

# DEGRADASI SAMPAH KOTA (*RUBBISH*) DENGAN PROSES PIROLISIS

Edi Mulyadi

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur  
Jl. Raya Rungkut Madya – Gunung Anyar, Surabaya-60594  
Email: [edimulyadi55@gmail.com](mailto:edimulyadi55@gmail.com).

## Abstrak

Penelitian ini dimaksudkan untuk mendisain reaktor pirolisis, dan mengamati pengaruh temperature dan waktu tinggal terhadap kualitas produk pirolisis. Penelitian dilakukan dengan menggunakan reaktor dengan diameter 20 cm dan tinggi 40 cm. Pirolisis dilangsungkan pada temperatur 250-450 derajat C dan waktu reaksi selama 0-30 menit. Pada penelitian ini juga akan diamati pengaruh penggunaan gas inert ( $N_2$ ) terhadap kualitas produk. Dari semua variabel yang dipelajari suhu memberi pengaruh yang paling nyata. Konstante kecepatan reaksi dipengaruhi oleh suhu sesuai dengan persamaan Arrhenious. Dengan nilai aktivasi energi 12145,4 cal./mole. Sesuai pernyataan Westerterp dkk. nilai itu tidak terlalu jauh dari  $10^4$  kal/mol. Hal itu menunjukkan reaksi kimia yang berperan. Konversi volatile matter yang dapat dicapai 46,5%, dan itu terjadi pada waktu 30 menit dan suhu 360°C.

**Kata Kunci** : limbah domestik, sampah, kinetika pirolisis

## Abstract

This research aims to design pyrolysis reactor, develop pyrolysis operating procedure, and to investigate the effect of pyrolysis temperature to liquid product quality. The pyrolysis experiments will be performed in batch reactor equipped from carbon steel with 20 cm inside diameter and 40 cm height. The experimental conditions are as follows: temperature range 250-400 degrees C, and reaction time 0-30 min. The effect of inert ( $N_2$ ) flow rate to liquid product quality will also be observed. From all variables studied, it seemed that temperature had the highest effect. Chemical reaction rate constant was affected by temperature in accordance with Arrhenius equation. The activation energy of k was 12145,4 cal./mole, respectively. This value was not so far from the extreme values ( $10^4$  cal/mole) presented by Westerterp et al. These facts ascertained that the chemical reaction step controlled the overall rate of reaction. The highest volatile matter conversion in this research was 46,5%, and this was obtained at process conditions of 30 minutes and temperature of 360°C. The pyrolytic oil yield increase with the increase of the temperature and its composition becomes more variative and few contents of carboxylic acids and aromatics compound.

**Key words**, domestic waste, rubbish, kinetic, pyrolysis.

## PENDAHULUAN

Pengolahan sampah di kota Surabaya sampai saat ini masih terbatas pada pengolahan sampah secara konvensional yaitu hanya diangkut dari tempat penghasil sampah ke Tempat Pembuangan Sementara dan hanya dionggokan begitu saja ke Tempat Pembuangan Akhir tanpa ada pengolahan. Total timbulan sampah kota Surabaya saat ini mencapai 9099,28

m<sup>3</sup>/hari. Sampah yang terangkut saat ini sebanyak 6.700 m<sup>3</sup>/hari, sehingga sampah yang belum terlayani adalah 2.399,28 m<sup>3</sup>/hari (anonim,2008). Alternatif yang digunakan untuk mengurangi jumlah volume sampah buangan dibagi dalam tiga macam proses, yaitu daur ulang, transformasi thermal dan transformasi biologis. Proses transformasi thermal terbagi tiga macam pengolahan, yaitu

pembakaran (*combustion*), *gasification* dan *pyrolysis*. Pengelolaan dan penanganan sampah dengan metode landfill, open dump, dan pembakaran kurang disukai karena menimbulkan berbagai dampak buruk bagi lingkungan. Berdasarkan karakteristik sampah jenis rubbish (tidak mudah membusuk), terbanyak berwujud sampah plastik. Sampah jenis ini tidak dapat teruraikan seiring dengan waktu (*non-biodegradable waste*), dan berdampak pada peningkatan timbulan sampah. Melihat kenyataan di TPA, bahwa jumlah sampah plastik dan jenis rubbish lain yang tidak dipungut oleh pemulung masih relatif banyak. Penanganan sampah jenis ini pemusnahannya dilakukan dengan cara pembakaran (*incineration*). Cara pengolahan sampah dengan pembakaran bukan metode yang aman bagi lingkungan karena akan meningkatkan emisi gas yang potensial menjadi polutan ( $CO_2$ , CO, Nox, dan SOx ) dan beberapa partikulat pencemar lainnya. Metode pemecahan rantai polimer yang sudah dikenal adalah pirolisis, gasifikasi, degradasi termal maupun katalitik (Rodiansono dkk.,2007). Salah satu alternatif lain penanganan sampah jenis rubbish adalah dengan mengubah sampah menjadi residu padat, tar (*pyrolytic oil*) dan gas (gasoil) melalui teknologi pirolisis. Dengan demikian, perlu dicari data-data kinetika pirolisis dan penentuan kondisi operasi yang sesuai. Data - data itu berguna untuk rancang bangun reaktor pirolisis.

**TINJAUAN PUSTAKA**

Pirolisis atau devolatilisasi adalah proses fraksinasi material oleh suhu. Proses pirolisis dimulai pada temperatur sekitar 230 °C, ketika komponen yang tidak stabil secara termal, dan *volatile matters* pada sampah akan pecah dan menguap bersamaan dengan komponen lainnya. Produk cair yang menguap mengandung tar dan *polyaromatic hydrocarbon*. Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ( $H_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , dan  $CH_4$ ), tar (*pyrolytic oil*), dan arang. Parameter yang berpengaruh pada kecepatan reaksi pirolisis mempunyai hubungan yang sangat kompleks, sehingga model matematis persamaan kecepatan reaksi pirolisis yang diformulasikan oleh setiap peneliti selalu menunjukkan rumusan empiris yang berbeda (Trianna dan Rochimoallah, 2002). Selain itu, plastik merupakan polimer yang berat molekulnya tidak bisa ditentukan, ataupun dihitung. Karena itu, kecepatan reaksi dekomposisi didasarkan pada perubahan massa atau fraksi massa per satuan waktu. Produk

pirolisis selain dipengaruhi oleh suhu dan waktu, juga oleh laju pemanasan. Rodiansono dkk.,(2007) melakukan perengkahan sampah plastik jenis polipropilena dari kemasan air mineral dalam reaktor pirolisis terbuat dari *stainless steel*, dilakukan pada temperatur 475C dengan dialiri gas nitrogen (100 mL/menit).

Fakto-faktor atau kondisi yang mempengaruhi proses pirolisis adalah sebagai berikut :

**a. Waktu** berpengaruh pada produk yang akan dihasilkan karena, semakin lama waktu proses pirolisis berlangsung, produk yang dihasilkannya (residu padat, tar, dan gas) makin naik. Kenaikan itu sebatas sampai dengan waktu tak hingga ( $\tau$ ) yaitu waktu yang diperlukan sampai dengan hasil padatan residu, tar, dan gas mencapai konstan. Nilai  $\tau$  dihitung sejak proses isothermal berlangsung. Tetapi jika melebihi waktu optimal maka karbon akan teroksidasi oleh oksigen (terbakar), menjadi karbondioksida dan abu. Untuk itu pada proses pirolisis penentuan waktu optimal sangatlah penting. Dengan mengambil anggapan bahwa reaksi dekomposisi berlangsung secara progresif atau seragam pada seluruh partikel, maka persamaan kecepatan reaksi yang dinyatakan dalam fraksi massa per satuan waktu adalah

$$dw/dt = - k (w - w_{\infty})^n \dots\dots\dots(1),$$

dengan,

w = fraksi massa sampah, yang dinyatakan dengan

$w = m_t / m_{t_0}$  , bagian,

$w_{\infty}$  = fraksi residu padat pada saat  $t = \tau$  , yang dinyatakan dengan

$w_{\infty} = m_{\infty} / m_{t_0}$  , bagian,

$m_{t_0}$  = massa umpan saat awal pada suhu isothermal, gram,

$m_t$  = massa residu padat setiap saat, gram,

$m_{\infty}$  = massa residu padat saat  $t = \tau$  pada suhu isothermal, gram,

n = orde reaksi,

k = konstante laju dekomposisi termal.

Pada saat (t), fraksi volatil matter yang terdekomposisi mencapai ( $x_s$ ), oleh Lilledahl dan Sjostrom (1994) didefinisikan sebagai *devolatilization degree* yang nilainya adalah:

$$x_s = [m_{t_0} - m_t] / [m_{t_0} - m_{\infty}] \dots\dots\dots(2).$$

**b. Suhu** sangat mempengaruhi produk yang dihasilkan karena sesuai dengan persamaan Arrhenius, suhu makin tinggi nilainya konstanta dekomposisi termal makin besar akibatnya laju pirolisis bertambah dan konversi naik. Pada proses pirolisis suhu rendah (<700) dimulai

pada suhu antara 225-275<sup>0</sup>C (Bilbao and Salvador, 1995). Untuk itu, variasi percobaan agar reaksi pirolisis benar - benar telah terjadi maka diambil kisaran suhu yang perlu dipelajari, yaitu 300-500 °C. Berdasarkan teorema Arrhenius hubungan konstante persamaan reaksi dengan suhu absolute, adalah

$$k = k_o \cdot e^{-(E/RT)} \dots\dots\dots(3)$$

dengan,

$k$  = Konstanta kecepatan reaksi dekomposisi termal

$k_o$  = Faktor tumbukan (faktor frekuensi)

$E$  = Energi aktivasi (kal/gr.mol)

$T$  = Suhu absolute (<sup>0</sup>K)

$R$  = Tetapan gas (1,987 kal/gr.mol <sup>0</sup>K)

maka persamaan (1) dapat dinyatakan dengan

$$dw/dt = -k_o e^{-E/RT} (w - w_\infty)^n \dots\dots(4),$$

jika kecepatan reaksi (4) mengikuti persamaan reaksi orde satu, maka

$$dw/dt = -k_o e^{-E/RT} (w - w_\infty) \dots\dots\dots(5),$$

Pada proses isothermal integrasi persamaan (5) dengan keadaan batas antara  $t = t_1$  sampai dengan  $t = t_2$ , diperoleh

$$\ln(w_1 - w_\infty) - \ln(w_2 - w_\infty) = k_o e^{-E/RT} (t_2 - t_1) \dots\dots(6).$$

Dengan mengartikan kecepatan reaksi sama dengan, kecepatan massa pembentukan hasil (g/menit) per total massa yang dapat terdevolatilisasi ( $m_T$ ), maka:

$$r_h = [1/(m_{t_0} - m_\infty)] dm_h / dt \dots\dots\dots(7),$$

$$r_h = k_h \frac{(m_{h\infty} - m_h)}{(m_{t_0} - m_\infty)}$$

$$[1/(m_{t_0} - m_\infty)] dm_h / dt = k_h \frac{(m_{h\infty} - m_h)}{(m_{t_0} - m_\infty)} \dots\dots(8)$$

dengan:

$r_h$  = kecepatan reaksi pembentukan hasil

$k_h$  = konstanta kecepatan reaksi didasarkan pembentukan hasil

$m_T$  = total massa yang dapat terdevolatilisasi pada suhu isothermal ( $m_{t_0} - m_t$ ), gram,

$m_h$  = massa hasil pada setiap saat, gram,

$m_{h_0}$  = massa hasil pada saat  $t = 0$ , gram,

$m_{h\infty}$  = massa hasil saat  $t = \tau$  pada suhu isothermal, gram,

#### Penyelesaian persamaan (8) diperoleh

$$\ln(m_{h\infty} - m_h) = \ln(m_{h\infty} - m_{h_0}) - k_h t \dots\dots(9).$$

Penerapan persamaan (9) jika digunakan untuk menentukan konstante laju pembentukan tar (pyrolytic oil) dituliskan :

$$\ln(m_{v\infty} - m_v) = \ln(m_{v\infty} - m_{v_0}) - k_v t \dots\dots(10).$$

dengan

$k_v$  = konstante laju reaksi pembentukan tar

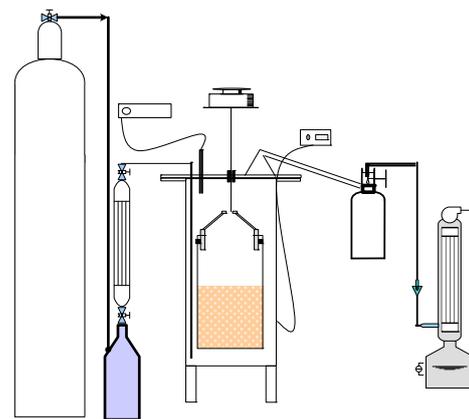
$m_v$  = massa hasil tar pada setiap saat  $t = t$ , gram,

$m_{v_0}$  = massa hasil tar saat  $t = 0$ , gram,

$m_{v\infty}$  = massa hasil tar saat  $t = \tau$ , gram,

#### METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan didalam penelitian ini adalah sampah kota (rubbish), yang berasal dari LPA Benowo dan yang sudah tidak dipungut oleh pemulung. Bahan baku sampah setelah dilakukan pengolahan awal (dikeringkan dan dicacah) dicampur merata dan di cuplik untuk dianalisis kadar air, abu, volatile matter, dan fixed karbon, masing-masing dengan metode ASTM D 3302-97 a, ASTM D 3174-97, dan ASTM D3175-89a.



**Gambar 1. Perangkat Alat Percobaan**

Susunan alat proses pirolisis tersaji pada gambar 1. Terdiri dari reaktor besi, termometer, pemanas listrik, termostat, siklon besi, dan pendingin balik. Pelaksanaan percobaan diawali dengan percobaan pendahuluan pendahuluan yang bertujuan untuk menentukan berat sampah mula-mula ( $t = 0$  menit) pada setiap variasi suhu, yaitu dilakukan dengan memanaskan 500 gram sampah sampai suhu yang dipelajari, lalu timbangan dibaca, dan berat itu dipakai sebagai berat awal ( $W_0$ ) dari umpan pada suhu yang dipelajari. Setelah mencapai suhu proses waktu mulai dihitung sampai mencapai variasi yang dipelajari. Seluruh percobaan dilakukan dengan berat sampah yang diumpankan 500 gram, dan ukuran reratanya 1-2 cm<sup>2</sup>.

Variabel yang dipelajari adalah :

- a. waktu (menit) : 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30
- b. Suhu : (°C) : 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600

Penentuan nilai konversi *volatile matter* ( $x_s$ ) atau juga sering didefinisikan sebagai *devolatilization degree* dihitung berdasarkan persamaan (2). Selain itu, analisis hasil yang dilakukan juga meliputi penentuan nilai kalor dan berat arang yang tertinggal dalam reaktor. Setelah proses pirolisis, berat tar (minyak pyrolytic) dari siklon dan larutan hasil yang berasal kondensor juga ditentukan nilaikalornya.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

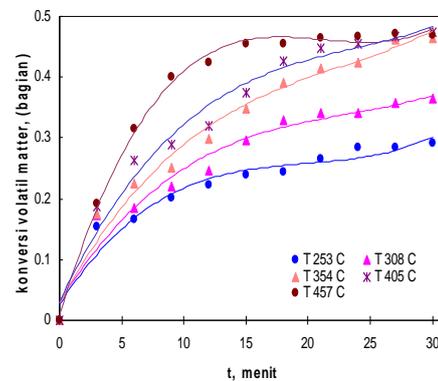
Konversi volatil matter dalam sampah ( $x_s$ ), dihitung menggunakan persamaan (2). Data-data itu dipakai untuk menghitung konstante laju dekomposisi ( $k$ ) yang terdapat pada persamaan (5). Hasil-hasil percobaan pengaruh waktu dan suhu ditunjukkan dalam tabel 1. Dari tabel 1, terlihat bahwa konversi volatil sampah ( $x_s$ ) sangat dipengaruhi oleh waktu pirolisis. Semakin lama waktu proses, maka kesempatan dari volatil matter melakukan dekomposisi lebih lama dan  $x_s$  naik.

**Tabel 1. Pengaruh Waktu dan Suhu Terhadap Fraksi Volatil Sampah (Berat Sampah = 500 gram)**

Waktu (t), (menit)	Suhu (T), (°C)				
	253	308	354	405	457
0	0	0	0	0	0
3	0.153	0.172	0.176	0.188	0.192
6	0.166	0.186	0.224	0.263	0.315
9	0.201	0.221	0.252	0.288	0.401
12	0.223	0.247	0.298	0.321	0.425
15	0.239	0.296	0.349	0.374	0.455
18	0.245	0.329	0.392	0.426	0.456
21	0.265	0.341	0.415	0.449	0.465
24	0.284	0.342	0.424	0.456	0.467
27	0.285	0.358	0.463	0.468	0.472
30	0.291	0.364	0.465	0.473	0.47
$t_{max}$ , ( $\tau$ )	120 men	90 men	90 men	70 men	70 men

Tetapi kenaikan itu sudah tidak begitu nyata setelah waktu pirolisis mencapai 20 menit. Begitu juga pada variasi suhu, semakin tinggi suhu yang digunakan maka semakin besar pula fraksi volatil maternya. Tetapi perubahan sudah tidak begitu nyata jika suhu

telah mencapai 354°C, dan kemudian nilai  $x_s$  menjadi konstan setelah mencapai waktu ultimate  $\tau$  (tabel-1), yaitu keadaan pada saat semua volatil matter sudah terdekomposisi. Pengaruh waktu terhadap  $x_s$ , pada berbagai suhu dapat memberikan ilustrasi mengenai langkah reaksi yang berperan (gambar 2). Berdasarkan model kinetika reaksi heterogen, ternyata semua data dapat dikorelasikan dengan baik terhadap model homogen semu (5). Oleh sebab itu, anggapan bahwa mekanisme reaksi mengikuti model reaksi homogen semu (*progressive-conversion model*), dapat dibenarkan.



**Gambar 2. Hubungan Konversi Volatile Matter dengan Waktu pada berbagai Suhu**

Seperti halnya pengaruh waktu, kenaikan suhu pirolisis juga menyebabkan bahan yang ter volatilisasi semakin besar, sehingga fraksi yang terdekomposisi ( $x_s$ ) naik. Kenaikan itu, terjadi karena gerakan molekul-molekul volatil matter bertambah sehingga frekuensi tumbukan ( $k_o$ ) dan tenaga pengaktif ( $E$ ) meningkat, akibatnya konstante laju dekomposisi ( $k$ ) bertambah besar. Hasil perhitungan nilai  $k$  pada variasi suhu seperti ditunjukkan dalam persamaan (3). Jika diselesaikan dengan cara kuadrat terkecil dengan ralat rerata 4.3% diperoleh:

$$k = 52,4 \cdot 10^{-2} \exp(-12145,4/RT) \dots(7)$$

Nilai frekuensi tumbukan,  $k_o = 0,524/\text{menit}$ , tetapan gas, dan untuk  $R = 1,987 \text{ kal/g.mol.}^\circ\text{K}$ , maka tenaga pengaktif  $E = 12145,4 \text{ kal/g.mol}$ . Atas dasar besarnya nilai  $E$ , maka proses dekomposisi volatil matter lebih dikendalikan oleh peristiwa kimia dari pada proses perpindahan massa. Konversi volatile matter yang dapat dicapai pada penelitian ini sebesar 46.5 %, dan terjadi pada waktu 30 menit, suhu 360 °C dengan nilai kalor tar

(pyrolytic oil) dan arang masing-masing 6020 kal/gram dan 4110 kal/gram

### KESIMPULAN

1. Hasil terbaik terjadi pada waktu 30 menit pada suhu 360 °C, dengan nilai  $x_s$  46.5 %.
2. Nilai kalor pyrolytic oil 6020 kal/gram.
3. Kinetika reaksi mengikuti model homogen semu dengan tenaga pengaktif,  $E = 12145,4$  kal/gmol dan nilai frekuensi tumbukan,  $k_0 = 0,524$ /menit.

### DAFTAR PUSTAKA

- Basu P., 2006, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*; 21– 23: 59– 67: 74– 82.
- Bilbao, R., Arauzo, J., and Salvador, M.L., 1995 “*Kinetics and Modeling of Gas Formation in the Thermal Decomposition of Powdery Cellulose and Pine sawdust*”, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 786-792.
- Cabalero, J.A., Font, R., Marcilla, A., and Conesa, J.A., 1995, “*New Kinetic Model for Thermal Decomposition of Heterogeneous Material*”, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 806-811.
- Hadiwitoto, S., 1989, *Plastic Product Design*, Senior Development Engineer, Fisher Body Division Motor Corp. Warren. Michigan.
- Liliedahl, T. and Sjostrom, K., 1994, “*Modeling of Coal Pyrolysis Kinetics*”, A.I.Ch.E. Journal, 40, 1515.
- Mulyadi, E., 1989, “*Pirolisis Blotong Kering*”, Makalah Seminar IPTEK
- Rodiansono, Trisunaryanti, W., dan Triyono, 2007, *Pembuatan, Karakterisasi dan Uji Aktivitas Katalis NiMo/Z pada Reaksi Hidrorengkah Fraksi Sampah Plastic menjadi Fraksi Bensin*, Berkala MIPA, 17, 2.
- Trianna, N., W. dan Rochimoellah, M., 2002, “*Model Kinetika Reaksi Heterogen pada Pirolisis*”, Prosiding Rekayasa Kimia dan Proses, ISSN 1411-4216, B-16, UNDIP.