

PERUBAHAN MASSA DAN NILAI KALOR CHAR DENGAN VARIASI HEATING RATE DAN TEMPERATUR PADA PIROLISIS SERBUK KAYU MAHONI (SWITENIA MACROPHYLLA)

Farid Majedi¹, Widya Wijayanti², Nurkholis Hamidi²

¹Prodi Mesin Otomotif Fakultas Teknik Politeknik Negeri Madiun Jl. Serayu 84, Madiun 63133, Indonesia

²Teknik Mesin Universitas Brawijaya Jl. MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

Email : farid@pnm.ac.id

ABSTRACT

Product pyrolysis process is char, tar and gas. Char important parameters are the mass and caloric value. Therefore, this study discusses the effect of temperature and heating rate due the mass and low heating value. Variations heating rate used was 673 K/h and 1073 K/h. Temperature heating varied 523 K, 623 K, 723 K, 773 K and 873 K for each heating rate. The heating temperature is provide by electric heater with control system (arduino uno system). The measurement is done for biomass and char mass using measuring cup and measured using mass scale. Bomb calorimeter is used to measure low heating value Sawdust mahogany dried powder with temperatures 383-398 K. Sawdust mahogany dry pyrolysis with variations planned. The heating process pyrolysis is taken for 180 minutes using stopwatch. The result show that the heating rate and temperatur has effect due mass char product. The results show that char mass tend to decrease due to heating rate and temperature increasing.. Low heating value tend to increase due to heating rate and temperature increasing..

Keywords: Pyrolysis, sawdust mahogany, heating rate, temperature, mass, low heating value

PENDAHULUAN

Pirolisis merupakan teknologi penghasil sumber energi alternatif melalui proses dekomposisi kimiabahan organik melalui proses pemanasan dengan sedikit atau tanpa oksigen, di mana biomassa akan mengalami pemecahan struktur kimia menjadi fase gas [1]. Proses dekomposisi termal merupakan rangkaian kompleks yang dipengaruhi banyak faktor seperti *heating rate*, temperatur, tekanan, waktu tinggal, kelembaban, komposisi bahan dan ukuran partikel [2]. Temperatur semakin tinggi maka konstanta dekomposisi termal makin besar mengakibatkan laju pirolisis bertambah dan konversi naik [3]. Pada proses pirolisis, Laju pemanasan (*heating rate*) mempengaruhi produk hasil pirolisis. Laju pemanasan (*heating rate*) tinggi atau cepat maka produk yang dihasilkan berupa minyak pirolisis / tar. Sedangkan jika pada laju pemanasan (*heating rate*) rendah atau lambat maka produk yang dihasilkan akan cenderung lebih ke arang aktif / char. [4].

Dari beberapa penelitian yang berorientasi pada variasi temperatur, laju kenaikan temperatur dan penambahan katalis antara lain: Dengan kenaikan heating rate pada pirolisis lambat bambu memberikan massa char yang cenderung semakin sedikit, [5]. variasi temperatur sangat berpengaruh terhadap kadar air dan Nilai kalor char dari bahan sampah organik [6]. Laju kenaikan pemanasan pada proses pirolisis mempengaruhi produk hasil pirolisis kayu cedar [4]. Dengan temperatur pirolisis yang meningkat maka massa dan volume char yang terbentuk akan semakin kecil pada setiap peningkatan variasi temperatur, sedangkan nilai kalornya meningkat pada kayu mahoni [7].

Dari penelitian sebelumnya terdapat satu variasi temperatur dengan bahan bambu, jenis kayu cedar, sampah organik dan kayu mahoni. Sehingga ada permasalahan penting yang belum diteliti yaitu dengan variasi *heating rate* dan temperatur dengan bahan kayu mahoni. unsur hidrokarbon. Hasil proses pirolisis adalah

Char, tar dan gas. Sebagai salah satu produk proses pirolisis, diperlukan penelitian mengenai karakteristik char seperti massa, volume dan nilai kalor. Dengan adanya problem ini penulis mencoba melakukan riset tentang pirolisis yang memvariasikan laju pemanasan dan temperatur untuk mengetahui massa char hasil pirolisis kayu mahoni. Laju pemanasan (*heating rate*) yang digunakan adalah 673 K/jam dan 1073 K/jam dengan variasi temperatur yang digunakan 523 K, 623 K, 723 K, 773 K dan 873 K pada masing-masing laju pemanasan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui massa char dengan variasi temperatur dan *heating rate*. Hasil massa biomassa diharapkan memperoleh nilai kalor char masing-masing temperatur akhir dan *heating rate*.

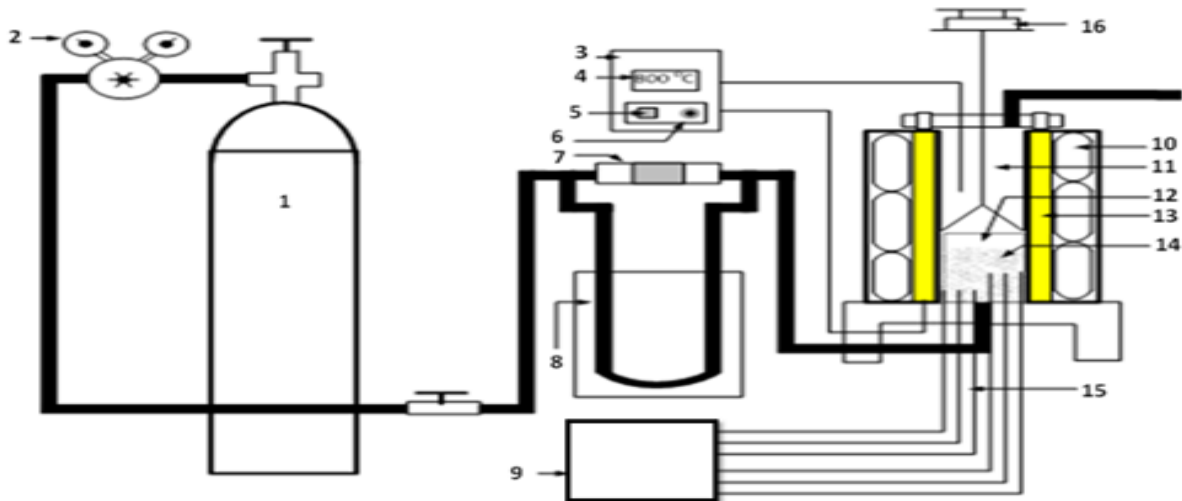
BAHAN DAN METODE PENELITIAN

Bahan baku

Bahan yang digunakan adalah serbuk kayu mahoni kering diayak dengan saringan mesh 18 sehingga memiliki diameter partikel (D_p) sekitar = 1000 mikron. Bahan ini digunakan sebagai sampel pengujian. Sebelum melakukan pengujian, biomassa dikeringkan selama 120-180 menit pada suhu 110 – 125° C di dalam mesin pengering. Setelah kering, serbuk kayu dimasukkan ke mesin untuk di pirolisis.

Pengujian penurunan massa pada biomassa

Dalam pengujian untuk meneliti pembentukan arang pada biomassa selama proses pirolisis dilakukan pada instalasi eksperimen (Gambar 1). Dalam penelitian ini sebelum diuji serbuk kayu dikurangi kadar airnya < 2% dengan cara dikeringkan pada temperatur 110-125° C selama 2-3 jam. Setelah pengeringan, sampel serbuk kayu diambil 200 gr dan dimasukkan dalam tabung kecil. Setelah itu dimasukkan dalam tabung pirolisis dan ditutup.



Gambar 1. Peralatan Pirolisis

Keterangan Gambar 1.

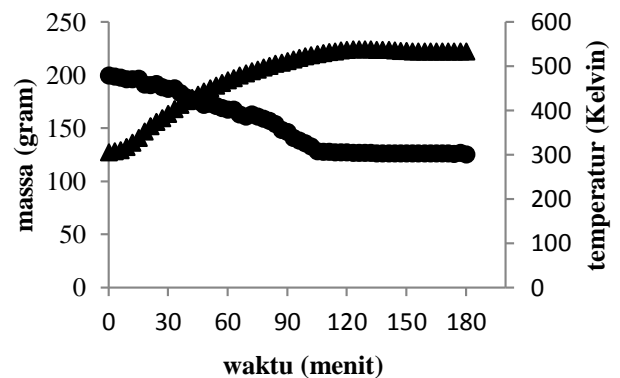
1. Tabung Gas N₂
2. Pressure Gauge
3. Thermocontrol (Arduino Uno)
4. LCD
5. Saklar kontak
6. Lampu indicator
7. Orifice
8. Mano meter “U”
9. Data Logger
10. Rock Wool (isolator)
11. Thermo Couple
12. Cawan / wadah spesimen
13. Heater / pemanas
14. Biomassa
15. Thermo Couple
16. Timbangan elektrik

Gas N₂ dengan *flow rate* 3 l/menit dialirkan ke dalam ruang pemanas pirolisis sampai kadar O₂ < 2 % dari volume ruang pemanas dan buka katup buang pada tabung pirolisis supaya gas O₂ keluar. Thermocontroller (arduino uno) diatur untuk variasi pertama yaitu 523 K dengan laju pemanasan / *heating rate* 673 K/jam selama 3 jam. Catat perubahan penurunan massa spesimen tiap selang waktu 3 menit sekali. Penelitian pertama ini dilakukan terus dengan variasi temperatur 623 K, 723 K, 773 K dan 873 K pada *heating rate* 673 K/jam dan *heating rate* 1073 K/jam. Hasil massa char yang didapatkan dari variasi *heating rate* dan temperatur, dianalisa prosentase penurunan massa dan volume biomassa. Char yang terbentuk diukur nilai kalor pada masing-masing *heating rate* dan temperatur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian didapat data penurunan massa serbuk kayu dengan variasi temperatur dan *heating rate*. Sebagai contoh grafik penurunan massa dan kenaikan temperatur pada temperatur akhir 523 K dengan *heating rate* 673 K/jam (**Gambar 2**)

Penurunan Massa char



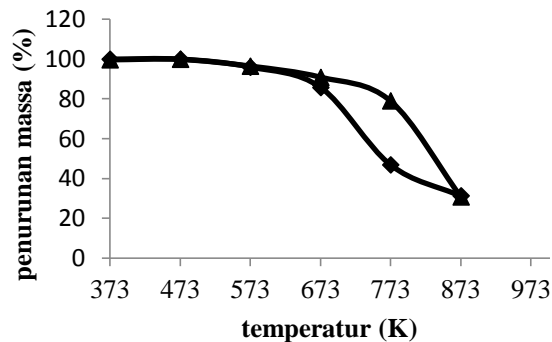
Gambar 2 Grafik Penurunan Massa dan Kenaikan Temperatur pada Temperatur akhir 523 K

- = massa char pada temperatur 523 K
- ▲ = Temperatur (K)

Gambar 2 terlihat dengan dengan kenaikan temperatur maka terjadi penurunan massa yang signifikan mulai temperatur awal 305 K sampai dengan temperatur 523 K (menit 0 s/d menit 120). Dari menit 120 sampai dengan menit 180 menit tidak ada perubahan penurunan temperatur karena temperatur pirolisis sudah mencapai temperatur yang diinginkan (523 K) dan dilakukan penstabilan temperatur tersebut. Penurunan massa pada biomassa terjadi karena unsur-unsur penyusun biomassa terputus ikatannya membentuk uap berbentuk gas. Dan menyisakan unsur C berbentuk padat.

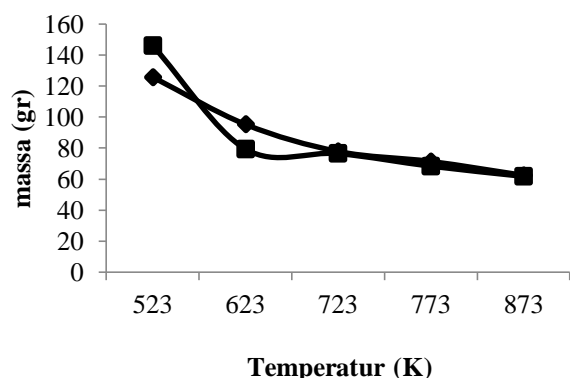
Penurunan massa pada **Gambar 3** menunjukkan hilangnya massa dengan temperatur akhir 873 K pada *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam pada biomassa. Seperti dapat dilihat kurva pada gambar 3, proses devolatilisasi dengan *heating rate* 673 K/jam dimulai pada temperatur sekitar 450 K dan hasil cepat dengan meningkatnya suhu sampai 773 K dan kemudian massa menurun perlahan ke suhu akhir. Penelitian [8], pada $580\text{K} < T_{B, \text{Exp}} < 630\text{K}$, massachar menurun dengan cepat. Hasil massa char padat sekitar 31% pada temperatur 873 K dan *heating rate* 673 K/jam.. Sedangkan proses

devolatilisasi dengan *heating rate* 1073 K/jam dimulai pada temperatur sekitar 470 K dan hasil cepat dengan meningkatnya suhu sampai sekitar 863 K dan kemudian massa menurun perlahan ke suhu akhir. Prosentasemassachar terkecil terjadi pada *heating rate* 673 K/jam dan temperatur 873 K sebesar 31%. Pada gambar 2 juga menunjukkan proses pembentukan arangnya pada temperatur akhir 873 K dan *heating rate* 673 K/jam terlihat sebelum temperatur akhir 873 K massa char lebih kecil daripada temperatur 873 K dan *heating rate* 1073 K/jam karena temperatur biomassa cepat naik cuma arang masih banyak belum terbentuk. Pada akhir temperatur 873 K *heating rate* 1073 K/jam, massa char sekitar 30%.



Gambar 3 Kurva penurunan massa serbuk kayu mahoni
 ◆ = Heating rate 673 K/jam
 ▲ = Heating rate 1073 K/jam

Dari penelitian yang dilakukan didapat grafik pengaruh variasi *heating rate* dan temperatur terhadap massa char yang terbentuk. Dengan semakin besar temperatur maka massa char yang terbentuk semakin kecil tapi kadar C semakin murni. Menurut penelitian [9], Pada temperatur 623 – 723 K terjadi reaksi primer atau dekomposisi dari selulosa sehingga produk yang dihasilkan hanya berupa gas dan char. Pada temperatur 723 – 1073 K produk yang dihasilkan berupa gas₁, tar₁ dan char₁ dan pada temperatur 723 – 1073 K terjadi reaksi tambahan yaitu sebagian dari tar₁ menjadi gas₂. Sehingga semakin tinggi temperatur maka produk gas yang dihasilkan akan semakin banyak.



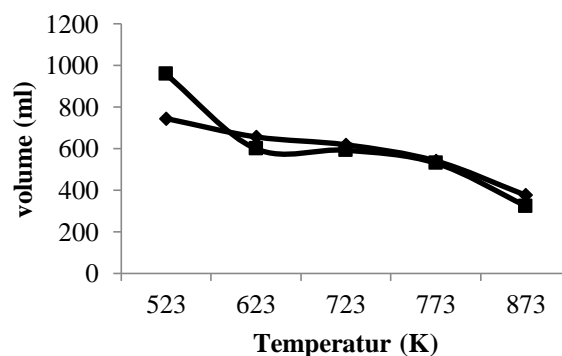
Gambar 4 Kurva massa char pada *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam
 ◆ = massa char pada *heating rate* 673 K/jam
 ■ = massa char pada *heating rate* 1073 K/jam

Sesuai dengan penelitian [8], Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi temperatur maka produk gas yang dihasilkan akan semakin banyak dan massa char akan semakin kecil (**Gambar 4**). Pada *heating rate* besar pada temperatur akhir 623 K terjadi penurunan massa yang tajam karena dengan *heating rate* besar maka sistem semakin cepat menuju temperatur 623 K sehingga selulosa dan hemi selulosa yang terdekomposisi lebih banyak dari pada *heating rate* rendah (selulosa akan terdekomposisi pada temperatur 573 K – 623 K dan membentuk gas, bio-oil, dan char. Sedang Hemi selulosa terdekomposisi pada temperatur pirolisis 473 K - 533 K [9]. Pada temperatur lebih tinggi dari 623 K nilai massa char yang terbentuk hampir sama sampai temperatur 873 K, karena pada range ini kenaikan temperatur serbuk kayu hampir sama antara *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam sehingga hemiselulosa dan lignin yang terdekomposisi hampir sama.

Dalam **Gambar 4** terlihat pada *heating rate* 1073 K/jam massa akhir char lebih rendah dari pada *heating rate* 673 K/jam, berarti tar dan gas yang terbentuk lebih banyak pada *heating rate* 1073 K/jam. Hal ini disebabkan, pada laju pemanasan rendah, waktu reaksi lama dan suhu yang diperlukan sampel untuk dekomposisi kecil [9] Karena temperatur sampel lama naik maka Energi termal sesaat kecil hanya mampu memutuskan ikatan antar atom [2] pada selulosa dan hemi selulosa dalam jumlah sedikit terutama yang mempunyai energi ikatan besar (C-H, H-H, C-O) sedang energi ikatan terkecil yaitu ikatan C-C terputus sehingga tar dan gas yang terbentuk sedikit. Hal ini menyebabkan produk pirolisis cenderung ke arah char. Sementara pada saat dan di wilayah suhu yang sama, tingkat pemanasan yang lebih tinggi memiliki waktu reaksi singkat dan suhu yang diperlukan sampel untuk dekomposisi juga lebih tinggi. Sehingga energi termal sesaat yang besar banyak digunakan untuk memutuskan ikatan atom yang menyelimuti C, sehingga lebih banyak tar dan gas yang terbentuk.

Setelah pengujian diperoleh massa dan volume akhir pada variasi *heating rate* 673 K/jam dan *heating rate* 1073 K/jam dengan temperatur masing-masing : 523 K, 623 K, 723 K, 773 K dan 873 K. (Tabel 1 dan Tabel 2)

Penurunan Volumechar



Gambar 5 Kurva volume char pada *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam
 ◆ = volume char *heating rate* 673 K/jam
 ■ = volume char *heating rate* 1073 K/jam

Gambar 5 adalah volume akhir *char* karena pengaruh variasi temperatur dan *heating rate* hasil pirolisis serbuk kayu mahoni. Dengan semakin besar temperatur maka massa *char* yang terbentuk semakin kecil. pada *heating rate* 1073 K/jam volume akhir *char* lebih rendah dari pada *heating rate* 673 K/jam. Dalam grafik ini trend hampir sama dengan massa *char*

Tabel 1 Massa dan volume *char* pada *heating rate* 673 K/jam

T (K)	m _o (gram)	m _~ (gram)	V _o (cc)	V _~ (cc)
523	200	125,66	1304,27	743,95
623	200	95,32	1304,27	655,63
723	200	77,93	1304,27	617,71
773	200	71,55	1304,27	539,85
873	200	62,62	1304,27	375,19

Tabel 2 Massa dan volume *char* pada *heating rate* 1073 K/jam

T (K)	m _o (gram)	m _~ (gram)	V _o (cc)	V _~ (cc)
523	200	145,86	1304,27	958,54
623	200	79,42	1304,27	599,12
723	200	76,48	1304,27	591,75
773	200	68,37	1304,27	529,46
873	200	61,81	1304,27	322,95

Kehilangan massa serbuk kayu (%)

Kehilangan massa dihitung dengan persamaan:

$$m_L = \frac{m_o - m_{\sim}}{m_o} \times 100$$

Dimana : m_L = Prosentase kehilangan massaserbuk kayu
 m_o = massa awal serbuk kayu
 m_~ = massa *char* akhir temperatur

Contoh kehilangan massa pada temperatur 523 K *heating rate* 673 K/jam:

$$m_L = \frac{200 - 125,66}{200} \times 100 = 37,17\%$$

Kehilangan volume

Kehilangan volume dihitung dengan persamaan:

$$V_L = \frac{V_o - V_{\sim}}{V_o} \times 100$$

Dimana : V_L = Prosentase kehilangan massa
 V_o = Volume awal biomassa
 V_~ = volume *char* akhir temperatur

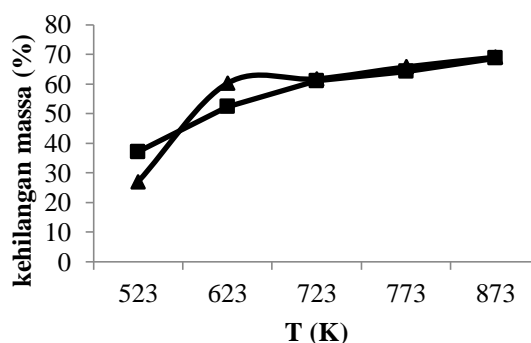
Contoh kehilangan volume pada temperatur 523 K *heating rate* 400 K/jam:

$$m_L = \frac{1304,27 - 958,54}{1304,27} \times 100 = 26,5\%$$

Tabel 3 Kehilangan Massa dan Volume dengan *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam

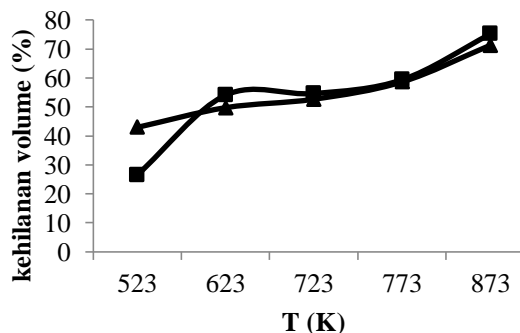
T (K)	m _L HR 673 K/jam (%)	V _L HR 673 K/jam (%)	m _L HR 1073 K/jam (%)	V _L HR 1073 K/jam (%)
523	37,17	42,96	27,07	26,51
623	52,34	49,73	60,29	54,06
723	61,04	52,64	61,76	54,63
773	64,23	58,61	65,82	59,41
873	68,69	71,23	69,1	75,24

Gambar 6 menunjukkan bahwa prosentase kehilangan massa cenderung bertambah sesuai dengan penambahan temperatur pemanasan. Prosentase kehilangan massa pada *heating rate* 873 K/jam dengan variasi temperatur secara umum lebih besar dari prosentase kehilangan massa pada *heating rate* 673 K/jam. Hal ini disebabkan dengan *heating rate* besar maka temperatur lebih cepat menjangal sehingga lebih cepat memutus ikatan unsur-unsur yang menyusun molekul biomassa. Prosentase kehilangan massa minimum terjadi pada variasi temperatur pemanasan 523 K *heating rate* 1073 K/jam yaitu sebesar 27,07% dan kehilangan massa maksimum terjadi pada variasi temperatur pemanasan 873 K *heating rate* 1073 K/jam yaitu sebesar 69,1%.



Gambar 6 Grafik hubungan temperatur dan prosentase kehilangan massa pada *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam

■ = kehilangan massa *char* *heating rate* 673 K/jam
 ▲ = kehilangan massachar *heating rate* 1073 K/jam



Gambar 7 Grafik hubungan temperatur dan prosentase kehilangan volume pada *heating rate* 673 K/jam dan 1073 K/jam

▲ = kehilangan volume *char* *heating rate* 1073 K/jam

—■— = kehilangan volumechar heating rate 1073 K/jam

Gambar 7 menunjukkan prosentase kehilangan volume cenderung bertambah sesuai dengan penambahan temperatur pemanasan. Karena massa benda padat sangat berhubungan dengan volumenya, yaitu semakin kecil massa benda padat maka semakin kecil pula volume benda padat tersebut. Maka pembahasan prosentase kehilangan volume char sama dengan prosentase kehilangan massa char. Prosentase kehilangan volume minimum 26,51% pada heating rate 1073 K/jam dengan temperatur 523 K dan kehilangan volume maksimum sebesar 75,24 % pada heating rate 1073 K/jam dengan temperatur 873 K

.Nilai Kalor

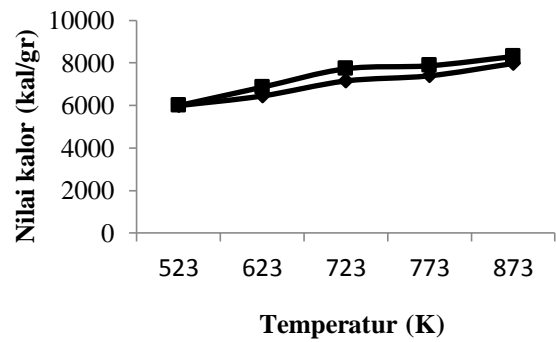
Dari gambar 7 didapat semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi nilai kalornya, ini berlaku pada kedua variasi heating rate. Kemudian nilai kalor char pada heating rate 1073 K/jam lebih besar dari pada nilai kalor pada heating rate 673 K/jam (lihat tabel 3)

Tabel 3 Nilai kalor char pada heating rate 673 K dan 1073 K

Temperatur (K)	Nilai kalor HR 673 K/jam (kal/gr)	Nilai kalor HR 1073 K/jam (kal/gr)
523	6003,567	6001,867
623	6455,555	6869,644
723	7158,236	7737,32
773	7400,862	7880,716
873	7976,646	8313,404

Hal ini disebabkan dengan bertambah naiknya temperatur maka semakin banyak ikatan atom yang dipegang atom C pada selulosa dan hemiselulosa banyak yang terputus sehingga didalam ruang reaksi semakin banyak kadar C (arang) dan semakin murni, maka dengan demikian nilai kalor akan semakin meningkat dengan meningkatnya nilai temperatur.

Nilai kalor char pada heating rate 1073 K/jam lebih besar dari pada nilai kalor pada heating rate 673 K/jam dikarenakan pada laju pemanasan rendah, waktu reaksi lama dan suhu yang diperlukan sampel untuk dekomposisi kecil [10]. Karena temperatur sampel lama naik maka Energi termal sesaat kecil hanya mampu memutuskan ikatan antar atom pada selulosa dan hemiselulosa dalam jumlah sedikit terutama yang mempunyai energi ikatan besar (C-H, H-H, C-O) sedang energi ikatan terkecil yaitu ikatan C-C terputus sehingga tar dan gas yang terbentuk sedikit[2]. Hal ini menyebabkan produk pirolisis cenderung ke arah char. Sementara pada saat dan di wilayah suhu yang sama, tingkat pemanasan yang lebih tinggi memiliki waktu reaksi singkat dan suhu yang diperlukan sampel untuk dekomposisi juga lebih tinggi. Sehingga energi termal sesaat yang besar banyak digunakan untuk memutuskan ikatan atom yang menyelubungi C, sehingga lebih banyak tar dan gas yang terbentuk.



Gambar 7 Nilai kalor char pada heating rate 672 K/jam dan 1073 K/jam

—◆— = Nilai kalor charheating rate 673 K/jam
 —■— = Nilai kalor charheating rate 1073 K/jam

Dalam reaksi dekomposisi umumnya menggunakan panas untuk membantu reaksinya. Saat senyawa memanans, atom akan bergetar lebih keras, dan dapat memutuskan ikatan kimia. Sebagai contoh, jika kalsium karbonat (CaCO₃) dipanaskan dengan suhu tinggi, akan terurai menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO₂). Dalam menguraikan senyawa menggunakan temperatur tergantung pada kekuatan ikatan yang menjaga tetap bersama-sama. Dalam contoh ini, kalsium karbonat kehilangan atom karbon dan dua atom oksigen sebagai CO₂, tetapi kalsium berpegang pada satu atom oksigen karena ikatan kalsium-oksigen yang sangat kuat dan tidak bisa dipatahkan oleh pemanasan dengan suhu yang biasa[11].

Dengan semakin tinggi heating rate dan temperatur maka C yang terbentuk adalah C ikatan rangkap dua dan tiga yang mempunyai energi ikatan tinggi. Energi yang dilepas untuk memutus ikatan rangkap C besar maka nilai kalor besar. Nilai kalor char secara keseluruhan nilainya jauh lebih besar daripada nilai kalor arang hasil pembakaran biasa sebesar 299,22 kal/gr [10].

KESIMPULAN

Efek perubahan temperatur dan heating ratesangat mempengaruhi Massa dan volume char yang terbentuk, dengan semakin tinggi temperatur dan heating rate maka semakin kecil massa dan volume char yang terbentuk. Dengan kenaikan temperatur maka nilai kalor semakin besar. Nilai kalor pada heating rate 1073 K/jam mempunyai nilai lebih besar daripada nilai kalor heating rate 673 K/jam.

DAFTAR PUSTAKA

[1]Fatimah, Is., 2003. Pengaruh Laju Pemanasan Terhadap Komposisi Biofuel Hasil Pirolisis Serbuk Kayu. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia
 [2]Slopiecka, Katarzyna., Bartoci, Pietro., & Fantozzi, Francesco;2011 : Thermogravimetric Analysisand Kinetic Study ofPoplarWood Pyrolysis: Universityof Perugia
 [3] Lim, Siew Mei & Chew, Michael Yit Lin., 2005, Compensation Effects in the Non-isothermal Pyrolysis of Wood, National University of Singapore

- [4] Wijayanti, Widya., & Sasongko, Mega Nur. ; 2013 *Char formation and gas products of woody biomass pyrolysis* : Universitas Brawijaya
- [5] Himawanto, Dwi Aries., Indarto., Saptoadi ,Harwin. , Rohmat,Tri Agung.; 2010; Pengaruh Heating Rate Pada Proses Slow Pyrolysis Sampah Bambu Dan Sampah Daun Pisang; Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses 2010; Semarang: Universitas Diponegoro
- [6] Pralisa Putri, Novy, Nur Fadilah, Imadini; 2013: Pengaruh Suhu Pirolisis terhadap Kadar Air dan Nilai Kalor Char dari Sampah Organik Pasar Segiri Samarinda; Seminar Nasional Teknik Kimia Soebardjo Brotohardjono X Program Studi Teknik Kimia UPN “Veteran” Jawa Timur, Surabaya :UPN “Veteran” Surabaya
- [7] Rosyidi Muhdhor, Hafidz., Wijayanti, Widya.,Anam, Khairul.; 2014; PengaruhTemperaturPirolisisTerhadap KualitasDan *Kinetic Rate Char* Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Mahoni, Malang: Universitas Brawijaya Malang
- [8] Wijayanti, Widya., Tanoë, Ken-ichiro, 2012, Char formation and gas products of woody biomass pyrolysis, International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application[ICSEEA 2012], Energy Procedia 32 (2013) 145 – 152
- [9] Tanoue,Ken-Icuro, Hinauchi, Tatsuya., Oo, Thaung., Nishimura, Tatsuo., Taniguchi, Miki., dan Sasauchi, Ken-Ichi., 2007 Modeling of heterogeneous chemical reactions caused in pyrolysis of biomass particles, Japan : *Advanced Powder Technol.*, Vol. 18, No. 6, pp. 825–840
- [10] Nabawiyah, K., Abtokhi, A., Penentuan Nilai Kalor Dengan Bahan Bakar Kayu Sesudah Pengarangan Serta Hubungannya Dengan Nilai Porositas Zat Padat, Malang : Neutrino vol. 3, Oktober 2010, UIN Maliki Malang
- [11] Budisma, 2015, <http://budisma.net>, diakses pada Kamis, 9 Juli 2015 pukul 4:32 WIB