

Pengembangan Model Matematika Kinetika Reaksi Torefaksi Sampah

Amrul^{1,a*}, Amrizal^{1,b}

¹Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung, Indonesia
^aamrul@eng.unila.ac.id, ^bamrizal@eng.unila.ac.id

Abstrak

Untuk menjamin keamanan pasokan energi nasional di masa depan diperlukan usaha-usaha yang intensif untuk mencari sumber energi alternatif. Salah sumber energi alternatif yang saat ini belum banyak dilirik adalah sampah kota. Namun dalam aplikasinya, pemanfaatan sampah secara langsung sebagai bahan bakar mempunyai banyak kendala, baik secara teknis maupun non-teknis. Salah satu teknologi yang menjanjikan yang dapat mengkonversi sampah menjadi bahan bakar padat adalah proses torefaksi. Torefaksi merupakan proses perlakuan panas material padat pada temperatur 200-300°C tanpa kehadiran oksigen. Hasil eksperimen torefaksi sampah menunjukkan bahwa produk torefaksi mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dari bahan baku. Pengembangan sebuah model matematika kinetika reaksi torefaksi sampah diperlukan untuk eksperimen yang lebih luas dan kompleks. Model matematika ini dikembangkan dari data-data yang diperoleh melalui eksperimen torefaksi sampah yang telah dilakukan. Model matematika ini diharapkan mampu memprediksi parameter utama torefaksi untuk pengujian berbagai jenis komponen sampah lainnya sehingga pelaksanaan eksperimen dapat lebih efektif dan efisien. Dari model matematika ini diperoleh beberapa parameter kinetika torefaksi, yakni konstanta pre-eksponensial sebesar $1.13 \times 10^{-2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ dan energi aktivasi sebesar $1.2712 \times 10^{-4} \text{ (J/mol)}$.

Kata kunci: torefaksi, kinetika, sampah padat perkotaan, model matematika, nilai kalor.

Pendahuluan

Sumber energi primer nasional saat ini masih bertumpu pada bahan bakar fosil, yakni minyak bumi, gas alam dan batu bara. Meningkatnya populasi penduduk dan semakin besarnya konsumsi energi per kapita menyebabkan sumber energi tersebut semakin cepat menipis dan harganya juga semakin tinggi. Untuk menjamin keamanan pasokan energi nasional di masa depan, maka diperlukan usaha-usaha yang intensif untuk mencari sumber energi

alternatif. Hal ini juga seiring dengan Kebijakan Energi Nasional yang tertuang dalam sasaran Bauran Energi (*energy mixed*) Nasional 2025.

Sementara itu, keberadaan sampah di kota-kota besar di Indonesia belum mendapatkan solusi yang mendasar. Produksi sampah selalu meningkat dari waktu ke waktu, sehingga perlu dicarikan solusinya.

Fraksi massa terbesar sampah kota adalah material organik yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Namun dalam aplikasinya, pemanfaatan sampah secara langsung sebagai bahan bakar mempunyai banyak kendala, baik secara teknis maupun non-teknis. Kendala teknis di antaranya adalah kandungan air yang tinggi, densitas energi yang rendah serta komponen yang heterogen dan bentuk yang beragam. Sedangkan kendala non-teknis adalah berupa bau busuk dan potensi sumber bibit penyakit.

Berbagai kendala tersebut di atas menyebabkan sampah kurang layak digunakan sebagai bahan bakar secara langsung. Sebaliknya, jika dalam pengelolaan sampah diterapkan teknologi yang tepat maka akan didapatkan dua keuntungan sekaligus, yakni berkurangnya jumlah sampah secara signifikan dan dihasilkannya bahan bakar alternatif dari sampah. Salah satu teknologi yang menjanjikan yang dapat mengkonversi sampah menjadi bahan bakar padat adalah proses torefaksi.

Torefaksi merupakan proses perlakuan panas material padat pada temperatur tertentu (sekitar 200-300°C), yang dilakukan pada tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen.

Penelitian yang dilakukan oleh penulis beserta tim secara terus menerus melalui eksperimen menggunakan reaktor *batch* telah menghasilkan bahan bakar padat yang berasal dari torefaksi sampah dengan kualitas setara batubara subbituminous bernilai kalor (HHV) 4.900-6.800 kcal/kg [1].

Makalah ini akan membahas kajian teoritik torefaksi sampah untuk membangun suatu model matematika kinetika reaksi torefaksi sampah. Model matematika ini diharapkan mampu menjadi basis eksperimen torefaksi sampah untuk cakupan yang lebih luas dan kompleks.

Metodologi

Langkah-langkah yang akan ditempuh secara umum adalah penggambaran model, formulasi matematika dan perbandingan model dengan hasil eksperimen. Pada tahap penggambaran model diperlukan berbagai informasi yang terkait dengan sifat-sifat fisik, kimia dan termodinamika spesimen, serta mekanisme dekomposisi spesimen. Secara umum, mekanisme dekomposisi spesimen dapat diamati dari hasil eksperimen torefaksi. Pada tahap penggambaran model ini perlu ditentukan secara tegas penyederhanaan mekanisme dekomposisi, apakah satu tingkat atau dua tingkat atau banyak tingkat serta bentuk reaksinya apakah independen, over lapping atau bersamaan.

Pada tahap formulasi matematika, faktor kunci adalah bagaimana menentukan persamaan diferensial yang sesuai dengan penggambaran model. Setelah itu diperlukan pendefinisian kondisi batas secara spesifik sehingga persamaan bisa diselesaikan. Beberapa konstanta persamaan, misalnya faktor preeksponensial, biasanya diperoleh dari data pengujian melalui pendekatan numerik.

Tahap akhir adalah komparasi model dengan eksperimen, dimana hasil perhitungan berbagai parameter torefaksi dibandingkan dengan hasil yang diperoleh melalui eksperimen.

Bahan yang dibutuhkan untuk penelitian ini adalah data-data hasil eksperimen sebelumnya. Data ini selanjutnya diolah menggunakan program aplikasi yang sudah ada.

Model Matematika Torefaksi

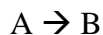
Kinetika reaksi diperlukan untuk memprediksi waktu yang diperlukan untuk memperoleh hasil

yang diinginkan dari suatu proses termo-kima. Struktur molekul bahan bakar padat yang kompleks membuat kinetika reaksi dekomposisi komponennya juga tidak sederhana.

Berbagai model reaksi dekomposisi senyawa organik telah dikembangkan. Model-model yang telah dikembangkan tersebut dapat digolongkan dalam reaksi global satu tingkat, dua tingkat, dan bertingkat banyak (multi step). Pada tingkat-tingkat reaksi tersebut ada yang *independen, overlap*, maupun bersama [2].

Reaksi global satu tingkat memberikan diskripsi umum pada keseluruhan reaksi tetapi sulit untuk membandingkannya secara konsisten dengan peneliti lainya [3]. Bahkan disimpulkan bahwa dekomposisi hemiselulose tidak dapat dimodelkan dengan kinetika sederhana [4]. Mekanisme reaksi bertingkat banyak, memberikan hasil yang lebih baik [5,6,7].

Model kinetika reaksi yang digunakan dalam makalah ini adalah model reaksi global sederhana satu tingkat, yaitu:



Perubahan fraksi mol A menjadi B dinyatakan dengan persamaan berikut ini [2]:

$$\frac{dA}{dt} = -kA \dots\dots\dots (1)$$

Konstanta reaksi *k* dimodelkan dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut [2]:

$$k = A \exp(-E/RT) \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- A = faktor preekapensial (s⁻¹)
- E = energi aktivasi (J/mol)
- R = tetapan gas universal (8,314 J·K⁻¹·mol⁻¹)
- T = temperatur (K)

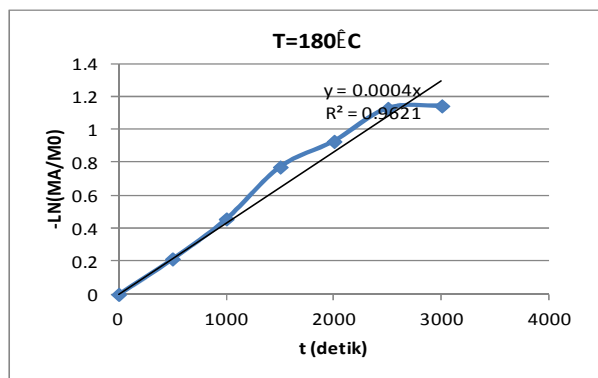
Pembuatan model matematika kinetika reaksi torefaksi dilakukan terhadap komponen sampah kulit jeruk. Perhitungan parameter kinetika reaksi torefaksi kulit jeruk untuk berbagai temperatur dan waktu tinggal ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Parameter kinetika reaksi torefaksi kulit jeruk.

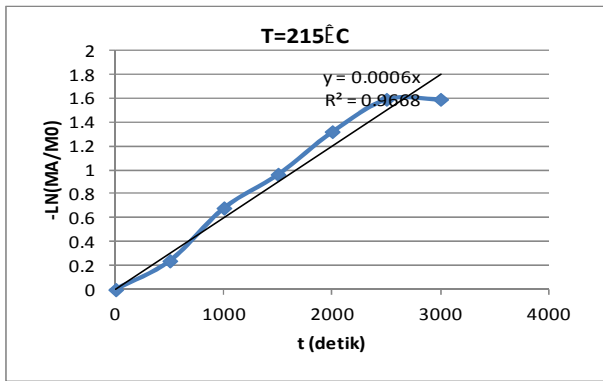
| t (detik) | T= 180°C | | T= 215°C | | T=250°C | | T=285°C | | T=315°C | |
|-----------|----------|-------------|----------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | M1 | -LN (MA/MO) | M2 | -LN (MA/MO) | M3 | -LN (MA/MO) | M4 | -LN (MA/MO) | M5 | -LN (MA/MO) |
| 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 500 | 80.72 | 0.21418381 | 78.69 | 0.239654103 | 71.6 | 0.33407511 | 68.12 | 0.38389933 | 43.27 | 0.837710632 |
| 1000 | 63.34 | 0.45665314 | 50.59 | 0.681416258 | 43.19 | 0.8395612 | 36.79 | 0.99994412 | 17.55 | 1.740116236 |
| 1500 | 46.2 | 0.77219039 | 38.17 | 0.963120319 | 18.08 | 1.71036383 | 21.79 | 1.52371904 | 14.66 | 1.92004749 |
| 2000 | 39.54 | 0.92785737 | 26.7 | 1.320506621 | 18.08 | 1.71036383 | 19.35 | 1.64247777 | 12.02 | 2.118598257 |
| 2500 | 32.39 | 1.12732045 | 20.37 | 1.591106956 | 18.08 | 1.71036383 | 19.35 | 1.64247777 | 10.58 | 2.24620476 |
| 3000 | 31.9 | 1.14256418 | 20.37 | 1.591106956 | 17.14 | 1.76375527 | 19.35 | 1.64247777 | 10.58 | 2.24620476 |

Hasil Dan Pembahasan

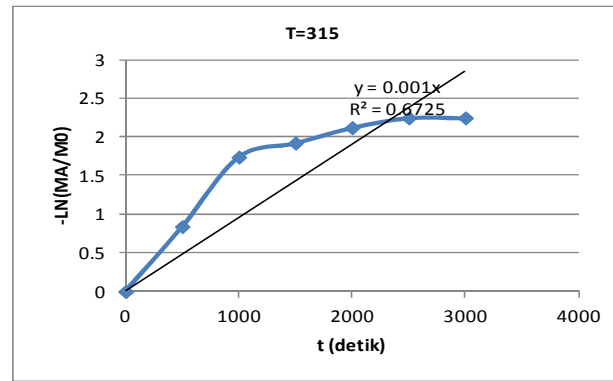
Konstanta reaksi untuk masing-masing temperatur pada proses torefaksi kulit jeruk ditentukan menggunakan Pers. 2 melalui grafik, seperti ditunjukkan oleh Gambar 1.



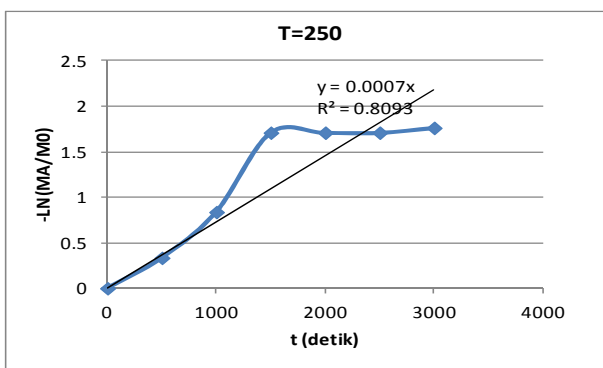
(a)



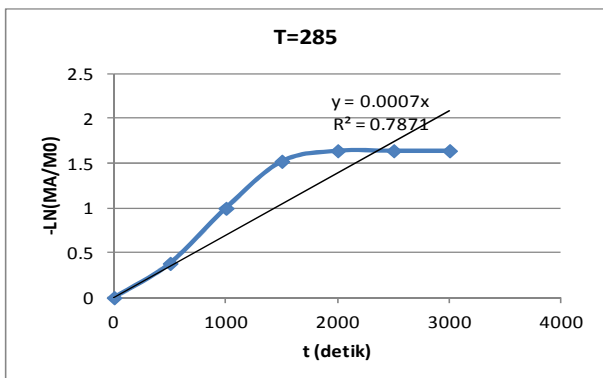
(b)



(e)



(c)



(d)

Gambar 1 Konstanta reaksi torefaksi kulit jeruk untuk temperatur (a) 180, (b) 215, (c) 250, (d) 285, dan (e) 315°C.

Konstanta reaksi gabungan yang dinyatakan oleh persamaan Arrhenius diberikan oleh Pers. 1, yaitu:

$$k = 1.13 \times 10^{-2} \exp(-1.2712 \times 10^4 / RT)$$

Dimana:

- k = konstanta reaksi
- A = $1.13 \times 10^{-2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
- E = $1.2712 \times 10^4 \text{ (J/mol)}$

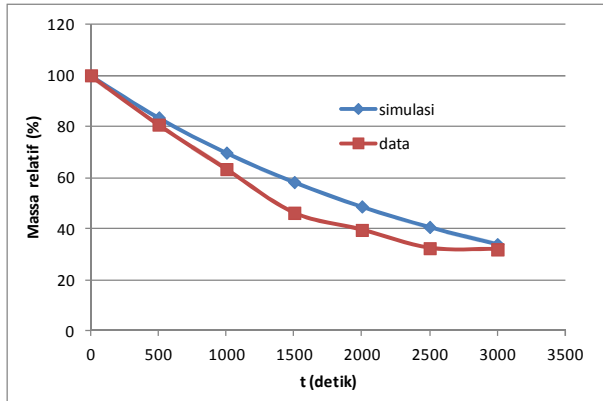
Berdasarkan konstanta reaksi yang diperoleh selanjutnya dapat ditentukan model matematika kinetika reaksi proses torefaksi komponen sampah kulit jeruk melalui persamaan:

$$MA = M0 \cdot e^{-kt} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

- MA = Massa yang tertinggal setiap saat (%)
- $M0$ = Massa awal (100%)
- k = konstanta reaksi
- t = waktu (s)

Perbandingan massa relatif, yakni massa yang tertinggal setiap saat, antara hasil simulasi dan eksperimen pada proses torefaksi kulit jeruk ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2 Perbandingan massa relatif antara hasil simulasi dan eksperimen pada proses torefaksi kulit jeruk.

Dari Gambar 2, grafik hasil eksperimen (data) menunjukkan kecenderungan massa relatif menuju asimtot untuk waktu tinggal yang lebih lama, sementara grafik hasil pemodelan (simulasi) menunjukkan massa relatif cenderung terus menurun. Perbedaan kecenderungan ini mungkin disebabkan oleh asumsi pemodelan yang hanya menggunakan model reaksi satu tingkat. Namun demikian, secara umum dapat dikatakan bahwa massa relatif pada proses torefaksi kulit jeruk dapat didekati dengan simulasi menggunakan model matematika kinetika reaksi yang dikembangkan.

Simpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah model matematika sederhana untuk torefaksi sampah, khususnya komponen sampah kulit jeruk, menggunakan pendekatan model reaksi global sederhana satu tingkat.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa massa padatan yang tertinggal setiap saat dapat diprediksi menggunakan model matematika yang dikembangkan.

Dari model matematika ini diperoleh beberapa parameter kinetika torefaksi, yakni konstanta pre-eksponensial sebesar $1.13 \times 10^{-2} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ dan energi aktivasi sebesar $1.2712 \times 10^4 \text{ (J/mol)}$.

Referensi

- [1] Aryadi S., Amrul, Toto H., Ari D.P., *Solid Fuel From Torrefied Municipal Solid Waste*, Proceeding of Renewable Energy 2010 (2010).
- [2] Prins, Mark J., *Thermodynamics analysis of biomass gasification and torrefaction*, PhD thesis, Technical University Eindhoven, 2005.
- [3] Di Blasi C, Lanzetta M., Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (1997) 40-41.
- [4] Órfão JJM, Antunes FJA, Figueiredo JL., Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model. *Fuel* 78 (1999) 349-358.
- [5] Várhegyi G, Antal MJ, Szekely T, Szabo P., Kinetics of the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and sugar cane bagasse. *Energy & Fuels* 3. (1989) 329-335.
- [6] Várhegyi G, Antal MJ, Jakab E, Szabó P., Kinetic modeling of biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 42 (1997) 73-87.
- [7] Koufopoulos CA, Maschio G, Lucchesi A, Kinetic modelling of the pyrolysis of biomass and biomass components. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 67 (1989) 75-84.