

ABSTRACT

STUDY ON MECHANISM OF WET TORREFACTION TO CONVERT THE NON-RECYCLED MUNICIPAL SOLID WASTE INTO SOLID FUEL

By

Budi Triyono

Student ID: 33115003

(Doctoral Program in Mechanical Engineering)

Municipal solid waste (MSW) is a complex problem in major cities in Indonesia and other developing countries that has not been resolved. MSW is currently only collected and disposed to final landfill. On the other hand, national energy security is also an issue to be solved. Utilization of MSW, which is dominated by organic waste, as solid fuel can be a solution for both problems. The largest obstacles in the utilization of MSW as solid fuel in developing countries such as Indonesia are its high water content, irregular size and shape, and difficulty-to-sort due to the mix of plastic and organic waste. There are several techniques to utilize MSW as fuel, i.e. direct combustion, bio-gasification, dry torrefaction (carbonization), and wet torrefaction. Based on a literature study, wet torrefaction could be an appropriate pre-treatment process for mixed MSW because it requires no initial drying and mixed organic-plastic MSW can be processed without initial sorting.

Based on a field survey at temporary disposal sites and final landfill of Bandung city in 2016, the composition of the non-recycled MSW was: leaf litter (34.67%), food waste (23.33%), vegetable waste (14.33%), fruit waste (11.00%), and non-recycled plastic (16.67%). In this research, first experiments and analysis were conducted to investigate the effect of wet torrefaction on increasing the fuel properties of individual component of waste. Five types of samples were chosen to represent the five types of waste in MSW with the highest mass fraction found in a field survey: mahoney leaf, rice (starch) waste, cassava stalks, banana peels, and instant noodle packaging plastic. Each sample was treated with wet torrefaction under four conditions: 150, 175, 200 and 225 °C with holding time 30 minutes. The experimental results showed that a higher operating temperature will increase the calorific value, followed by a decrease in mass yield as a consequence of the process severity degree. However, food waste torrefaction showed different characteristics: the increase in calorific value was followed by an increase in mass yield. This is unique and different from the results of wet torrefaction on other organic wastes. The wet torrefaction temperature of 225 °C and lower temperatures did not affect the fuel properties of plastic waste and only changed its shape into bulky size. This research stage also provide equations to predict the fuel properties of mixed MSW with no interaction assumption.

Second experimental study also conducted to investigate the effect of wet torrefaction on increasing the fuel properties of mixed organic-plastic MSW. The

experiments were conducted in a 2.5-L stirring reactor temperature variation (150, 175, 200 and 225 °C) and several holding times and solid loads. The result showed that wet torrefaction at a temperature of 200 °C with a holding time of 30 min and a solid load of 1:2.5 was the optimum condition, producing a solid product with a uniform physical shape, small particles and a homogeneous particle size distribution, a calorific value (HHV) of 33.01 MJ/kg and an energy yield of about 89%. The wet torrefaction process is not only suitable to convert the mixed municipal waste into renewable high energy density solid fuel, but it can also be used to produce separate organic product that can be used as solid fuel and a plastic product that can be prepared for other treatments, such as pyrolysis to produce liquid fuel or recycling.

The comparison between fuel properties data resulted by experimental of mixed MSW and calculation data provided by previous non-interaction equation showed that there are significant different of results. This proves the hypothesis that there were some interactions between the components of mixed waste during the wet torrefaction process. The third experiments was carried out to investigate the interaction between waste component and showed that the interaction between leaf litter, vegetable waste and fruit waste were relatively small and negligible. However, food waste (starch) interacted significantly with leaf litter, vegetable waste and fruit waste during wet torrefaction process.

The fourth experiment was conducted to get data that can be analyzed by the response surface methodology (RSM) to produce the equations of interaction correction number (ICN). By adding the interaction number equation, the final equations were proposed that can be used to predict the fuel properties of wet torrefied product: mass yield, calorific value, volatile matter, fixed carbon, ash content, carbon content, hydrogen content, oxygen content, nitrogen content, and sulfur content. A series of experiments were also conducted to validate the proposed equation. The results showed that the predicting data resulted by proposed equation generally closer to experimental (real) data than non-interaction calculation result. It proved that the proposed equations could be used to predict the fuel properties of wet torrefied product for various waste compositions and operating temperatures.

This study provides at least four scientific contributions: (1) the mechanism of wet torrefaction, especially on starch-based biomass, (2) knowledge of interactions between organic wastes (lignocellulosic and starch based) during wet torrefaction, (3) proposed equations to predict the fuel properties of wet torrefied products, and (4) the alternative method for mixing or separating mixed MSW.

Keywords: mixed MSW, solid fuel, wet torrefaction, non-interaction equation, interaction correction number, and proposed equation.

ABSTRAK

STUDI MEKANISME PROSES TOREFAKSI BASAH UNTUK MENGONVERSI SAMPAH KOTA TIDAK DAUR ULANG MENJADI BAHAN BAKAR PADAT

Oleh

Budi Triyono

NIM: 33115003

(Program Studi Doktor Teknik Mesin)

Sampah kota atau municipal solid waste (MSW) merupakan permasalahan kompleks di kota-kota besar di Indonesia dan negara-negara berkembang lainnya. Saat ini pengelolaan sampah kota hanya dikumpulkan dan lalu dibuang ke tempat pembuangan akhir. Di sisi lain, isu ketahanan energi nasional juga menjadi masalah yang harus dipikirkan. Pemanfaatan sampah kota menjadi bahan bakar padat dapat menjadi solusi untuk kedua masalah tersebut. Hambatan terbesar dalam pemanfaatan sampah kota sebagai bahan bakar padat di negara-negara berkembang seperti Indonesia adalah kandungan air yang tinggi, ukuran dan bentuk yang tidak beraturan, dan kesulitan untuk memilah karena bercampurnya sampah plastik dan sampah organik. Ada beberapa teknik untuk memanfaatkan sampah kota menjadi bahan bakar, yaitu pembakaran langsung, bio-gasifikasi, torefaksi kering (karbonisasi), dan torefaksi basah. Berdasarkan studi literatur, torefaksi basah atau wet torrefaction (WT) bisa menjadi proses pra-perlakuan yang tepat untuk sampah kota campuran karena tidak memerlukan pengeringan awal dan sampah campuran organik-plastik dapat diproses tanpa penyortiran awal.

Berdasarkan hasil survei lapangan di beberapa tempat pembuangan sementara (TPS) dan tempat pembuangan akhir (TPA) kota Bandung pada tahun 2016, komposisi sampah kota tidak daur ulang didominasi oleh sampah daun (34,67%), sisa makanan (23,33%), sisa sayuran (14,33%), sisa buah (11,00%), dan plastik tidak daur ulang (16,67%). Rangkaian percobaan dan analisis tahap pertama dilakukan untuk menyelidiki pengaruh WT terhadap peningkatan sifat bahan bakar dari setiap komponen sampah. Lima jenis sampel dipilih untuk mewakili lima jenis limbah di sampah kota dengan fraksi massa tertinggi yang ditemukan dalam survei lapangan: daun pohon mahoni, sisa nasi, batang daun singkong, kulit pisang, dan plastik bungkus mie instan. Setiap sampel ditorefaksi basah dalam empat kondisi: 150, 175, 200 dan 225 °C dengan waktu penahanan 30 menit. Hasil percobaan menunjukkan bahwa temperatur operasi yang lebih tinggi akan meningkatkan nilai kalor, diikuti oleh penurunan mass yield sebagai konsekuensi dari tingkat keparahan proses. Namun, torefaksi sisa makanan menunjukkan karakteristik yang berbeda: peningkatan nilai kalor diikuti oleh peningkatan mass yield. Ini unik dan berbeda dari hasil torefaksi basah pada limbah organik lainnya. Tahap penelitian ini juga menghasilkan persamaan untuk memprediksi beberapa sifat bahan bakar dari produk torefaksi dari sampah campuran namun masih menggunakan asumsi tidak ada interaksi antar komponen sampah sehingga disebut sebagai non-interaction equation.

Studi eksperimental tahap kedua dilakukan untuk menyelidiki efek torefaksi basah pada peningkatan sifat bahan bakar sampah kota campuran organik-plastik dengan komposisi sesuai hasil survei lapangan sebelumnya. Percobaan dilakukan dengan reaktor bervolume

2,5 L yang dilengkapi sistem pengadukan dengan variasi temperatur (150, 175, 200 dan 225 °C) serta beberapa variasi waktu penahanan dan solid load. Hasil penelitian menunjukkan bahwa torefaksi basah pada temperatur 200 °C dengan waktu penahanan 30 menit dan solid load 1: 2.5 adalah kondisi optimal, menghasilkan produk padat dengan bentuk fisik yang seragam dengan ukuran partikel yang relatif kecil dan homogen, nilai kalor (HHV) 33,01 MJ/kg, dan energy yield sekitar 89%. Proses torefaksi basah tidak hanya cocok untuk mengonversi sampah kota campuran organik dan plastik menjadi bahan bakar padat dengan kepadatan energi tinggi, tetapi juga dapat digunakan untuk menghasilkan produk organik terpisah yang dapat digunakan sebagai bahan bakar padat dan produk plastik yang dapat disiapkan untuk proses lanjutan, seperti pirolisis untuk menghasilkan bahan bakar cair atau proses daur ulang.

Perbandingan antara sifat bahan bakar yang dihasilkan oleh data eksperimen sampah campuran dan data hasil perhitungan menggunakan persamaan non-interaksi menunjukkan bahwa ada perbedaan hasil yang signifikan. Ini membuktikan hipotesis bahwa ada interaksi antara komponen sampah campuran selama proses torefaksi basah berlangsung. Oleh karena itu, percobaan tahap ketiga dilakukan untuk menyelidiki interaksi antara komponen sampah dan hasilnya menunjukkan bahwa interaksi antara sampah daun, sisa sayuran dan sisa buah relatif kecil dan dapat diabaikan. Namun, limbah makanan (pati) berinteraksi signifikan dengan sampah daun, sisa sayuran dan sisa buah.

Eksperimen tahap keempat dilakukan untuk mendapatkan data yang selanjutnya dapat dianalisis dengan response surface methodology (RSM) untuk menghasilkan persamaan interaction correction number (ICN). Dengan menambahkan persamaan ICN pada persamaan non-interaksi maka dihasilkan persamaan yang diusulkan atau proposed equation yang dapat digunakan untuk memprediksi sifat bahan bakar produk torefaksi basah, yaitu: mass yield, nilai kalor, zat volatil, karbon tetap, kandungan abu, kandungan karbon, kandungan hidrogen, kandungan oksigen, kandungan nitrogen, dan kandungan sulfur. Serangkaian eksperimen juga dilakukan untuk memvalidasi proposed equation. Hasil validasi menunjukkan bahwa prediksi data yang dihasilkan oleh proposed equation umumnya lebih mendekati data eksperimen (riil) dibandingkan hasil perhitungan menggunakan persamaan non-interaksi. Hal ini membuktikan bahwa persamaan yang diusulkan dapat digunakan untuk memprediksi sifat bahan bakar produk torefaksi basah untuk berbagai komposisi sampah dan temperatur operasi.

Studi ini memberikan empat kontribusi ilmiah: (1) mekanisme torefaksi basah untuk biomassa berbasis pati, (2) interaksi antara sampah organik (berbasis lignoselulosa dan pati) selama proses torefaksi basah, (3) proposed equation untuk memprediksi sifat bahan bakar produk torefaksi basah, dan (4) metode alternatif untuk mencampur atau memisahkan sampah kota campuran.

Kata kunci: Sampah kota, bahan bakar padat, torefaksi basah, non-interaction equation, interaction correction number, dan proposed equation.