

Pengaruh Laju Aliran Udara terhadap Karakteristik Pembakaran Membara dengan Arah Aliran Searah (*Forward*) pada Material Selulosa

Fadhilah Fitriani, Sherly Veronica, Ratu Hadianiti Putri, Mohamad Lutfi Ramadhan, Muhammad Riki, Samuel Reynaldo, Yulianto Sulistyo Nugroho^(*)

Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Indonesia, Tel. +6221-7270032, Fax. +6221-7270033

E-mail: yulianto.nugroho@ui.ac.id (Y.S. Nugroho)

Abstrak

Pembakaran membara (*smoldering combustion*) adalah salah satu jenis fenomena pembakaran yang banyak terjadi di lahan terbuka, seperti lahan gambut maupun pembakaran pada material selulosa. Sifat pembakaran *smoldering* dapat berlangsung dengan jangka waktu yang lama, sehingga pembakaran *smoldering* ini dapat memberikan dampak lingkungan yang besar. Pada makalah ini disajikan hasil penelitian eksperimental untuk mempelajari pengaruh aliran udara terhadap pembakaran *smoldering* searah (*forward smoldering*) pada material selulosa berupa tembakau. Eksperimen dilakukan dalam skala laboratorium dengan peralatan berbentuk silinder vertikal, dengan aliran udara yang diberikan ke dalam silinder tersebut. Aliran udara diatur dengan menggunakan *flowmeter* untuk mendapatkan variasi data. Data temperatur saat pembakaran berlangsung diukur dengan menggunakan termokopel tipe K, untuk mendapatkan profil distribusi temperatur di dalam silinder. Selain temperatur, laju penurunan massa diukur dengan menggunakan timbangan dan ketebalan asap hasil pembakaran juga diukur menggunakan *opacity-meter*. Ketika aliran sebesar 9 liter/menit diberikan, kecepatan rambat perambatan memiliki nilai maksimal dibandingkan dengan besar aliran yang lain. Secara keseluruhan, hasil yang didapatkan menunjukkan pengaruh yang penting pada distribusi temperatur, laju penurunan massa, dan juga ketebalan asap yang dihasilkan.

Kata kunci : Pembakaran membara, Pembakaran 1-D, Laju perambatan bara, Laju penurunan massa, Ketebalan asap, Material selulosa

Pendahuluan

Secara umum dikenal dua jenis pembakaran, yaitu pembakaran menyala (*flaming fire*) dan pembakaran membara (*smoldering fire*). Pembakaran membara (*smoldering combustion*) terjadi tanpa ditandai adanya lidah api. Sampai saat ini studi mengenai pembakaran membara relatif masih terbatas, namun sangat penting mengingat pemahaman mengenai fenomena ini dapat mempengaruhi langkah-langkah pencegahan dan juga penanggulangan kebakaran lahan gambut. Kebakaran lahan gambut dan hutan di Sumatera dan Kalimantan pada tahun 2015 menghasilkan produksi asap tanpa henti dan mengakibatkan beberapa kota di Sumatera dan Kalimantan tertutup oleh kabut asap tebal. Produksi asap secara masif ini merupakan hasil dari pembakaran jenis pembakaran membara

dimana dapat menghasilkan asap terus-menerus ke atmosfer di permukaan bumi [1]. Dengan latar belakang hal tersebut di atas, maka penelitian ini dilaksanakan untuk mempelajari fenomena pembakaran membara dan pengaruh aliran udara pada berbagai parameter proses pembakaran.

Beberapa percobaan telah dilakukan untuk mempelajari fenomena pembakaran membara. Ohlemiller (1985) mempelajari proses kimia dan perpindahan panas yang terlibat dalam pembakaran *smoldering* dengan mengembangkan pemodelan dari perambatan yang terjadi [2]. Beberapa tahun sebelumnya, Ohlemiller dan Luca (1983) juga melakukan percobaan dan membandingkan karakteristik pembakaran *smoldering* dengan aliran udara berlawanan (*opposed*) dan searah (*forward*) [3]. Dosanjh et al. (1987) mengembangkan permodelan dari *smoldering fire* yang meliputi

dua zona reaksi: reaksi pirolisis non-oksidatif dan reaksi oksidatif dari char [4,5]. Kedua reaksi tersebut terjadi ketika aliran udara searah dengan arah rambat pembakaran. Torero et al. (1993) mempelajari pembakaran *smoldering* secara vertikal pada pembakaran *polyurethane foam* dengan memperhitungkan efek gaya apung, dan menggunakan model teori Dosanjh (1987) untuk menghubungkan data dari eksperimen yang dilakukan [6,7]. Pembakaran membara pada umumnya dipelajari dengan memanfaatkan material *polyurethane foam* dengan aliran udara yang diatus seperti yang telah dilakukan Lei et al. (2005) [8]. Penelitian terbaru juga dilakukan oleh Lei Yi dan Liang Dong (2011) untuk mempelajari pengaruh aliran udara searah (*forward*) terhadap pembakaran membara pada material *polyurethane foam* [9].

Berbeda dengan percobaan sebelumnya yang biasa menggunakan *polyurethane foam* sebagai material yang diuji, pada percobaan kali ini material yang digunakan adalah material selulosa berupa material tembakau. Pada percobaan ini pembakaran membara material tembakau dipicu dari arah bawah, dengan aliran udara yang diberikan searah dengan arah pembakaran tembakau (*forward smoldering*).

Teori

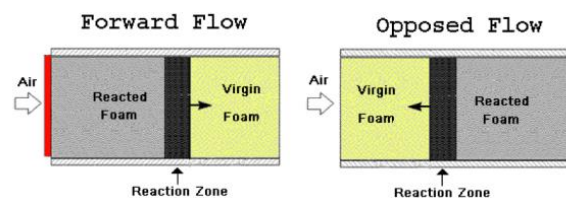
Pembakaran *Smoldering*

Pembakaran *Smoldering* merupakan reaksi pembakaran tanpa nyala api, cenderung lambat, memiliki temperatur rendah, dan bersifat heterogen pada material mampu bakar [2]. Berbeda dengan pembakaran *flaming* yang biasanya bertahan kurang lebih selama satu jam di suatu lokasi, pembakaran *smoldering* adalah pembakaran tanpa nyala dimana terjadi saat oksigen bereaksi dengan permukaan bahan bakar solid [9]. Untuk mempertahankan reaksinya, pembakaran ini membutuhkan panas yang cukup dari reaksi eksotermik dan juga oksigen yang cukup dari lingkungan luar [3].

Reaksi oksidasi dan pelepasan panas terjadi pada permukaan bahan bakar untuk pembakaran *smoldering*, sedangkan pada pembakaran *flaming*, kedua hal tersebut terjadi

pada fase gas yang berada di sekitar bahan bakar. Secara umum, pembakaran bahan bakar solid meliputi berbagai macam reaksi dasar kimia, namun dalam bentuk paling sederhana dapat dibagi menjadi 2 tahap, yaitu tahap pirolisis dan diikuti dengan tahap oksidasi.

Temperatur karakteristik, laju penyebaran (*spread rate*), dan pelepasan panas pada pembakaran membara relatif terbilang rendah apabila dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh pembakaran dengan nyala (*flaming combustion*), dimana temperatur tertinggi pembakaran membara berkisar antara 500-700 °C dan besar nilai kalor pembakaran berkisar antara 6-12 kJ/g [9]. Terdapat dua jenis perambatan utama dalam fenomena pembakaran membara, yaitu *Forward Propagation* dan *Opposed Propagation*. *Forward propagation* atau perambatan searah adalah peristiwa ketika perambatan dari bara api searah dengan arah aliran udara yang terdapat dalam sistem. Sementara itu, *opposed propagation* atau perambatan tidak searah terjadi saat arah perambatan bara api berlawanan arah dengan arah aliran udara yang diilustrasikan pada Gambar 1 [11].



Gambar 1. Arah perambatan bara [11]

Pada sebuah sistem dimana oksigen dikonsumsi, laju perambatan bara ditentukan oleh kesetimbangan antara kalor yang dikeluarkan per massa oksigen yang bereaksi, energi yang dibutuhkan untuk memberi panas pada material utuh (*virgin fuel*), temperatur udara yang memasuki zona bara, dan laju kehilangan kalor ke lingkungan. Laju perambatan bara tersebut dapat dituliskan ke dalam persamaan matematika sebagai berikut [10]:

$$u_{sml} = \frac{\dot{m}_{O_2} Q_{sml} - \dot{m}_g C_{pg} (T_{sml} - T_0) - \dot{q}_{loss}^{AL/AC} + \dot{q}_{ig}''}{\rho_c C_{ps} (1 - \Phi) (T_{sml} - T_0)} \quad (1)$$

dengan u_{sml} sebagai laju propagasi dari proses *smoldering*, \dot{q}_{ig}'' sebagai panas yang dibeikan

oleh pemantik (sumber api), $\dot{m}''_{O_2} Q_{sml}$ adalah panas/kalor yang dikeluarkan oleh proses reaksi *smoldering*, $\dot{m}''_g C_{pg}(T_{sml} - T_0)$ sebagai energi yang dibutuhkan agar udara yang mengalir masuk mencapai temperatur *smoldering*, AL/AC sebagai *heat loss coefficient* yang berarti rasio antara luas area lateral terhadap luas area permukaan *smolder*, dan $\rho_c C_{ps}(1 - \phi)$ adalah karakteristik dari bahan mampu bakar solid yang dibakar [10].

Tembakau Sebagai Material Uji

Tembakau adalah produk pertanian yang diproses dari daun tanaman dari genus *Nicotiana*. Tembakau dapat dikonsumsi, digunakan sebagai pestisida, dan dalam bentuk nikotin tartrat dapat digunakan sebagai obat [12]. Lebih dari 100 jenis tembakau dihasilkan di Indonesia. Dari 200 juta kilogram tembakau yang diproduksi setiap tahunnya di Indonesia, 70% adalah jenis rajangan yang lazim digunakan untuk membuat rokok kretek [13].

Untuk mengetahui spesifikasi termal dari tembakau, Wen-kui et al. (2016) melakukan penelitian mengenai hal tersebut, dimana pengujian secara eksperimental maupun dengan permodelan [14]. Dari percobaan tersebut didapatkanlah spesifikasi termal berupa konduktivitas termal dalam kondisi

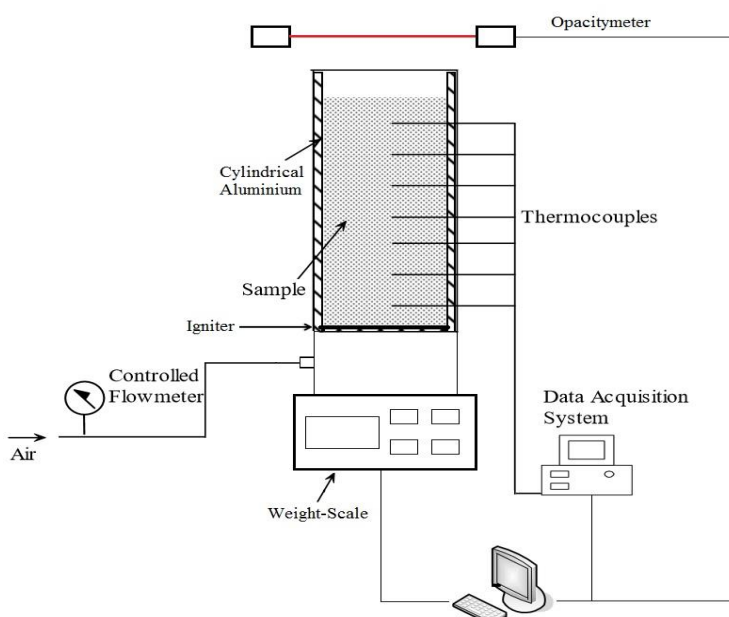
standard temperatur 25 °C dan moisture content antara 12.5 – 22.5%, dengan nilai sebesar 0.08 – 0.2 Watt/mK [14]. Karakteristik lain dari tembakau yang diperlukan dalam percobaan ini adalah *ignition temperature*. *Ignition temperature* dari tembakau adalah sekitar 500 °C (bervariasi temperatur 380–620 °C) [15]. Analisis TGA (*Thermogravimetric*) tembakau telah dilakukan oleh Gabor et al. (2009), menghasilkan sifat material pada Tabel 1-2 berikut [16]:

Tabel 1. Karakteristik Tembakau

	m/m % on a dry weight basis	
	Virginia	Burley
ash	11.9	20.3
total nitrogen	2.7	4.7
total sugars	13.2	0.1
pectins	6.9	9.9
cellulose	10.2	13.0
lignin	3.7	4.2
nicotine	2.8	2.6
polyphenols (chlorogenic acid + rutin)	2.6	0.1

Tabel 2. Analisis Abu Hasil Pembakaran

	m/m %	
	Virginia	Burley
Al	0.7	0.6
Ca	21.5	18.7
Fe	0.3	0.3
K	30.2	28.2
Mg	5.2	3.8
Na	0.4	0.4



Gambar 2. Skema Percobaan

Metode Penelitian

Desain eksperimen

Secara umum apparatus yang digunakan adalah sebuah silinder alumunium yang nantinya akan dimasukkan tembakau, dimana di bagian bawah silinder alumunium tersebut akan diletakan kumparan kawat nikelin yang dialiri arus listrik yang digunakan sebagai heater. Untuk menahan tembakau tidak terjatuh ke ruang udara, akan diletakkan *wire mesh* yang diletakkan persis dibawah kumparan kawat nikelin. Dudukan alumunium akan dimasukan ke dalam silinder pada bagian bawah tepat di atas *wire mesh*, dimana dudukan ini akan berfungsi sebagai tempat *inlet* udara yang disuplai ke dalam silinder. Besar udara yang dialirkan bervariasi sebesar 1, 3, 5, 7, dan 9 Liter/menit (LPM).

Untuk mendapatkan data distribusi temperatur, sejumlah termokopel tipe K akan dimasukkan sepanjang silinder tersebut secara vertikal yang terbagi ke dalam 6 titik. Material tembakau yang dibakar adalah sebanyak 33.3 gram dengan ketinggian 25 cm pada setiap percobaan. Sedangkan untuk mendapatkan data mass loss rate, proses pembakaran akan dilakukan diatas sebuah timbangan. Untuk pengukuran ketebalan asap, alat ukur akan dipasang di bagian atas silinder tepat sebelum asap yang dihasilkan keluar dari silinder. Ketiga alat ukur tadi akan terhubung langsung dengan DAQ, sehingga seluruh proses pengambilan data dilakukan secara *real-time*. Skema penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Persiapan Material Uji

Persiapan sampel yang akan diuji dalam penelitian ini akan berpengaruh pada hasil yang didapatkan. Proses pemilihan sampel sendiri didasarkan pada kebutuhan pengambilan data serta batasan yang ditentukan. Dalam penelitian ini, sampel yang digunakan adalah tembakau. Tembakau yang dipilih merupakan tembakau putih yang alami tanpa adanya campuran material lain.

Sebelum diuji, sampel terlebih dahulu dikeringkan untuk mengurangi *moisture content* yang ada. Pengeringan dilakukan menggunakan oven dengan suhu pengeringan sekitar 100 – 108 °C. Dengan melakukan

pengeringan, diharapkan sampel akan terbakar sempurna tanpa adanya hambatan dari kandungan air yang ada. Hasil dari pengeringan pada tembakau dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tembakau Kering

Parameter Uji

Beberapa parameter yang diukur adalah distribusi temperatur, penurunan massa, serta ketebalan asap. Parameter tersebut diukur dengan semua variasi seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Variabel Eksperimen

Variabel	Aliran Udara (LPM)				
	1	3	5	7	9
Massa (g)	33.3				
Kedalaman (cm)	25				
Material	Tembakau				
Daya Pemanas (Watt)	220				

Hasil dan Analisis

Distribusi Temperatur Pembakaran

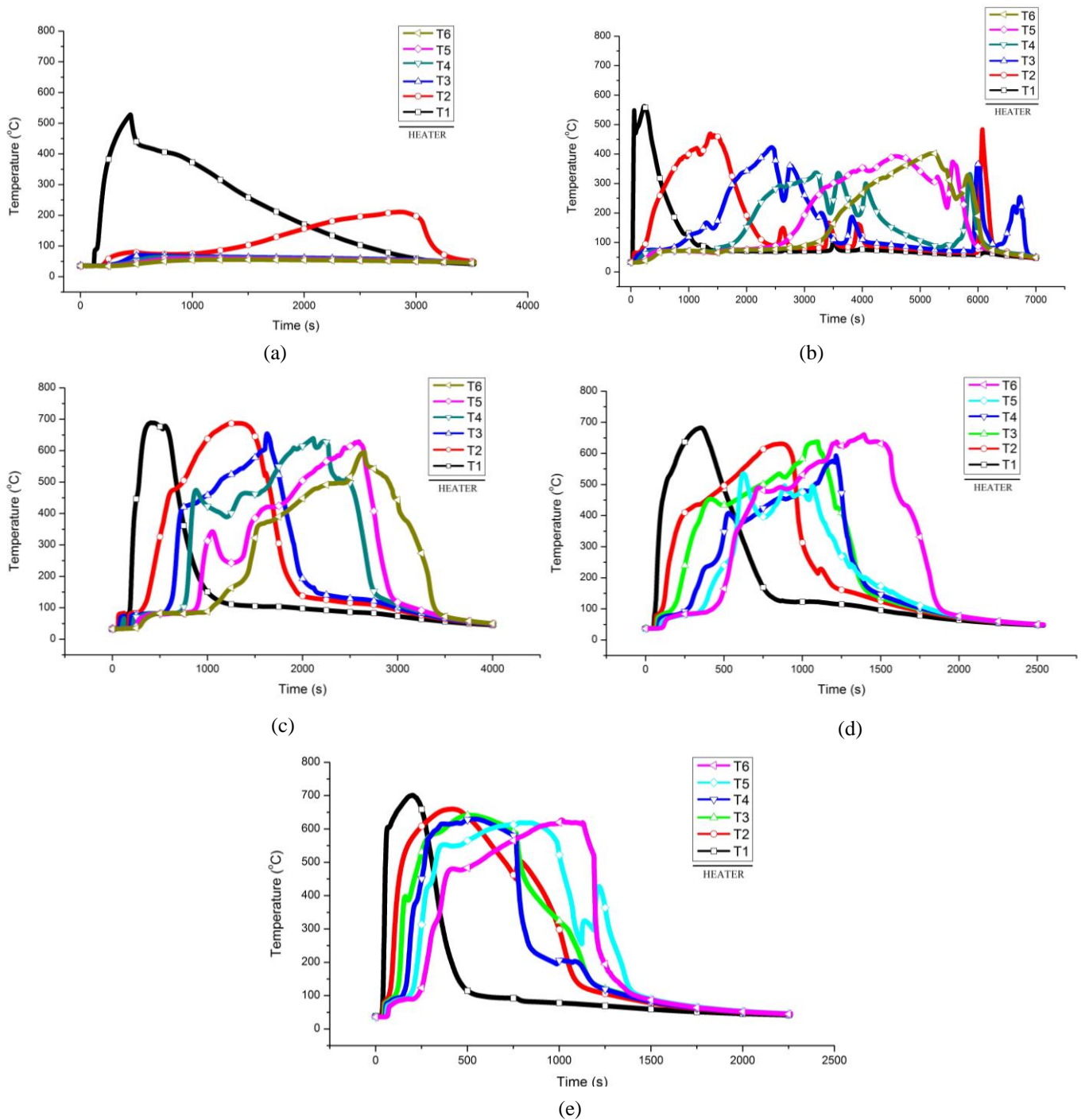
Salah satu data utama dari hasil eksperimen ini adalah data distribusi temperatur. Dari beberapa percobaan, didapatkan 5 grafik distribusi temperatur dari 5 besar aliran udara yang berbeda. Hasil grafik tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.

Saat aliran udara diatur sebesar 1 LPM, proses pembakaran tidak berlangsung hingga selesai. Terlihat bahwa temperatur tertinggi terjadi pada termokopel 1, yaitu sebesar 528°C, dimana temperatur ini cukup untuk memicu pembakaran ke atas, sehingga pada titik termokopel kedua mencapai temperatur sebesar 210°C. Namun, temperatur tersebut tidak mampu memicu pembakaran ke bagian

di atasnya sehingga pembakaran pun mati di tengah jalan. Terlihat juga bahwa pada aliran udara 1 LPM, tembakau yang ada membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai temperatur 500°C dibandingkan dengan pada saat variasi aliran udara lainnya digunakan.

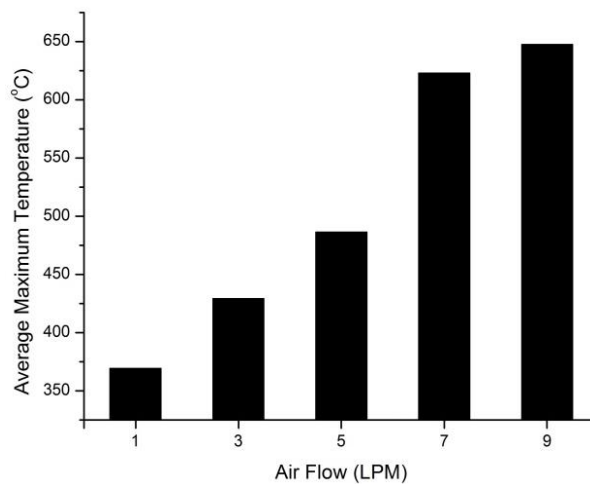
Ketika aliran udara dinaikkan menjadi 3 LPM dan 5 LPM, pembakaran terjadi hingga tembakau terbakar secara menyeluruh. Adanya kenaikan dan penurunan yang membuat grafik tidak stabil pada kondisi aliran 3 LPM dapat diakibatkan oleh jumlah oksigen dari asupan

aliran udara yang diberikan tidak mencukupi untuk membuat reaksi pembakaran terjadi secara sempurna dikarenakan besar aliran udara yang diberikan tidak cukup tinggi. Berbeda dengan 3 LPM, ketika udara yang diberikan sebesar 5 LPM, kurva temperatur terlihat lebih stabil. Pada Gambar 4(c) dapat dilihat bahwa tidak ada kenaikan dan penurunan suhu yang drastis dengan frekuensi yang tinggi. Selain itu juga terlihat temperatur maksimum yang dicapai pada setiap titik meningkat.



Gambar 4. Grafik Distribusi Temperatur, (a) 1 LPM, (b) 3 LPM, (c) 5 LPM, (d) 7 LPM, (e) 9 LPM

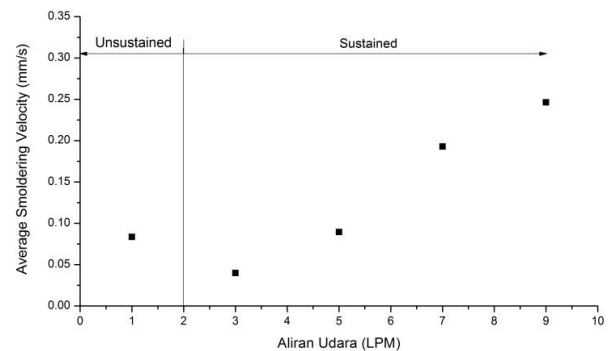
Hal yang berbeda terjadi pada saat aliran udara diatur sebesar 9 LPM, dimana dapat dilihat pada Gambar 4(e) bahwa hampir semua kurva langsung naik ke temperature maksimumnya tanpa ada puncak awal seperti yang terjadi sebelumnya. Hal ini dapat diakibatkan oleh aliran udara yang diberikan sangat besar sehingga membuat proses pembakaran dapat langsung menghasilkan abu tanpa adanya proses akumulasi aliran udara untuk mengoksidasi char seperti yang terjadi pada variasi-variasi aliran udara sebelumnya.



Gambar 5. Diagram Temperatur Maksimum

Dapat dilihat pada Gambar 5 bahwa seiring dengan meningkatnya aliran udara yang diberikan, temperatur maksimum rata-rata yang dicapai pun semakin tinggi, dimana pada saat udara diatur sebesar 1 LPM temperatur maksimum rata-ratanya adalah sebesar 369°C. Kemudian saat aliran udara dinaikkan menjadi 3 LPM, temperatur maksimum rata-ratanya adalah 429°C, lalu pada saat aliran udara diatur 5 LPM, temperaturnya menjadi 486°C. Saat aliran udara diatur 7 LPM, temperatur maksimum rata-rata meningkat menjadi 623°C, dan pada saat aliran udara diatur ke 9 LPM yang paling tinggi yaitu 9 LPM, temperatur maksimumnya pun mencapai 647°C yang merupakan temperatur maksimum rata-rata terbesar.

Dengan menggunakan distribusi temperatur, data kecepatan *smoldering* rata-rata dari setiap variasi aliran udara didapatkan seperti pada Gambar 6. Pada saat aliran udara 1 LPM, terlihat bahwa laju perambatannya lebih cepat dibandingkan aliran udara 3 LPM. Pada perhitungan untuk mendapatkan besar kecepatan *smoldering* rata-rata pada titik 1 LPM, yang terukur adalah kecepatan rambat dari titik termokopel pertama ke titik termokopel kedua karena kenaikan temperatur yang terekam hanya terjadi pada kedua titik tersebut.

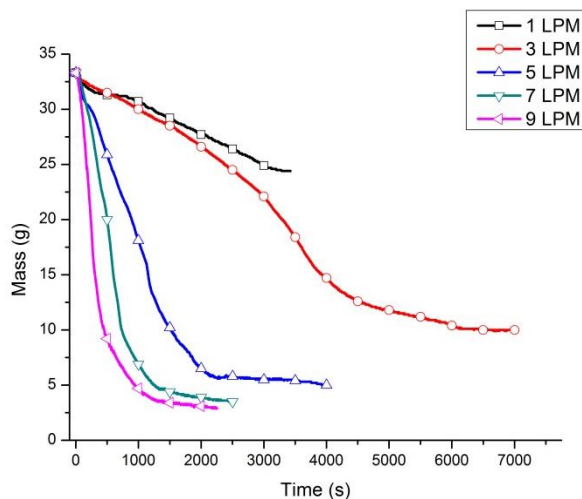


Gambar 6. Grafik Kecepatan Smoldering

Lalu, pada aliran udara 3 LPM sampai 9 LPM, kecepatannya secara berurutan mengalami peningkatan, dimana 3 LPM memiliki kecepatan yang paling rendah, yaitu 0.0399 mm/s, sedangkan 9 LPM memiliki kecepatan yang paling tinggi, yaitu sebesar 0.246 mm/s. Berdasarkan data tersebut, dapat dibuktikan bahwa sesuai dengan persamaan 2.6, laju rambat bara api adalah linear dengan *flow rate* dari aliran udara, sehingga semakin besar aliran udara yang diberikan akan mempercepat laju rambat bara api *smoldering* tersebut.

Penurunan Massa Tembakau

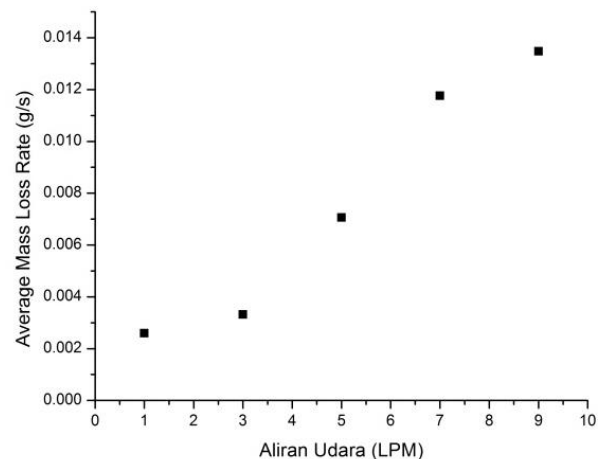
Data lain yang didapatkan dari eksperimen ini adalah penurunan massa. Grafik penurunan massa dari eksperimen ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Penurunan Massa

Jumlah massa awal adalah sama pada setiap percobaan, yaitu 33.3 gram. Saat aliran udara diatur sebesar 1 LPM, terlihat bahwa massa yang terbakar hanyalah sedikit. Hal ini diakibatkan karena proses pembakaran yang tidak berlangsung hingga seluruh material terbakar. Massa sisa material yang ada setelah proses pengambilan data selesai dilakukan adalah sebesar 24.4 gram. Ketika aliran diatur sebesar 3 LPM, pembakaran berlangsung hingga semua material tembakau terbakar.

Sisa massa yang terekam saat pengambilan data selesai dilakukan adalah sebesar 10 gram. Adanya sisa massa ini merupakan massa abu hasil pembakaran material tembakau yang habis terbakar. Saat aliran udara diatur sebesar 5 LPM, sama seperti saat aliran diatur sebesar 3 LPM, seluruh material tembakau terbakar, dengan massa dari abu yang tersisa adalah sebesar 5 gram. Lalu, saat aliran udara diatur sebesar 7 LPM, massa abu sisa pembakaran yang terekam adalah sebesar 3.5 gram. Kemudian, saat aliran udara diatur sebesar 9 LPM, massa dari abu sisa pembakaran adalah sebesar 2.9 gram.



Gambar 8. Grafik rerata laju kehilangan massa.

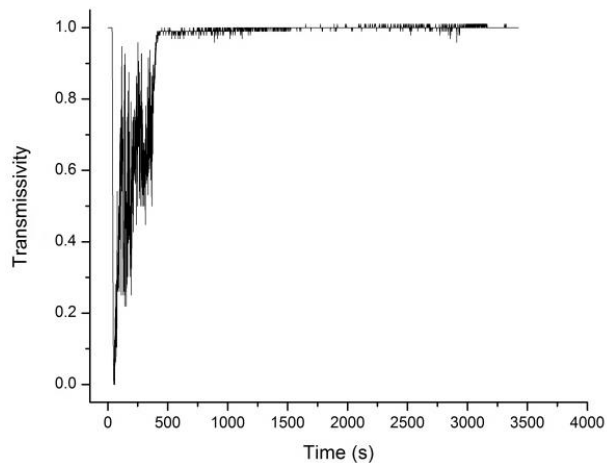
Gambar 8 menunjukkan bahwa aliran udara sangat mempengaruhi laju penurunan massa tembakau, grafik tersebut menunjukkan saat aliran udara 9 LPM, laju penurunan massa mencapai laju tertinggi, yaitu sebesar 0.01348 g/s. Dari grafik di atas juga dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan untuk membakar seluruh material tembakau semakin singkat seiring dengan meningkatnya aliran udara yang diberikan, terkecuali pada kurva 1 LPM yang memang pembakaran yang terhenti di tengah jalan akibat padamnya bara api di tengah-tengah percobaan. Hal ini menandakan bahwa aliran udara sangat mempengaruhi laju penurunan massa pada pembakaran material selulosa berupa tembakau.

Ketebalan Asap Hasil Pembakaran

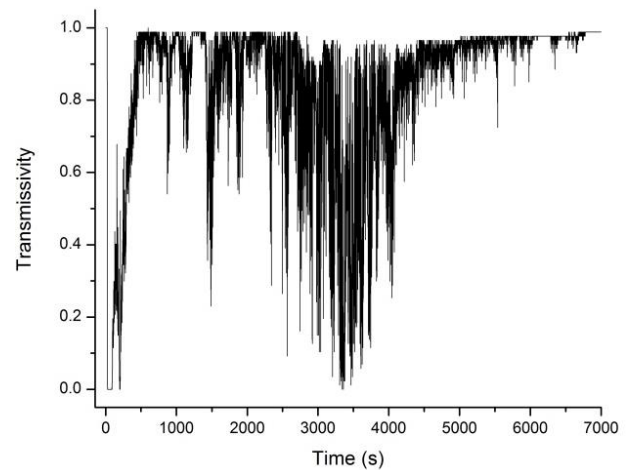
Data hasil percobaan selanjutnya adalah ketebalan asap yang dapat dilihat pada Gambar 8 - 12. Dapat dilihat pada Gambar 8 saat udara diatur sebesar 1 LPM, ketebalan asap mencapai ketebalan maksimumnya hanya pada saat percobaan dimulai. Hal ini terjadi pada seluruh percobaan, yang diakibatkan oleh besarnya energi pemanasan yang berasal dari elemen pemanas, sehingga asap yang dihasilkan lebih tebal. Namun, kemudian dapat dilihat juga bahwa besarnya intensitas cahaya yang dapat diterima sensor (*transmissivity*)

kembali naik dalam waktu yang singkat, dan bertahan ke titik awal hingga percobaan selesai.

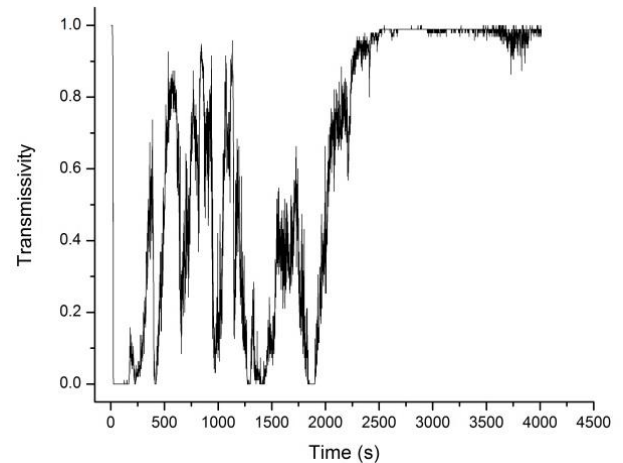
Berbeda dengan grafik sebelumnya, grafik yang ditunjukkan pada Gambar 9 terlihat banyak memiliki kenaikan dan penurunan transmissivity. Data tersebut menandakan bahwa produksi asap dari pembakaran tidak stabil. Hal ini diakibatkan oleh asupan aliran udara yang diberikan. Penyalaan dengan pemanas dilakukan dari arah bawah menyebabkan asap mengalami kesulitan untuk bergerak naik ke permukaan sehingga terbaca oleh sensor *opacitymeter*. Terlihat bahwa di saat percobaan mencapai waktu 3500 s, *transmissivity* mencapai nilai terendah (angka 0). Hal ini dapat terjadi karena bara api sudah merambat ke bagian atas silinder.



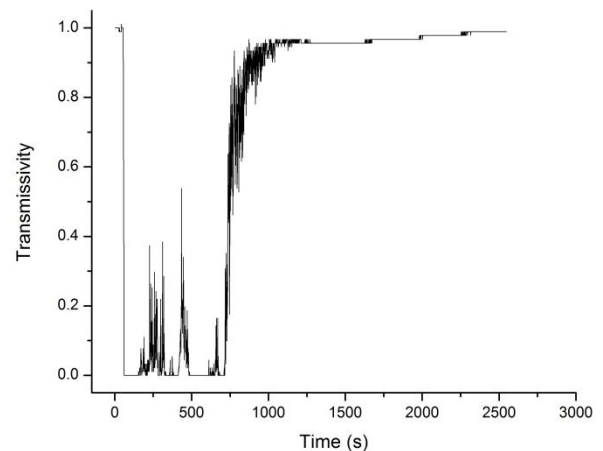
Gambar 8. *Transimissivity* Aliran 1 LPM



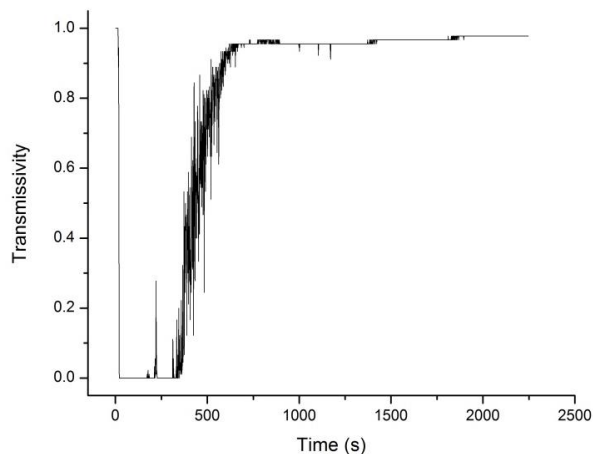
Gambar 9. *Transimissivity* pada aliran 3 LPM



Gambar 10. *Transimissivity* pada aliran 5 LPM



Gambar 11. *Transimissivity* pada aliran 7 LPM



Gambar 12. *Transmissivity* pada aliran 9 LPM

Data eksperimental yang diperoleh dapat mengindikasikan bahwa aliran udara juga berperan penting pada ketebalan asap yang terbaca oleh sensor *opacitymeter*. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya aliran udara mempengaruhi gaya dorong asap untuk melalui celah tumpukan material tembakau dibagian atas yang relatif masih memiliki kandungan air yang tinggi. Asap yang dihasilkan dari pembakaran membara pada lapisan bawah timbunan membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai permukaan. Seiring dengan semakin besarnya aliran udara yang diberikan, asap pun memiliki gaya dorong tambahan untuk melalui tumpukan material tembakau diatasnya, sehingga ketebalan asap pun akan semakin meningkat.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Temperatur

Aliran udara berperan penting dalam bertahannya bara api pada percobaan ini, dimana saat aliran udara 1 LPM diberikan, bara api mati di tengah-tengah percobaan, dan seiring dengan meningkatnya aliran udara yang diberikan, grafik distribusi temperatur yang dihasilkan menjadi lebih

stabil karena asupan oksigen yang diberikan memenuhi kebutuhan proses pembakaran.

2. Penurunan Massa

Aliran udara mempengaruhi berat massa abu sisa hasil pembakaran. Semakin besar aliran udara yang diberikan, semakin ringan pula massa abu sisa hasil pembakaran, dimana massa abu paling ringan didapatkan pada aliran udara 9 LPM, yaitu sebesar 2.9 gram.

3. Ketebalan Asap

Aliran udara mempengaruhi ketebalan asap yang dibaca oleh sensor *opacitymeter*, dimana semakin besar aliran udara yang diberikan, semakin mudah asap untuk naik ke permukaan, yang menghasilkan asap yang keluar ke permukaan sehingga dapat dibaca oleh *opacitymeter* pun akan semakin tebal.

Referensi

- [1] Watts, A., Kobziar, L. N., Smoldering Combustion and Ground Fires: Ecological Effects and Multi-Scale Significance. *Fire Ecology* 9(1): 124-132. 2013.
- [2] Ohlemiller, T.J. Modeling of Smoldering Combustion Propagation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 11. 1985.
- [3] Ohlemiller, T.J., and Lucca, D.A. An Experimental Comparison of Forward and Reverse Smolder Propagation in Permeable Fuel Beds. *Combustion and Flame*, 55. 1983.
- [4] Dosanjh, S.S., Pagni P.J., and Fernandez-Pello, A.C. Forced Cocurrent Smoldering Combustion. *Combustion and Flame*, 68. 1987.
- [5] Dosanjh, S.S., and Pagni, P.J. Forced Countercurrent Smoldering Combustion. *ASME*. 1987.
- [6] Torero, J.L., Fernandez-Pello, A.C., and Kitano, M. Opposed Forced Flow Smoldering of Polyurethane Foam..

- Combustion Science and Technology. 1993.
- [7] Torero, J.L., Fernandez-Pello, A.C. Forward Smolder of Polyurethane Foam in a Forced Air Flow. Combustion and Flame. 1996.
- [8] Lei, P., Chang, L., Jianjun, Z., Linhe, Z., Fei, Y., Smoldering Combustion of Horizontally Oriented Polyurethane Foam with Controlled Air Supply. Fire Safety Science. 2005.
- [9] Yi, L., Dong, L. Experimental Study Upward Forward Smoldering Combustion. Performance-based and Fire Protection Engineering. 2011.
- [10] Rein, G. Smoldering Combustion : SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition. National Fire Protection Association (NFPA). 2016.
- [11] Rein, G. Smoldering Combustion Phenomena in Science and Technology. International Review of Chemical Engineering, 1. 2009.
- [12] Information on <https://yudhajatmiko182.wordpress.com/apa-itu-tembakau/> (diakses tanggal 12 Mei 2016).
- [13] Information on http://www.sampoerna.com/id_id/our_products/farming_in_indonesia/about_tobacco/pages/about_tobacco.aspx (diakses tanggal 13 Mei 2016).
- [14] Zhu, W., Lin, H., Cao, Y., Li, B. Thermal Properties Measurement of Cut Tobacco based on TPS Method and Thermal Conductivity Model. 2014.
- [15] Ermala, P., Holsti, L. R. On The Burning Temperatures of Tobacco. 1955.
- [16] Varhegyi, G., Czegegyi, Z., Liu, C., McAdam, K., Thermogravimetric Analysis of Tobacco Combustion Assuming DAEM Devolatilization and Empirical Char-Burnoff Kinetics. United Kingdom. 2009.