

INVESTIGASI PROSES PIROLISIS PADA *NON-SWEEP GAS FIXED-BED REACTOR* UNTUK MEMPRODUKSI ASAP CAIR DENGAN BAHAN BAKU BIO-MASSA

Nasruddin A. Abdullah¹, Raghda Novitaningrum¹, Imansyah Ibnu Hakim¹,
Nandy Putra^{1*}, Raldi A.Koestoer¹

1 Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering
Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424, Indonesia
e-mail: nandyputra@eng.ui.ac.id

ABSTRACT:

The utilization of sweep gas in pyrolysis reactors is commonly used, to shorten the resident time of vapor in the reaction zone and to increase liquid yield. The use of nitrogen as a sweep gas will result in additional costs and additional process components. In this research will be investigated about pyrolysis in a non-sweep gas reactor with the thermo-hydraulic approach. In the reactor, the raw materials were decomposed into vapors and liquefied in the liquid collection system to be liquid smoke. This liquid smoke can be utilized as a food preservation, fuel and many kinds of the chemical compound. The heat must be transferred into the reactor to reach decomposition temperature. To obtain maximum efficiency in the pyrolysis process needs investigation about the heating mechanism in the non-sweep gas reactor. The fixed bed reactor was applied in the system and equipped with an electric heater. The heater mechanism was controlled by using proportional integral and differential controller and voltage regulator to maintain wall temperature and to limit the power supplied to the reactor. The temperature was measured using the thermocouple and recorded by data acquisition and computer. The power input was varied at 1000 and 2000 Watt, meanwhile the maximum temperature was 300, 400 and 500 °C with sawdust as a raw material. The objective of the experiment to obtain the characterization of temperature change and heat in the non-sweep gas reactor to the liquid yield product. The maximum liquid was obtain at the maximum temperature of 500 °C and power limited at 1000 Watt and heating rate at 7.38 °C/min.

Keywords: Liquid smoke, bio-mass, non-sweep gas, pyrolysis and reactor

ABSTRAK:

Penggunaan sweep gas pada reaktor pirolisis sudah umum digunakan, untuk mempersingkat masa tinggal uap di dalam reaktor dan pada akhirnya akan meningkatkan cairan yang dihasilkan. Penggunaan nitrogen sebagai sweep gas akan mengakibatkan timbulnya biaya tambahan dan penambahan komponen proses. Pada penelitian ini akan dilakukan investigasi tentang reaktor pirolisis yang tidak menggunakan sweep gas dengan pendekatan thermo-hydraulic. Tujuan dari Penelitian untuk mendapatkan karakterisasi perubahan temperatur dan energi pada non-sweep gas reactor dan bahan baku dari biomassa terhadap produk cair yang dihasilkan. Reaktor pirolisis berfungsi untuk dekomposisi bahan baku dari biomassa menjadi uap dan dicairkan di dalam liquid collection system untuk menjadi asap cair. Asap cair ini dapat digunakan sebagai bahan pengawet makanan, bahan bakar dan berbagai jenis zat kimia lainnya. Energi pemanas diberikan untuk mencapai temperatur reaksi pada biomassa di dalam reaktor, sehingga untuk mendapatkan efisiensi yang maksimum pada operasionalnya, dibutuhkan investigasi tentang mekanisme pemanas pada non-sweep gas reactor. Jenis reaktor yang digunakan adalah fixed bed yang dilengkapi pemanas listrik yang dilengkapi pengatur tegangan sebagai pembatas energi yang masuk ke dalam reaktor. Termokopel dipasang pada beberapa titik untuk memantau kondisi perubahan di dalam sistem dan disambungkan ke data acquisition yang dihubungkan dengan komputer. Penelitian telah dilakukan dengan variasi pada energi masuk 1000 dan 2000 Watt, dan maksimum temperatur yang dibatasi

pada 300, 400 dan 500 °C dengan bahan baku serbuk kayu dari biomassa. Produk cairan maksimum dihasilkan pada kondisi daya yang diberikan 1000 Watt, pada temperatur 500 °C dengan laju pemanasan 7.38 °C/min.

Kata Kunci: Asap cair, biomassa, *non sweep gas*, pirolisis dan reaktor

1. PENDAHULUAN

Asap cair adalah suatu cairan yang dihasilkan dari proses dekomposisi biomassa. Cairan ini dapat digunakan sebagai bahan pengawet makanan karena mempunyai senyawa antimicrobial dan antiocsidant seperti aldehyde, carboxylic acids dan phenols [1, 2]. Selain itu asap cair dapat juga dimanfaatkan sebagai bahan bakar [3], insektisida, pupuk dan zat kimia lainnya [4], bahan bakar untuk transportasi [5] dan untuk bahan pengawet lainnya seperti untuk pengawet kayu dengan dicampurkan dengan senyawa pengawet lainnya [6]. Asap cair mengandung banyak senyawa, pemanfaatan asap cair sangat tergantung pada perlakuan dari prosesnya.

Proses dekomposisi terjadi di dalam reaktor. Proses dekomposisi membutuhkan energi untuk menjalankan prosesnya. Salah satu proses yang paling baik untuk menghasilkan cairan dengan teknik dekomposisi adalah proses pirolisis [7]. Proses ini juga merupakan suatu teknologi yang mampu menghasilkan cairan dibandingkan dengan gas dan arang [7].

Proses pirolisis merupakan proses dekomposisi material di dalam reaktor secara termal tanpa melibatkan oksigen di dalamnya [8]. Proses pirolisis dapat dibagi menjadi dalam beberapa kategori yang dibagi berdasarkan *heat rate* dan masa tinggal uap di dalam zona reaksi. Kategorinya adalah *flash pyrolysis*, *fast pyrolysis*, *intermediate pyrolysis* and *slow pyrolysis* [9-11]. Proses *flash pyrolysis* dan *fast pyrolysis* terjadi pada *heat rate* tinggi dan masa tinggal uap yang singkat pada zona reaksi [12].

Temperatur reaksi di dalam reaktor merupakan kunci dari suatu proses pirolisis. Penggerak awal dari proses reaksi ini adalah kalor yang harus diberikan pada reaktor untuk menaikkan temperatur bahan baku agar proses dekomposisi terjadi pada biomassa [13, 14] secara optimal. *Fast pyrolysis* akan menghasilkan cairan yang lebih banyak jika dibandingkan dengan *slow pyrolysis* [13]. *Intermediate pyrolysis* terjadi pada temperatur 300 – 450 °C dengan *heating Ade* 200-300 °C/minute dan waktu tinggal uap <10 minutes [7]. Prinsip dari proses pirolisis adalah untuk mendapatkan cairan yang maksimum pada temperatur moderat, *heat rate* tinggi, masa tinggal uap yang singkat dan pendinginan yang cepat [15, 16]. Tujuan dari Penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik perubahan temperatur dan energi pada *non-sweep gas reactor* dan bahan baku terhadap produk cair yang dihasilkan.

2. METHODOLOGI/EXPERIMENTAL

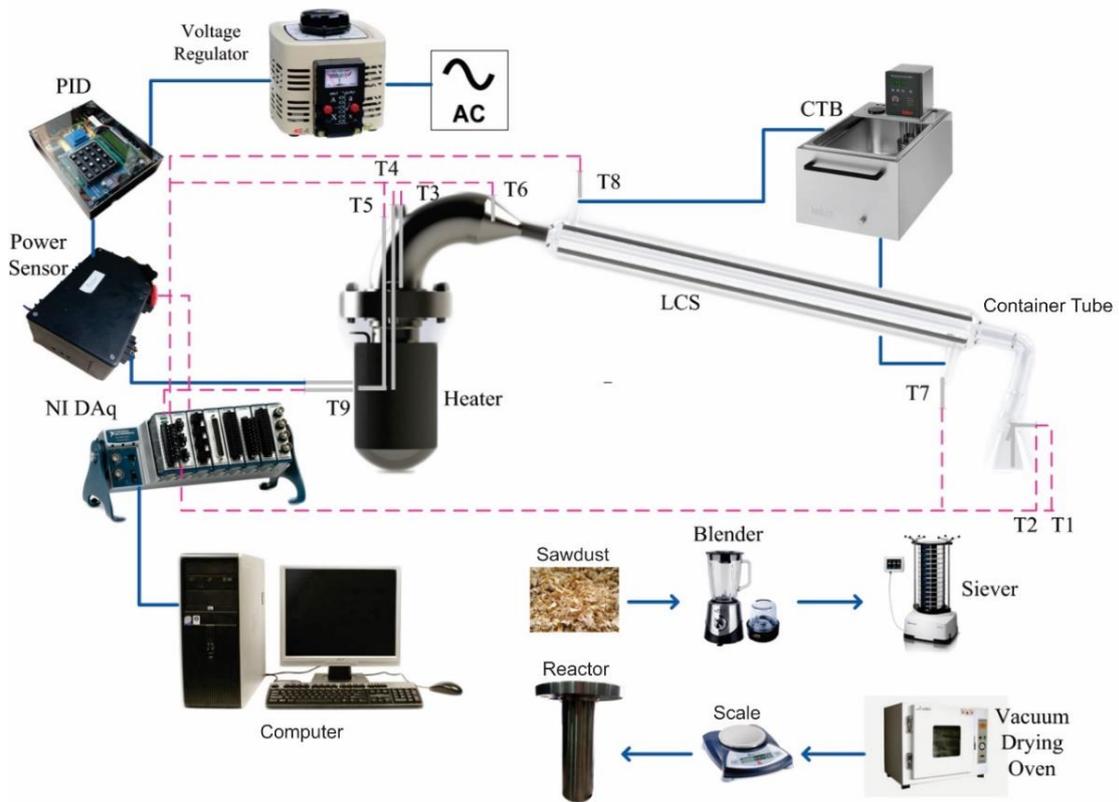
Langkah-langkah dari eksperimen yang dilakukan adalah persiapan bahan baku. Bahan baku yang digunakan pada

penelitian ini adalah serbuk kayu. Selanjutnya serbuk kayu ini dikeringkan sehingga kandungan airnya berkurang sampai di bawah 10%. Bahan baku yang telah dikeringkan di *sieving* sehingga ukuran partikelnya 25 mesh (0.7 mm). Selanjutnya ditimbang seberat 200 gr dan dimasukkan ke dalam reaktor dengan volume tertentu sehingga diperoleh nilai kerapatan bahan baku **0.285 gr/cm³** yang menjadi salah satu variabel dalam penelitian ini. Bahan baku biomassa mempunyai nilai thermal konduktivitas yang rendah, ukuran partikel yang besar akan meningkatkan energi aktivasinya juga akan meningkatkan tahanan thermal dari bahan hal ini akan menghambat kalor masuk ke dalam material [17]. Kandungan air di dalam material akan menaikkan produk cair, namun akan mempengaruhi karakteristik dari produk yang dihasilkan.

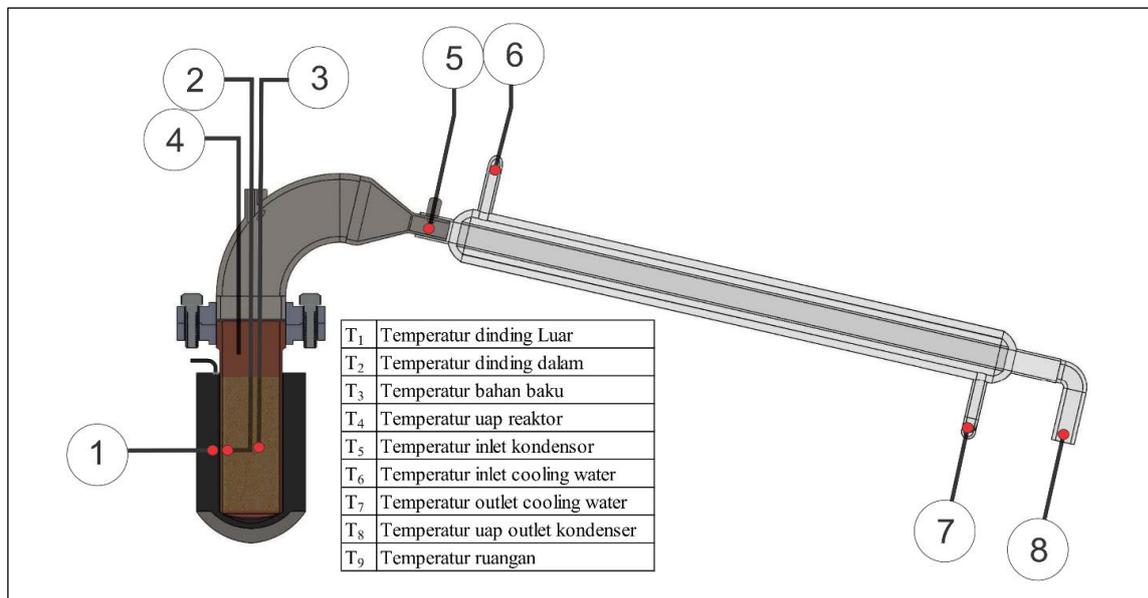
Reaktor skala lab telah digunakan pada penelitian ini dengan jenis *fixed bed reactor* dari bahan SUS 316L, tinggi reaktor 215 mm, diameter dalam 74 mm dengan ketebalan 4 mm. Volume maksimum reaktor adalah 1.065 cm³ dengan massa totalnya 200 gr. Reaktor ini tidak dilengkapi dengan *sweep gas*, uap mengalir secara natural akibat tekanan parsial dari uapnya. Pemanas listrik digunakan untuk mengalirkan energi ke dalam reaktor. Suatu *voltage regulator* dipasang pada kabel *input heater* untuk mengatur daya yang masuk ke dalam *heater*. Selanjutnya suatu perangkat kondenser yang terbuat dari bahan pyrex berfungsi sebagai *liquid collection system* dipasangkan untuk mendinginkan dan mengkondensasikan uap yang keluar dari reaktor. Cairan akan ditampung pada container sedangkan *non condensable gas* dilepaskan ke udara. Non condensable masih memiliki nilai bakar cukup tinggi karena mengandung unsur hidrokarbon.

Pemasangan thermokopel dilakukan pada beberapa titik untuk mendapatkan gambaran aliran dan perubahan kalor pada sistem. Titik tersebut adalah bagian luar reaktor, sebagai *setting point* dari temperatur reaktor, bagian dinding dalam, bahan baku, uap pada zona reaksi, inlet kondenser, outlet kondenser dan *non-condensable gas*. Temperatur air pendingin dipantau dengan memasang thermokopel pada sisi masuk dan sisi keluar. Jenis thermokopel yang digunakan adalah tipe K. *experiment Setup* dapat dilihat pada gambar 1. Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan bervariasi beberapa parameter seperti pemberian daya 1000 dan 2000 watt, batasan temperatur 300 °C, 400 °C, 500 °C. Disini akan dilihat karakterisasi pemanasan yang terjadi di dalam reaktor. Temperatur air pendingin masuk yang digunakan adalah sama seperti temperatur ruangan.

Pada gambar 2 memperlihatkan peletakan termokopel pada proses pirolisis.



Gambar 1. *Experemental set-up* penelitian



Gambar 2. Peletakan termokopel pada sistem pirolisis

3. HASIL DAN DISKUSI

Pada Gambar 3 memperlihatkan grafik distribusi temperatur terhadap waktu dari proses pirolisis. Gambar

3(a) - 3(c) merupakan grafik distribusi temperatur terhadap waktu dengan power yang diberikan sebesar 1000 Watt, sedangkan gambar 3(d) - 3(f) merupakan grafik distribusi temperatur dengan power yang

diberikan sebesar 2000 Watt. Batasan temperatur yang diberikan adalah 300 °C, 400 °C dan 500 °C untuk setiap besaran power. Pendinginan pada kondenser menggunakan fluida air seperti pada temperatur ruangan.

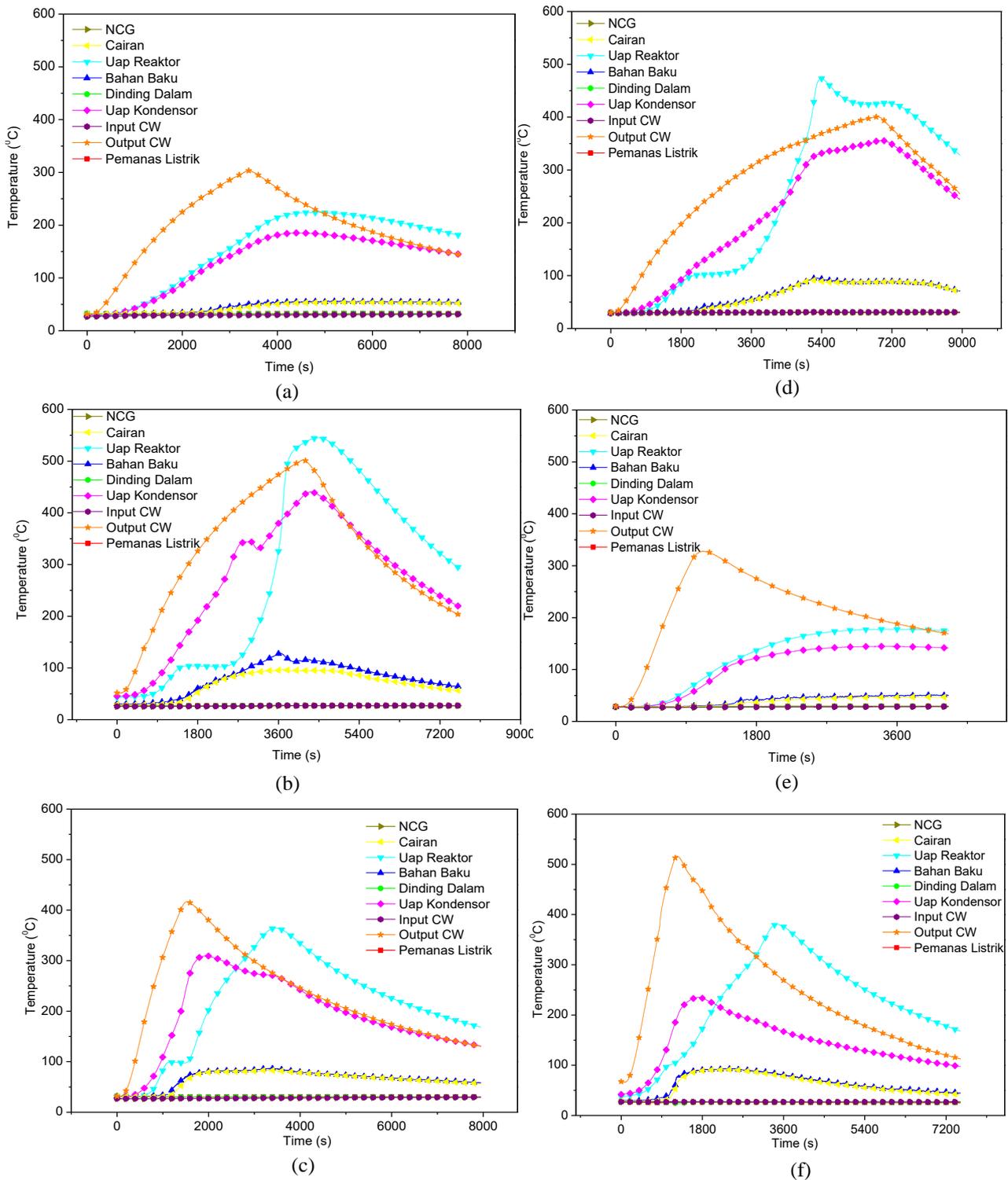
Pada gambar 3(a) dan gambar 3(d) Temperatur dinding luar dan dinding dalam naik secara beriringan, begitu juga dengan temperatur bahan baku, perbedaan hanya terjadi pada gradien temperatur dinding luar terhadap waktu, pada grafik 3(d) mempunyai gradien yang lebih besar, hal ini terjadi karena power yang diberikan lebih besar, sehingga laju pemanasan lebih besar yaitu 19.16 °C/menit berbanding dengan 5.46 °C/menit untuk power 1000 Watt, namun perubahan temperatur dinding dalam dan temperatur bahan baku relatif sama, hal ini terjadi karena kalor membutuhkan waktu untuk mengalir ke dinding dalam dan ke bahan baku. Pemutusan aliran listrik ketika temperatur 300 °C, menyebabkan berkurang dan berhentinya aliran kalor dari dinding luar ke dinding dalam. Sehingga tidak ada perbedaan temperatur yang signifikan pada temperatur dinding dalam dan bahan baku untuk power 1000 dan 2000 Watt. Pada kondisi ini tidak terbentuk uap yang cukup untuk mengalir ke dalam kondenser, karena temperatur dekomposisi dari biomassa belum tercapai dengan sempurna, dan temperatur uap yang terbentuk masih sangat rendah sehingga belum mempunyai tekanan parsial yang cukup untuk mengalir ke area *liquid collection system* (LCS). Temperatur yang rendah pada zona reaksi mengakibatkan cairan yang dihasilkan sedikit.

Pada Gambar 3(b) dan 3(e), batasan temperturnya adalah 400 °C, Pada grafik di dalam gambar tersebut terlihat perbedaan pada gradien temperatur antara power 1000 Watt dan 2000 Watt. Sama seperti kasus sebelumnya, gradien temperatur 2000 Watt lebih besar karena laju pemanasannya lebih besar yaitu 17.25 °C/menit berbanding 6.54 °C/menit untuk power 1000 Watt. Temperatur dinding dalam dan dinding luar naik secara beriringan dan membentuk suatu gradien temperatur terhadap waktu. Namun untuk temperatur bahan baku terlihat suatu fenomena, Pada temperatur 100 °C terlihat mendatar, hal ini diindikasikan terjadinya penguapan kandungan air pada bahan baku, setelah proses penguapan terjadi, temperatur bahan baku naik secara signifikan melampaui temperatur dinding dalam dan dinding luar, hal ini diindikasikan terjadinya *self-ignition* di dalam reaktor. *Self-ignition* terjadi karena adanya udara yang ada di dalam reaktor. Proses

pelepasan kalor laten pada pemberian power 1000 Watt lebih panjang waktunya dibandingkan dengan yang 2000 Watt. Pada batasan temperatur 400 °C, reaktor sudah mulai menghasilkan uap ditandai dengan mulai tingginya temperatur uap di zona reaksi. Temperatur uap yang tinggi akan mampu membawa aliran uap sampai ke kondenser dan dicairkan dengan menggunakan air pendingin.

Pada gambar 3(c) dan 3(f) distribusi temperatur dengan batasan 500 °C, pada batasan temperatur ini terlihat gradient temperatur lebih besar terhadap temperatur maksimumnya. *Heating rate* untuk power 1000 Watt adalah 7.34 °C/menit berbanding 26.18 °C/menit untuk power 2000 Watt. Fenomenanya hampir sama yang terjadi pada batasan temperatur 400 °C, namun beberapa perbedaannya terjadi diantaranya adalah penguapan kandungan air dan *self-ignition* terjadi lebih cepat dibandingkan dengan batasan temperatur 400 °C, hal ini disebabkan oleh waktu pemanasan yang lebih lama pada batasan suhu maksimum 500 °C. Waktu yang ditempuh oleh bahan baku untuk melampaui temperatur dinding luar lebih cepat, ini juga disebabkan oleh cepatnya bahan baku mencapai suhu *self-ignition*. Untuk power 1000 Watt terlihat temperatur uap cukup tinggi melampaui 100 °C, sedangkan untuk power 2000 Watt terlihat lebih rendah, hal ini terjadi karena perbedaan temperatur dinding dalam dan bahan baku cukup tinggi, mengingat bahan baku mempunyai nilai konduktivitas termal yang rendah, sehingga membutuhkan waktu untuk mencapai temperatur yang diinginkan. Pada power 2000 Watt pencapaian batasan temperatur lebih cepat sehingga pemutusan arus juga terjadi lebih cepat.

Cairan yang dihasilkan paling tinggi terjadi pada batasan temperatur ini, terutama dengan pemberian power 1000 Watt, hal ini terjadi akibat aliran uap yang mampu terkondensasi lebih banyak masuk ke dalam kondenser dan pada akhirnya akan menghasilkan cairan. Pada power 1000 Watt temperatur maksimum bahan baku diperoleh sebelum temperatur maksimum dinding, dan pada saat tersebut kondisi temperatur uap sudah meningkat tajam, sedangkan pada kondisi power 2000 Watt, temperatur bahan baku maksimum terjadi pada kondisi sesudah temperatur maksimum dinding, dan kondisi uap di dalam reaktor telah turun. Hal ini mempengaruhi jumlah liquid yang dihasilkan oleh proses.



Gambar 3. Perubahan temperatur pada proses pirolisis untuk temperatur dinding luar pada (a) 300 °C , (b) 400 °C, (c) 500 °C dengan Power 1000 Watt dan (d) 300 °C , (e) 400 °C, (e) 500 °C dengan Power 2000 Watt

Produk Liquid Yang Dihasilkan

Tabel 1 memperlihatkan kondisi operasi dan produk yang dihasilkan, cairan maksimum diperoleh pada batas

temperatur 500 °C, dan power yang diberikan 1000 Watt. Sedangkan pada kondisi yang sama dengan power 2000 Watt, menghasilkan lebih banyak arang. Proses pirolisis yang dioperasikan pada temperatur yang lebih tinggi akan mengakibatkan reaksi kedua (*second*

reaction) yang disebabkan oleh waktu tinggal uap yang lama. Selain laju pemanasan, batasan temperatur,

temperatur uap dalam reaktor juga mempengaruhi jumlah cairan yang dihasilkan.

Tabel 1. Produk yang dihasilkan berdasarkan temperatur reaksi pada reaktor

| No | Power (Watt) | Max. Temp. Dinding Luar (°C) | Temperatur CW (°C) | Power (kWh) | Heating Rate (°C/min) | Produksi (wt%) | | |
|----|--------------|------------------------------|--------------------|-------------|-----------------------|----------------|-------|-------|
| | | | | | | Cairan | Arang | NCG |
| 1 | 1000 | 300 | 29.63 | 0.963 | 5.46 | 0.14 | 96.39 | 3.46 |
| | | 400 | 30.30 | 1.946 | 6.54 | 18.56 | 63.27 | 18.17 |
| | | 500 | 26.67 | 1.133 | 7.34 | 30.50 | 46.07 | 23.43 |
| 2 | 2000 | 300 | 27.70 | 0.513 | 19.16 | 0.10 | 98.52 | 1.38 |
| | | 400 | 28.48 | 0.761 | 17.25 | 9.05 | 77.70 | 13.25 |
| | | 500 | 26.84 | 0.621 | 26.18 | 12.5 | 72.91 | 14.60 |

Proses Penguapan Uap Air, Dekomposisi dan *Heating Rate*.

Pada batasan temperatur 300 °C, belum terlihat garis datar pada temperatur bahan baku, karena *heating rate* yang sangat rendah, sehingga kenaikan temperatur sangat pelan. Pada kondisi batasan temperatur 400 °C, penguapan air pada bahan baku mulai terlihat, terindikasi dengan adanya garis datar pada temperatur bahan baku, garis datar ini menunjukkan terjadi penyerapan kalor laten oleh bahan baku. Setelah proses penguapan temperatur naik secara signifikan, dan bahan baku memberikan kalor kepada sistem, terindikasi dengan naiknya temperatur melampaui temperatur dinding pemanas. Penyerapan kalor laten ini sangat dipengaruhi oleh kandungan air pada bahan baku dan waktu penyerapan sedangkan *heating rate* sangat tergantung dari besarnya power yang diberikan.

Laju pemanasan yang tinggi menyebabkan temperatur dinding luar naik secara cepat, namun kenaikan temperatur ini tidak diiringi oleh kenaikan temperatur bahan baku, hal ini dimungkinkan oleh konduktivitas termal bahan baku yang rendah, sehingga dibutuhkan waktu untuk menaikkan temperatur bahan baku secara bertahap.

Self-ignition pada bahan baku

Self-ignition adalah terjadinya pembakaran secara spontan tanpa adanya percikan api dari luar sistem. Hal ini terjadi karena kondisi dari bahan baku dan temperatur dari bahan baku tersebut, juga adanya sisa oksigen dari sistem dan bahan baku karena sistem bekerja tidak pada kondisi vakum [18]. Pada proses pirolisis dengan bahan baku biomassa, proses *Self-ignition* terjadi setelah penguapan uap air. Proses ini menghasilkan kalor dan membantu proses pemanasan bahan baku. Namun hal ini akan mempengaruhi proses dekomposisi (*cracking*) pada bahan baku, karena sebagian bahan baku mengalami proses pembakaran dan mengurangi proses dekomposisi yang terjadi di dalam reaktor. Secara teoritis, kedua hal ini akan mempengaruhi jumlah cairan yang dapat dihasilkan.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan adalah: *Laju pemanasan* dapat mempengaruhi proses dekomposisi. Pada proses yang menggunakan *fixed bed* reaktor, tanpa injeksi *sweep gas* terlihat bahwa, laju pemanasan yang tinggi tidak selalu lebih baik, namun dengan memberikan laju pemanasan yang tepat akan menghasilkan produk cairan yang lebih banyak. Selanjutnya temperatur uap pada zona reaksi mempengaruhi jumlah liquid yang dihasilkan, karena uap yang mengalir ke dalam *liquid collection system* (LCS) membutuhkan tekanan. Pada sistem pirolisis tanpa *sweep gas*, tekanan parsial yang dihasilkan oleh sistem dipengaruhi oleh temperatur uapnya, agar mampu mencapai area LCS, temperatur uap pada zona reaksi harus dijaga pada kondisi tertentu. Telah terjadi *self-ignition* di dalam proses pirolisis yang secara langsung mempengaruhi besarnya input energi dan jumlah cairan yang dihasilkan. Cairan maksimum didapat pada kondisi batasan temperatur 500 °C dan power yang diberikan 1000 Watt.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRPM Universitas Indonesia atas pendanaan penelitian ini melalui skema Hibah PUPT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Leroi, F.a.J., J.J., *Salt and smoke simultaneously affect chemical and sensory quality of cold-smoked salmon during 5°C storage predicted using bacterial design*. Journal of Food Protection, 2000. **63**: p. 1222-1227.
- [2] Rørvik, L.M., *Listeria monocytogenes in the smoked salmon industry*. International Journal of Food Microbiology, 2000. **62**(3): p. 183-190.
- [3] Lehto, J., et al., *Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass*. Applied Energy, 2014. **116**: p. 178-190.

- [4] Rout, P., et al., *Supercritical CO₂ fractionation of bio-oil produced from mixed biomass of wheat and wood sawdust*. Energy & Fuels, 2009. **23**(12): p. 6181-6188.
- [5] Laird, D.A., et al., *Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar*. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2009. **3**(5): p. 547-562.
- [6] Freel, B. and R.G. Graham, *Bio-oil preservatives*. 2002, Google Patents.
- [7] Roy, P. and G. Dias, *Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **77**: p. 59-69.
- [8] Bridgwater, A.V., *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. Biomass and Bioenergy, 2012. **38**: p. 68-94.
- [9] Miao, X. and Q. Wu, *High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides**. Journal of Biotechnology, 2004. **110**(1): p. 85-93.
- [10] Dawei, A., et al., *Low-temperature pyrolysis of municipal solid waste: influence of pyrolysis temperature on the characteristics of solid fuel*. International journal of energy research, 2006. **30**(5): p. 349-357.
- [11] Chiaramonti, D., A. Oasmaa, and Y. Solantausta, *Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(6): p. 1056-1086.
- [12] Czernik, S., et al., *Production of Hydrogen from Biomass by Pyrolysis/Steam Reforming*, in *Advances in Hydrogen Energy*, C. Grégoire Padró and F. Lau, Editors. 2002, Springer US. p. 87-91.
- [13] Azargohar, R., et al., *Evaluation of properties of fast pyrolysis products obtained, from Canadian waste biomass*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013. **104**: p. 330-340.
- [14] Agarwal, A.K., *Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines*. Progress in energy and combustion science, 2007. **33**(3): p. 233-271.
- [15] Lu, Q., W.-Z. Li, and X.-F. Zhu, *Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils*. Energy Conversion and Management, 2009. **50**(5): p. 1376-1383.
- [16] Akhtar, J. and N.S. Amin, *A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(7): p. 5101-5109.
- [17] Haykiri-Acma, H., *The role of particle size in the non-isothermal pyrolysis of hazelnut shell*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006. **75**(2): p. 211-216.
- [18] Ly, H.V., et al., *Fast pyrolysis of *Saccharina japonica* alga in a fixed-bed reactor for bio-oil production*. Energy Conversion and Management, 2016. **122**: p. 526-534.

