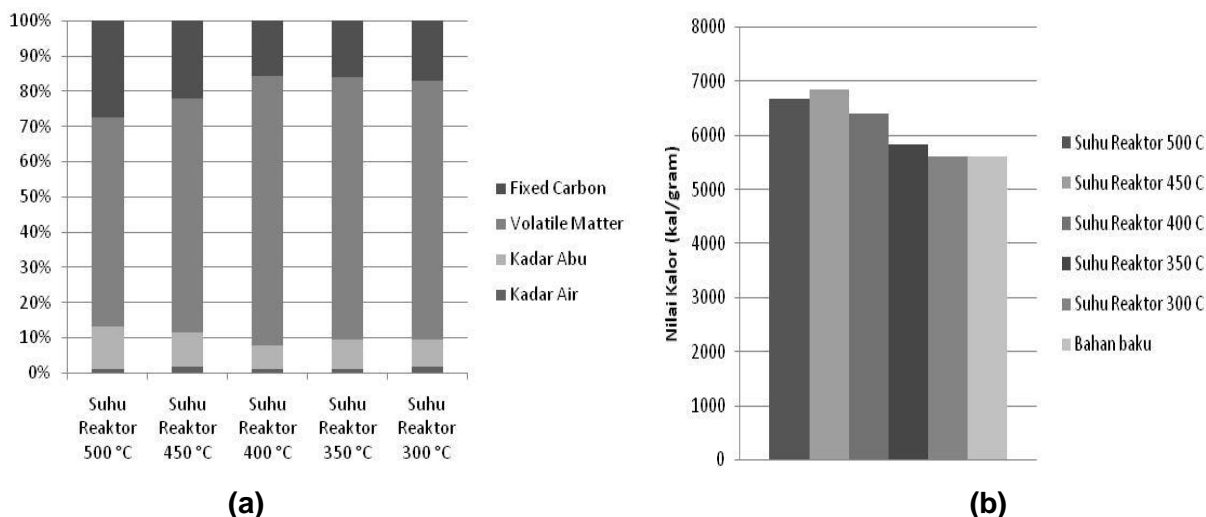
Dalam tabel 1 dan gambar 5 disajikan hasil uji proximate dan nilai kalor sampel 70% sampah organik dengan variasi suhu reaktor. Tampak nilai kalor tertinggi terjadi hasil pirolissi yang dilakukan pada suhu reaktor 450°C yaitu sebesar 6860,148 kal/gram. Secara teoritis, semakin tinggi suhu sampel maka kadar volatile matter akan semakin menurun dengan diiringi dengan kenaikan kadar *fixed carbon*, namun demikian pirolisis pada suhu sampel yang terlalu tinggi akan meningkatkan kadar abu sampel yang dapat menurunkan nilai kalor sampel, hal ini dapat dilihat dalam tabel 1 dimana tampak bahwa semakin tinggi temperatur reaktor pirolisis

maka kadar abu cenderung meningkat, kecuali pada suhu 400°C, hal ini diduga karena proses pelelehan dari komponen non organik yang cenderung untuk menggumpal pada temperatur terkait. Dari hasil penelitian tampak bahwa pada suhu reaktor 500°C menghasilkan *char* dengan nilai kalor yang rendah, hal tersebut diduga karena terjadi fenomena *secondary cracking* sehingga terdapat satu kondisi suhu pirolisis yang optimum untuk menghasilkan nilai kalor yang tertinggi, mengingat sampel adalah sampel campuran.

Char yang diteliti dalam tulisan ini menghasilkan nilai kalor relatif lebih besar daripada *char* yang dihasilkan dari karbonasi sampah kota yang dilakukan oleh (Matzusawa et al., 2007) yang melakukan penelitian karbonasi sampah kota pada temperatur 435°C, 445°C dan 455°C dengan proses kontinu berkapasitas 500 kg – 900 kg/jam, produk arang dari penelitian tersebut memiliki nilai kalor dengan rentang antara 14,2 MJ/kg sampai dengan 17 MJ/kg (3.393,8 kal/gram sampai dengan 4.063 kal/gram). Secara teoritis dan analisa perbandingan hasil yang dilakukan oleh penelitian lain didapatkan bahwa hasil dan komposisi produk yang dihasilkan dari proses pirolisis *MSW* sebagian besar dipengaruhi oleh jenis bahan baku, suhu pirolisis, laju pemanasan dan jenis reaktor yang digunakan (Chen et al., 2014). Hal tersebut didukung oleh hasil penelitian (Świechowski et al., 2020), yang menyatakan bahwa pada pirolisis dilakukan pada suhu mulai dari 300°C hingga 500°C dengan interval 20°C dan dengan waktu proses 20 menit hingga 60 menit (interval 20 menit), peningkatan *HHV* (*higher heating value*) terbesar teramati untuk sampel kain (hingga 65%), kemasan komposit *PAP/AL/PE* (hingga 56%), dan kayu (hingga 46%).

Tabel 1. Hasil uji nilai kalor dan nilai proximate char sampah organik 70% yang dihasilkan akibat variasi suhu reaktor

Suhu reaktor (°C)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Nilai Kalor (kal/gram)
500	1,013	12,014	59,579	27,395	6.687,268
450	1,776	9,661	66,387	22,178	6.860,148
400	0,949	6,940	76,523	15,590	6.400,261
350	1,060	8,401	74,536	16,003	5.833,783
300	1,750	7,647	73,714	16,890	5.615,022



Gambar 5. Karakteristik Char Sampah Organik 70% yang Dihasilkan Akibat Variasi Suhu Pyrolyser

(a) hasil uji sifat proximate (b) hasil uji nilai kalor

Randemen Pirolisis

Dalam menghitung *energy yield* proses pirolisis terdapat beberapa definisi yang digunakan yang meliputi : *mass yield (MY)* didefinisikan sebagai perbandingan antara massa bahan baku sebelum proses pirolisis terhadap massa setelah proses pirolisis, *energy densification ratio (EDr)* didefinisikan sebagai perbandingan antara *higher heating value (HHV)* dari *CSF (carbonized solid fuel)* terhadap *HHV* dari bahan baku dan *energy yield (EY)* adalah hasil perkalian antara *mass*

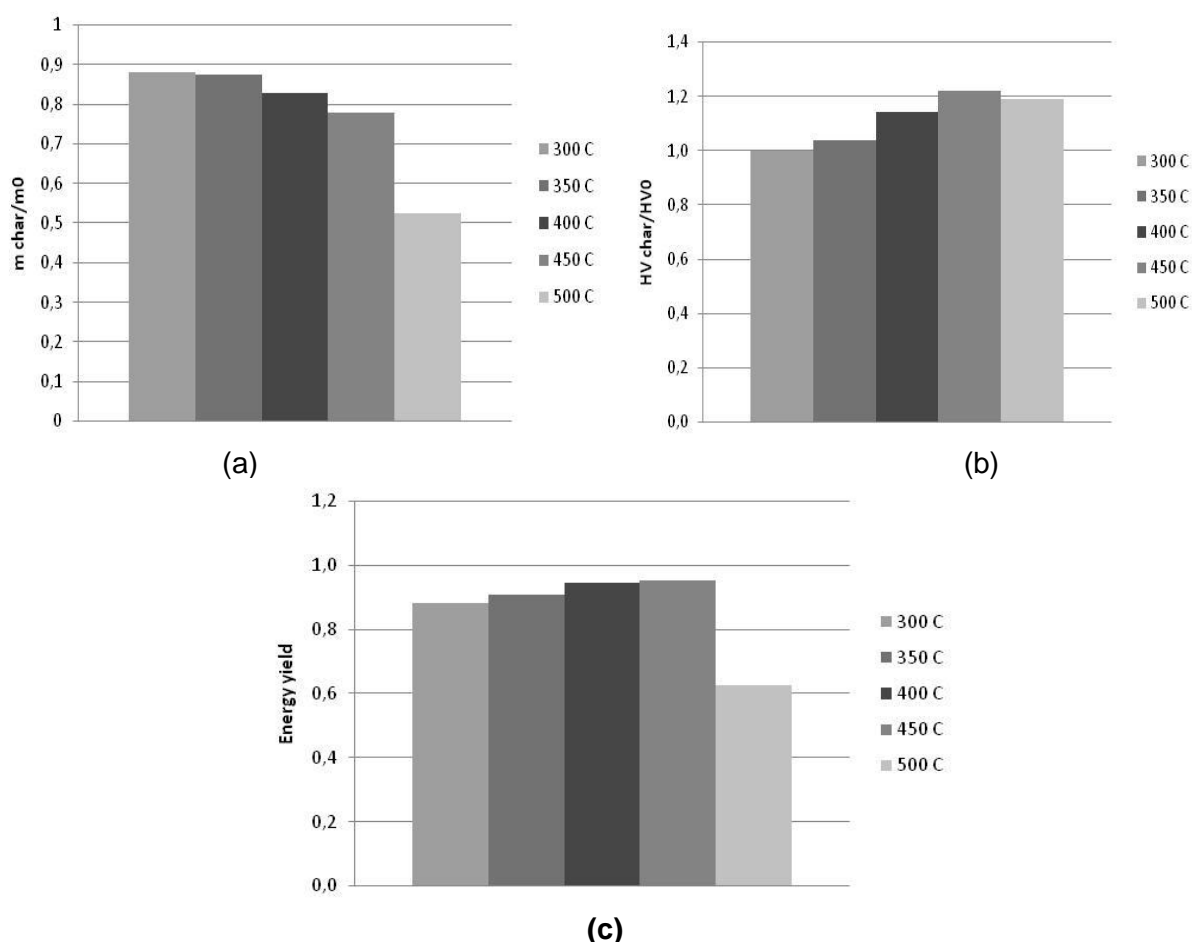
yield dan *energy densification ratio* (Świechowski et al., 2020). Dalam paper kali ini, nilai kalor bahan baku campuran diasumsikan sama dengan penjumlahan nilai kalor penyusunnya sesuai dengan persentase perbandingan beratnya. Dalam tabel 2 disajikan randemen pirolisis dalam penelitian yang dinyatakan dalam *energy yield* yang kemudian digambarkan dalam gambar 6.

Tabel 2. Perhitungan *energy yield* pirolisis sampah organik 70% yang dihasilkan akibat variasi suhu reaktor

Suhu reaktor (°C)	Mass Yield (m ₀ /m _{char})	Energy Densification Ratio (HV _{char} /HV _{bahan baku})	Energy Yield
300	1,134	1,000	1,134
350	1,143	1,039	1,188
400	1,206	1,140	1,737
450	1,282	1,222	1,567
500	1.905	1,191	2,269

Tampak dari tabel 2, bahwa variasi suhu reaktor memberikan pengaruh besar terhadap randemen proses pirolisis yang memberikan *energy yield* berkisar 1,134 hingga 2,269. Pada tabel tersebut, terlihat pada suhu akhir pirolisa 450°C menghasilkan perbandingan *heating value* (nilai kalor) yang lebih tinggi dibandingkan dengan randemen proses yang lain, meskipun massa char yang dihasilkan lebih rendah daripada suhu reactor 500°C. Dari hasil tersebut diduga bahwa kenaikan temperatur akhir pirolisis akan membawa pengaruh pada naiknya nilai kalor char yang dihasilkan, meskipun diduga pada temperatur akhir pirolisis 500°C terjadi fenomena yang disebut *secondary cracking*. Hal tersebut, juga ditunjang oleh (Di Blasi, 2008) yang menyebutkan proses *secondary reaction* yang menyebabkan proses

pemecahan *tar* dapat berlangsung pada temperatur gas diatas 773 K (500°C). Kejadian terjadi dalam pori-pori *char* dan terjadi juga pada permukaan bahan yang mengalami proses pirolisa. Proses ini dapat menyebabkan *tar* dan gas yang dihasilkan pada proses pirolisis mengalami reaksi menjadi *char* sehingga mempengaruhi karakteristik produk padatan yang dihasilkan. Salah satu pemecahan dalam mengatasi perbandingan massa *char* yang menurun terhadap massa awal, seperti diungkapkan oleh Siritheerasas et al., (2017) yang menemukan bahwa penambahan arang limbah pertanian menyebabkan naiknya mass yield dan turunnya *volatile matter* dari *pellet MSW* yang ditorrefaksi, namun *fixed carbon* ditemukan konstan.



Gambar 6. Randemen Pirolisis Akibat Variasi Suhu Reaktor
 (a) perbandingan massa *char* terhadap massa awal bahan baku
 (b) perbandingan nilai kalor *char* terhadap nilai kalor bahan baku
 (c) *energy yield* proses pirolisis

SIMPULAN

Peralatan untuk melakukan proses pirolisis secara kontinu dari sampah kota terseleksi berupa *screw pyrolyser* yang berkapasitas 6 kg/jam dengan bahan baku yang diolah berupa sampah 70% organik, kondisi operasional pirolisis yang dapat menghasilkan char yang dipandang optimum adalah pada kondisi temperatur *pyrolyser* 450°C. Adapun produk char yang dihasilkan dari proses dan peralatan yang dipandang bekerja dalam kondisi optimum adalah dihasilkannya produk padat berupa *char/arang* yang mengandung kadar air 1,77%, kadar abu 9,66%, volatile matter 66,38% dan fixed carbon 22,17% dan mempunyai nilai kalor sebesar 6.860 kkal/gram dan dalam proses tersebut randemen yang terjadi sebesar 95,3%. *Char* yang dihasilkan diprediksikan dapat menjadi alternatif substitusi pengganti batubara sebagai bahan bakar padat. Implikasi dari artikel ini adalah dengan pemilihan kondisi *slow pyrolysis* yang tepat dari sampah kota terseleksi akan mampu menghasilkan arang dengan kualitas panas yang cukup besar yang dipandang dapat menjadi bahan bakar padat alternatif pengganti batu bara

DAFTAR PUSTAKA

- A, R., K, P., & Samar, M. (2020). Comparison of Technologies to Serve Waste to Energy Conversion. *International Journal of Waste Resources*, 10(01). <https://doi.org/10.35248/2252-5211.20.10.372>
- Alzate, S., Restrepo-Cuestas, B., & Jaramillo-Duque, Á. (2019). Municipal solid waste as a source of electric power generation in Colombia: A techno-economic evaluation under different scenarios. *Resources*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/resources8010051>
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. In *Waste Management* (Vol. 34, Issue 12, pp. 2466–2486). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>
- Chhabra, V., Shastri, Y., & Bhattacharya, S. (2016). Kinetics of Pyrolysis of Mixed Municipal Solid Waste-A Review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 513–527. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.036>
- Chua, H. S., Bashir, M. J. K., Tan, K. T., & Chua, H. S. (2019). A sustainable pyrolysis technology for the treatment of municipal solid waste in Malaysia. *AIP Conference Proceedings*, 2124. <https://doi.org/10.1063/1.5117076>
- Czajczyńska, D., Nannou, T., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., Ghazal, H., Spencer, N., & Jouhara, H. (2017). Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector. *Energy Procedia*, 123, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.275>
- Di Blasi, C. (2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(1), 47–90. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
- Farizal, F., Aji, R., Rachman, A., Nasruddin, N., & Mahlia, T. M. I. (2018). Indonesia's Municipal Solid Waste 3R and Waste to Energy Programs. *Makara Journal of Technology*, 21(3), 153. <https://doi.org/10.7454/mst.v21i3.3536>
- Gandidi, I. M., Susila, M. D., & Pambudi, N. A. (2017). Co-cracking of real MSW into bio-oil over natural kaolin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 60(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/60/1/012019>
- Habib, M. A., Ahmed, M. M., Aziz, M., Beg, M. R. A., & Hoque, M. E. (2021). Municipal solid waste management and waste-to-energy potential from rajshahi city corporation in bangladesh. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/app11093744>
- Himawanto, D. A., Indarto, Saptoadi, H., & Rohmat, T. A. (2010). Pengaruh Heating Rate Pada Proses Slow Pyrolysis Sampah Bambu Dan Sampah Daun Pisang. *SEMINAR REKAYASA KIMIA DAN PROSES 2010 ISSN: 1411-4216*, 1–5.
- Himawanto, D. A., Indarto, Saptoadi, H., & Rohmat, T. A. Rekrayasa Screw Pyrolyser Untuik Menghasilkan Char, , *Symposium Nasional RAPI XI FT UMS – 2012*
- Kalita, P., Mohan, G., Pradeep Kumar, G., & Mahanta, P. (2009). Determination and comparison of kinetic parameters of low density biomass fuels. *Journal of*

- Renewable and Sustainable Energy*, 1(2), 023109.
<https://doi.org/10.1063/1.3126936>
- Makarichi, L., Kan, R., Jutidamrongphan, W., & Techato, K. A. (2019). Suitability of municipal solid waste in African cities for thermochemical waste-to-energy conversion: The case of Harare Metropolitan City, Zimbabwe. *Waste Management and Research*, 37(1), 83–94.
<https://doi.org/10.1177/0734242X18804029>
- Matsakas, L., Gao, Q., Jansson, S., Rova, U., & Christakopoulos, P. (2017). Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. In *Electronic Journal of Biotechnology* (Vol. 26, pp. 69–83). Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso.
<https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.01.004>
- Matzusawa Y., Mae, K., Hasegawa, I., Fujiyoshi H., Ito, M., Ayabe, M. (2007). Characterization of carbonized municipal waste as substitute for coal fuel. *Fuel*, 86(1–2), 264–272.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236106002134>
- Moya, D., Aldás, C., Jaramillo, D., Játiva, E., & Kaparaju, P. (2017). Waste-To-Energy Technologies: An opportunity of energy recovery from Municipal Solid Waste, using Quito - Ecuador as case study. *Energy Procedia*, 134, 327–336.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.537>
- Moya, D., Aldás, C., López, G., & Kaparaju, P. (2017). Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: A worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. *Energy Procedia*, 134, 286–295.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.618>
- Nagy, G., & Dobó, Z. (2020). Experimental investigation of fixed-bed pyrolysis and steam gasification of food waste blended with woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, 139.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105580>
- Pasek, A. D., Gultom, K. W., & Suwono, A. (2013). Feasibility of recovering energy from municipal solid waste to generate electricity. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 45(3), 241–256.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2013.45.3.3>
- Qonitan, F. D., Wayan Koko Suryawan, I., & 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>
- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2018). Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 334(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012001>
- Sipra, A. T., Gao, N., & Sarwar, H. (2018). Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. In *Fuel Processing Technology* (Vol. 175, pp. 131–147). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.012>
- Siritherasas, P., Waiyanate, P., Sekiguchi, H., & Kodama, S. (2017). Torrefaction of Municipal Solid Waste (MSW) Pellets using Microwave Irradiation with the Assistance of the Char of Agricultural Residues. *Energy Procedia*, 138, 668–673.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.190>
- Sørnum, L. (n.d.). Characterisation of MSW for Combustion Systems IEA Task 23. <http://www.energy.sintef.no>
- Świechowski, K., Syguła, E., Koziel, J. A., Stępień, P., Kugler, S., Manczarski, P., & Białowiec, A. (2020). Low-temperature pyrolysis of municipal solid waste components and refuse-derived fuel—process efficiency and fuel properties of carbonized solid fuel. *Data*, 5(2).
<https://doi.org/10.3390/data5020048>
- Uche-Soria, M., & Rodríguez-Monroy, C. (2019). An efficient waste-to-energy model in isolated environments. Case study: La Gomera (Canary Islands). *Sustainability (Switzerland)*, 11(11).
<https://doi.org/10.3390/su11113198>
- Wu, D., Zhang, A., Xiao, L., Ba, Y., Ren, H., & Liu, L. (2017). Pyrolysis Characteristics of Municipal Solid Waste in Oxygen-free Circumstance. *Energy Procedia*, 105,

- 1255–1262.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.442>
- Yang, Y., Heaven, S., Venetsaneas, N., Banks, C. J., & Bridgwater, A. V. (2018). Slow pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Characterisation of products and screening of the aqueous liquid product for anaerobic digestion. *Applied Energy*, 213, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.018>
- Yao, F., Wu, Q., Lei, Y., Guo, W., & Xu, Y. (2008). Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 93(1), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2007.10.012>
- <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn> akses tanggal 19 Juli 2021 pukul 20.31