

## PENGARUH MASUKAN UDARA BERTINGKAT PADA PROSES GASIFIKASI PELEPAH KELAPA SAWIT TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN KANDUNGAN TAR

Abdul Gafur<sup>1</sup>, Bambang Sudarmanta<sup>2</sup>, Arif Rahman Saleh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bengkalis, <sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Noverber, <sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Tidar  
Email: <sup>1</sup>gafurpolbeng88@gmail.com

### ABSTRACT

*Indonesia has abundant but underutilized oil palm fronds (OPF). Considering its ample and steady supply, OPF could be a promising source of biomass energy through gasification. One of the most challenging issues concerning the gasification of OPF is the presence of tar. This work presents an experimental study of wood biomass gasification in a moving bed downdraft reactor with two-air supply stages. The method used in this study was experimental, using temperature distribution and tar content as fixed variables and input air ratio (AR) at each level of oxidation and pyrolysis as independent variables. The fuel was fed through a hopper to the drying limit. An ID fan was then turned on, and the fire started simultaneously. Data collection was begun by varying the air intake in pyrolysis and oxidation after reaching the steady-state condition. The temperature distribution was obtained from type K thermocouple installed at each level, and the tar content was obtained using the Brandt method. The results showed that the effect of multistage air input on the temperature distribution along the reactor's height showed a significant increase in temperature. The pyrolysis zone temperature reached 590 °C, which affected a considerable temperature increase in the oxidation zone of 827 °C. The same results are also shown in the tar content results obtained by the lowest content of 37.0 mg/m<sup>3</sup>. These results show that the tar content decreases when given gradual air input in the pyrolysis zone.*

**Keywords:** *downdraft gasification, palm frond, two stage air supply, temperature, tar*

### ABSTRAK

Indonesia memiliki banyak daun kelapa sawit yang berlimpah tetapi kurang dimanfaatkan. Mempertimbangkan pasokan yang besar dan konsisten, daun kelapa sawit dapat menjadi sumber energi biomassa yang menjanjikan melalui proses gasifikasi. Salah satu masalah yang paling menantang mengenai gasifikasi daun kelapa sawit adalah keberadaan tar. Tulisan ini menyajikan studi eksperimental gasifikasi biomassa pelepah kelapa sawit di reaktor *downdraft* dengan tahap pasokan udara bertingkat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen, dengan menggunakan variabel tetap berupa distribusi suhu dan kandungan tar, sedangkan variabel bebasnya berupa masukan udara/rasio udara (AR) disetiap tingkatan oksidasi dan pirolisis. Bahan bakar dimasukkan melalui *hopper* hingga batas *drying* kemudian *ID fan* dinyalakan dan api juga mulai dinyalakan. Setelah tercapai kondisi *stady state* maka dimulai pengambilan data dengan memvariasikan masukan udara di pirolisis dan oksidasi, distribusi suhu diperoleh dari termokopel tipe K yang dipasang disetiap tingkatan dan kandungan tar diperoleh dengan menggunakan metode *brandt*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh masukan udara bertingkat terhadap distribusi suhu disepanjang ketinggian reaktor menunjukkan peningkatan suhu yang signifikan yaitu suhu di zona pirolisis mencapai 590 °C yang juga berpengaruh pada peningkatan yang signifikan pada zona oksidasi sebesar 827 °C. Hasil yang sama juga diperlihatkan pada hasil kandungan tar yang diperoleh kandungan terendah sebesar 37,0 mg/m<sup>3</sup>. Hasil ini memperlihatkan kandungan tar turun ketika diberikan udara bertingkat pada zona pirolisis.

**Kata kunci:** gasifikasi tipe *downdraft*, pelepah kelapa sawit, dua masukan udara, temperatur, tar

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara produsen terbesar dalam penyediaan minyak kelapa sawit di dunia. Saat ini, limbah pertanian dan domestik merupakan bagian utama yang menjadi sumber biomassa. Indonesia merupakan salah satu negara produsen terbesar dalam penyediaan minyak kelapa sawit di dunia. Perkebunan kelapa sawit di Indonesia semakin bertambah, berdasarkan buku statistik komoditas kelapa sawit terbitan Ditjen Perkebunan pada tahun 2016 luas areal kelapa sawit mencapai 8.774.226 Ha dengan produksi 33.500.691 ton CPO. Salah satunya yang terluas adalah wilayah Sumatera yaitu seluas 2.681.687 Ha dengan produksi 11.524.991 ton CPO, Provinsi Riau dengan luas area 820.811 Ha dengan produksi 3.591.262 ton CPO merupakan provinsi yang mempunyai perkebunan kelapa sawit terluas disusul berturut-turut Provinsi Sumatera Utara seluas 3.002.343 juta Ha, (Ditjenbunpertanian, 2016). Hampir semua bagian dari pohon kelapa sawit secara komersial digunakan, terutama di sektor energi dan manufaktur. Namun demikian, pelepah kelapa sawit memiliki penggunaan yang sangat terbatas, hanyalah dibiarkan kering kemudian dibakar dan ada pula yang dibiarkan membusuk, padahal pelepah kelapa sawit memiliki potensi yang tinggi dan layak digunakan sebagai bahan baku biomassa gasifikasi (Atnaw S.M *et al*, 2014). Hampir semua bagian dari pohon kelapa sawit secara komersial digunakan, terutama di sektor energi dan manufaktur. Komposisi kimia dari pelepah kelapa sawit terdiri dari 49,8% selulosa, 23,5% hemiselulosa, 20,5% lignin dan 2,4% abu) (Samiran, *et al*, 2015). Namun demikian, pelepah kelapa sawit memiliki penggunaan yang sangat terbatas, hanyalah dibiarkan kering kemudian dibakar dan ada pula yang dibiarkan membusuk, padahal pelepah kelapa sawit memiliki potensi yang tinggi dan layak digunakan sebagai bahan baku biomassa gasifikasi (Atnaw, *et al* 2013). Kandungan *syngas* hasil gasifikasi pelepah kelapa sawit memperlihatkan H<sub>2</sub> 10,53%, CO 24,94%, CH<sub>4</sub> 2,04%, dan nilai *heating value* 5,31 MJ/Nm<sup>3</sup>,

sehingga dapat disimpulkan gasifikasi pelepah kelapa sawit layak digunakan sebagai biomassa alternatif untuk diversifikasi energi menggunakan teknologi gasifikasi (Guangul, *et al.*, 2014).

Gasifikasi adalah proses termokimia yang mengubah bahan karbon seperti biomassa menjadi bahan bakar gas yang berguna atau menjadi bahan baku kimia melalui proses oksidasi parsial dengan udara, oksigen, atau uap (Basu, 2010). Proses gasifikasi umumnya dibagi menjadi empat tingkatan: (1) Pengerinan, (2) Pirolisis (3) Oksidasi, dan (4) Reduksi. Gas hasil proses gasifikasi mengandung kotoran seperti tar, partikel, nitrogen, dan sulfur (H<sub>2</sub>S, COS) (Molino, *et al.*, 2016). Salah satu upaya untuk mengurangi kadar tar dalam proses gasifikasi adalah pemilihan tipe reaktor. Dalam hal pemilihan reaktor banyak peneliti menggunakan reaktor tipe downdraft. Gasifikasi tipe downdraft memiliki keuntungan dari efisiensi konversi yang lebih tinggi, dengan kandungan tar dan konten partikulat yang rendah dalam *syngas* dibandingkan jenis reaktor lain.

Bukan hal baru jika masalah tar dianggap sebagai salah satu hambatan utama untuk industrialisasi teknologi gasifikasi biomassa (Chen, *et al.*, 2009). Gas yang mengandung tar tinggi tidak dapat digunakan dalam aplikasi langsung untuk mesin pembakaran internal (<50 mg/Nm<sup>3</sup>) (Bhattacharya, *et al.*, 1999). Literatur lain mengatakan tar dapat ditoleransi kurang dari 100 mg/Nm<sup>3</sup>. Menurut Devi (2003), metode penghapusan tar dapat dibagi menjadi dua metode, metode primer dan metode sekunder. Metode utama adalah metode pembersihan gas yang terjadi di dalam *gasifier*, Sudarmanta (2009) telah melakukan serangkaian percobaan gasifikasi sekam padi dengan dua tingkat saluran udara, udara pertama di zona oksidasi dan udara kedua dimasukkan ke dalam reaktor, hasil ini sebagai berikut: pengeringan pada suhu 100 - 150 °C, pirolisis hingga 300 °C, oksidasi parsial hingga 960°C dan reduksi pada suhu 400 - 500 °C. Suhu tinggi dicapai di zona kedua karena penambahan udara di tingkat kedua membantu mengurangi tingkat tar ke nilai yang lebih rendah (Martinez, *et al.*, 2011). Uap tar yang terbentuk

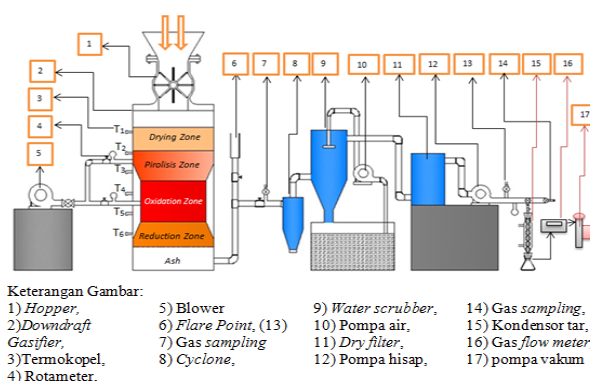
ke tahap pertama akan melewati tahap kedua yang secara efektif akan menyebabkan retak tar kedua karena suhu tinggi. Ini karena panas zona pirolisis dikombinasikan dengan panas zona oksidasi (Jarungthammachote, et al., 2012). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh masukan udara dua tingkat terhadap distribusi suhu dan kandungan tar pada gasifikasi tipe *downdraft* menggunakan bahan baku pelepah kelapa sawit. Judul ini diambil disebabkan adanya tingkat kadar tar yang tinggi dan ketika diaplikasikan ke mesin menyebabkan kerak pada torak, selain itu juga suhu yang lebih tinggi juga sangat dibutuhkan dalam pembentukan syngas saat proses pembakaran didalam reaktor.

## METODE

Pada penelitian ini untuk pengukuran distribusi suhu digunakan masukan udara bertingkat dengan masukan udara total yang dimasukkan yaitu ER (ekuivalen rasio) 0.3, 0.4, dan 0.5, karena jika ER nya 1 berarti akan terjadi pembakaran sempurna, dalam gasifikasi untuk menghasilkan *syngas* harus terjadi pembakaran sebagian atau ER kurang dari satu. Kemudian karena dalam penelitian ini ada dua masukan udara maka harus ada pembagian masukan udaranya untuk melihat berapa udara yang efektif dimasukkan kedalam reaktor tersebut baik itu zona oksidasi maupun pirolisis. Adapun perbandingan rasio masukan udaranya atau disingkat  $AR_{pir-oks}$  yaitu 0%, 70%, 80%, dan 90% yang maksudnya jika 0% itu artinya masukan udara semua dimasukkan kedalam zona oksidasi sedangkan di zona pirolisis tidak ada masukan udara, artinya kondisi ini adalah kondisi pada dasarnya sistem gasifikasi. Kemudian pada  $AR_{pir-oks}$  70%, 80%, dan 90% artinya udara yang masuk kedalam zona oksidasi adalah masing-masing 70%, 80%, dan 90% sedangkan yang masuk ke zona pirolisis masing-masing 30%, 20%, dan 10%. Dari hasil percobaan ini nantinya akan dilihat bagaimana distribusi suhu sepanjang reaktor gasifikasi.

Pengapian awal dimulai dengan memasukkan arang ke dalam reaktor ke batas nozzle, untuk menghindari pembentukan tar di

gasifier selama periode awal. Kemudian udara disuntikkan ke dalam reaktor dan udara diatur menggunakan katup sesuai kebutuhan. Setelah api menyala, bahan bakar pelepah kelapa sawit yang sudah dihaluskan dimasukkan ke dalam reaktor sampai penuh. Blower terus menyala untuk memasok udara ke reaktor hingga mencapai kondisi tunak yang menghasilkan gas yang mampu terbakar. Setelah system mencapai kondisi tunak untuk mengaktifkan sistem pengkondisian gas dan membiarkan semua parameter berjalan terus-menerus selama satu jam dari proses pengambilan data. Pengumpulan data dimulai dengan menyuntikkan aliran udara masing-masing 6,3 Nm<sup>3</sup>/jam (ER 0,3), 8,4 Nm<sup>3</sup>/jam (ER 0,4), dan 10,45 Nm<sup>3</sup>/jam (ER 0,5) dengan variasi persentase input udara di zona pirolisis dan oksidasi mulai dari 0%, 70% 80%, dan 90%. Rancangan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

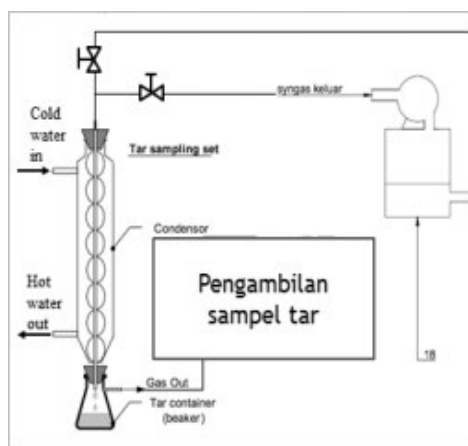


Gambar 1. Rancangan Penelitian Gasifikasi Pelepah Kelapa Sawit

Konten tar dalam *syngas* diukur menggunakan rumus. Dimulai dengan mengalirkan air dingin ke kondensor dengan aliran masuk dari bawah dan keluar dari atas. Tar dalam *syngas* akan terkondensasi dan akan dikumpulkan dalam wadah tar (*erlenmeyer tube*). Sampel akan dihentikan ketika 1 m<sup>3</sup> *syngas* telah melewati kondensor. Konten tar kemudian dihitung menggunakan persamaan (1).

$$\text{Kandungan tar} = \frac{M_{tar}}{V_{sampling\ gas}} \quad (1)$$

Skema pengambilan sampel tar dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Pengambilan Sampel Kandungan Tar

Setelah pengambilan data dilakukan, maka tahapan selanjutnya adalah menganalisis hasil penelitian. Dalam penelitian ini digunakan metode analisa data hasil penelitian kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik dan dibahas berdasarkan ruakan jurnal-jurnal sebelumnya yang berkaitan dengan topik penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Distribusi Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor yang signifikan pada proses gasifikasi, karena reaksi gasifikasi perlu suhu tinggi untuk menghasilkan *syngas*. Suhu yang tinggi dapat meningkatkan produksi gas dan mengurangi kandungan tar. Pada masukan udara bertingkat, temperatur di zona oksidasi meningkat lebih tinggi. Untuk mendukung energi yang diperlukan untuk reaksi pengeringan, pirolisis dan reduksi, yang merupakan reaksi endotermik. Oleh karena itu, reaksi eksotermis adalah reaksi yang signifikan untuk memberikan dan mentransfer panas ke bagian atas (zona pirolisis dan zona pengeringan) dan bagian bawah (daerah reduksi) dari *gasifier*.

Untuk pengujian eksperimental, suhu sepanjang ketinggian *gasifier* diteliti dan diukur pada dinding internal sepanjang ketinggian reaktor menggunakan termokopel tipe-K. Termokopel T1, T2, T3, T4, dan T5 diletakkan diantara zona *drying* dan pirolisis, T6, T7, di zona oksidasi dan T8 di zona reduksi. Termokopel T9 pada keluaran *syngas* untuk mengukur suhu *syngas*. Selain itu, suhu dipantau dan dicatat oleh

data logger DC100. Bahkan, nilai suhu dalam percobaan ini menunjukkan nilai perwakilan dari suhu di dalam *gasifier* karena termokopel (T1-T8) yang dipasang di dinding reaktor internal untuk menghindari masalah bahan baku mengalir ke bawah. Tujuan utama masukan udara bertingkat untuk meningkatkan suhu zona pirolisis dan zona oksidasi sehingga menguntungkan termal cracking yang menyebabkan peningkatan produksi bahan bakar gas dan penurunan kadar tar Bui (2010). Hasil distribusi pada percobaan diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian Reaktor

Parameter	Unit	Hasil															
		0	0	0	70	70	70	80	80	80	90	90	90	90			
AR	%																
Aliran udara	Nm <sup>3</sup> /jam	14,4	19,2	24	14,4	19,2	24	14,4	19,2	24	14,4	19,2	24				
-20	Reduksi	505	489	532	521	525	528	556	590	590	583	608	596				
20	Oksidasi	805	820	833	802	819	839	878	892	904	887	893	913				
30		645	643	739	660	654	749	697	708	810	730	747	816				
45	Oksidatif Pirolisis	420	478	502	504	519	543	606	614	662	614	621	665				
50		390	416	422	387	410	429	434	466	495	452	509	483				
68	Pirolisis	212	220	251	209	228	269	240	309	300	239	299	334				
78		190	184	215	194	210	226	211	244	252	237	285	294				
98	Drying	99,5	110	143	108	122	169	137	157	195	159	177	219				

### b. Kandungan Tar dalam Gas

Penelitian ini meneliti jumlah kandungan tar dalam gas menggunakan masukan udara bertingkat. kandungan tar diukur menggunakan teknik brandt. Data hasil pengukuran diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan Tar dalam Gas

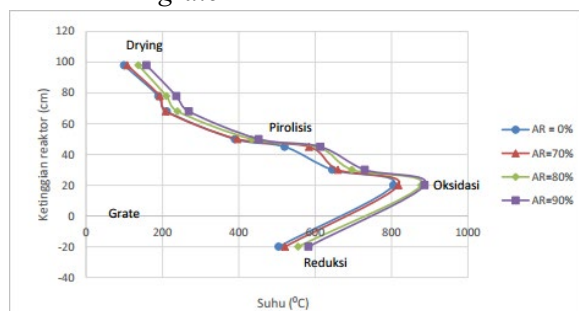
Aliran udara total	14,4				19,2				24			
	0	70	80	90	0	70	80	90	0	70	80	90
Mtar	575	398	211	155	435	242	152	121	312	235	110	101
TAR (mg/m3)	386,7	245,7	123,4	87,6	208,7	110,5	66,7	50,4	121,8	91,1	41,2	37,0

## Pembahasan

Pengaruh AR<sub>Pir-Oks</sub> terhadap Distribusi suhu untuk masing-masing Equivalence Ratio (ER 0,3, 0,4, dan 0,5)

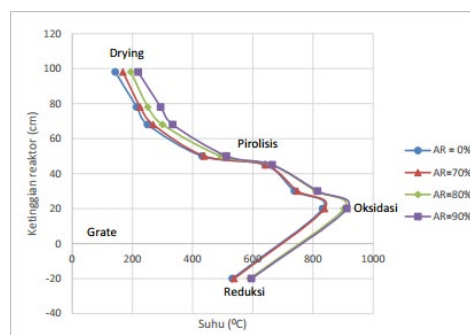
Gambar 3, 4, dan 5 menunjukkan distribusi suhu sepanjang ketinggian *gasifier* untuk masing-masing ER 0,3, 0,4, dan 0,5 dengan masukan udara total masing-masing 14,4 Nm<sup>3</sup>/jam, 19,2 Nm<sup>3</sup>/jam, dan 24 Nm<sup>3</sup>/jam dengan variasi masukan udara antara zona pirolisis dan oksidasi AR<sub>Pir-Oks</sub> 0%, 70%, 80%, dan 90%. Gambar ini

menyajikan suhu pada titik tertentu sepanjang ketinggian gasifier yang diukur pada tinggi, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 50 cm, 68 cm, 78 cm dan 98 cm di atas grate sedangkan untuk zona reduksi 20 cm dibawah grate.



Gambar 3. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian Gasifier pada ER 0,3 (14,4 Nm<sup>3</sup>/jam) dengan Variasi AR<sub>Pir-Oks</sub> =0%, 70%, 80%, dan 90%

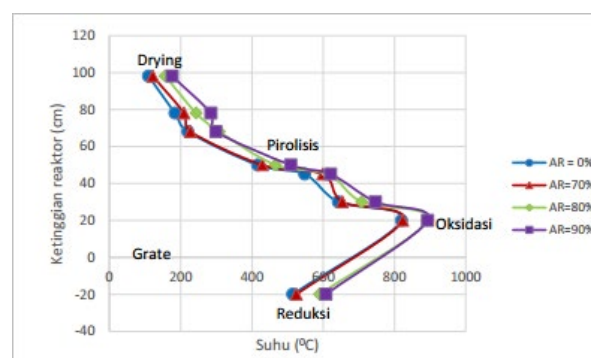
Pada Gambar 3 dapat diamati bahwa pada ER 0,3 (14,4 Nm<sup>3</sup>/jam) terdapat pengaruh yang begitu signifikan pada suhu sepanjang ketinggian reaktor terjadi tren peningkatan untuk setiap variasi AR<sub>Pir-Oks</sub> 0%, 70%, 80%, dan 90%. Fenomena yang terjadi ketika masukan udara hanya dimasukkan di zona oksidasi (AR<sub>Pir-Oks</sub> 0%) suhu di setiap zona drying, pirolisis, oksidasi dan reduksi sepanjang ketinggian gasifier masing-masing 99,5, 420, 805, dan 505 °C. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Jarungthammachote (2012) yang menyatakan suhu di zona ini rendah karena pemanasan di zona tersebut hanya berasal dari panas zona oksidasi. Ketika masukan udara di-injeksikan ke zona pirolisis dengan persentase antar kedua zona (AR<sub>Pir-Oks</sub> 70%, 80%, 90%) terjadi tren peningkatan suhu pada setiap zona, peningkatan suhu tertinggi dicapai pada AR<sub>Pir-Oks</sub> 90% total udara masing-masing menjadi 159, 614, 887, dan 583 °C. Fenomena ini memperlihatkan tambahan masukan udara di zona pirolisis meningkatkan panas dirinya sendiri dan membantu meningkatkan pemanasan di zona oksidasi, sehingga ketika suhu pirolisis meningkat suhu di zona oksidasi juga meningkat Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Molino (2014).



Gambar 4. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian Gasifier pada ER 0,4 (19,2 Nm<sup>3</sup>/jam) dengan Variasi AR<sub>Pir-Oks</sub> =0%, 70%, 80%, dan 90%

Gambar 4 memperlihatkan fenomena tren yang hampir sama dengan Gambar 3 Secara umum Gambar 4 menunjukkan trend kenaikan, suhu di reaktor meningkat untuk setiap kenaikan persentase masukan udara. Suhu tertinggi zona pirolisis dan zona oksidasi juga dicapai pada AR<sub>pir-oks</sub> = 90% masing-masing 621 dan 893 0C. Suhu terendah zona pirolisis dan zona oksidasi dicapai pada AR<sub>pir-oks</sub> = 0% masing-masing 478 dan 820 °C. Hal ini sama seperti yang diungkapkan Galindo, (2014) bahwa masukan udara bertingkat lebih baik meningkatkan suhu sepanjang reaktor dibandingkan dengan masukan udara tunggal.

Selanjutnya Gambar 5 memperlihatkan kenaikan suhu pada setiap zona gasifikasi seiring dengan bertambahnya nilai AR<sub>Pir-Oks</sub> pada ER 0,5 (24 Nm<sup>3</sup>/jam). Suhu di zona pirolisis pada AR<sub>pir-oks</sub> 0% dan 90% meningkat dari 502° C menjadi 665° C, sedangkan suhu di zona oksidasi tertinggi mencapai 913° C pada nilai AR<sub>Pir-Oks</sub> 90%. Hal ini terjadi karena penggunaan masukan udara bertingkat bisa meningkatkan suhu di zona pirolisis, mendekati zona pembakaran.



Gambar 5. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian *Gasifier* pada ER 0,5 (24 Nm<sup>3</sup>/jam) dengan Variasi AR<sub>Pir-Oks</sub> = 0%, 70%, 80%, dan 90%

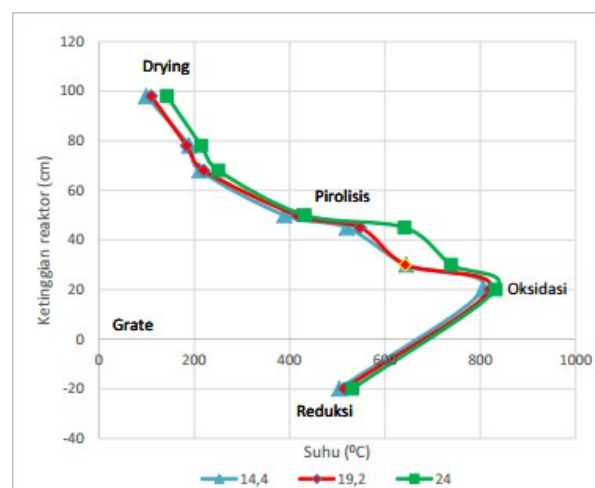
Berdasarkan Gambar 3, 4, dan 5 dapat disimpulkan bahwa suhu tertinggi zona drying, pirolisis, oksidasi, dan reduksi dicapai pada AR<sub>Pir-Oks</sub> = 90%, dengan masukan udara total 24 Nm<sup>3</sup>/jam (ER 0,5). Sedangkan suhu terendah dicapai pada AR<sub>Pir-Oks</sub> = 0% dengan masukan udara total 14,4 Nm<sup>3</sup>/jam (ER 0,3). Hal ini dapat dijelaskan bahwa suhu meningkat seiring dengan peningkatan dan (AR<sub>Pir-Oks</sub>), dan ketika dalam kondisi ER yang lebih tinggi suhu meningkat lebih tinggi dengan variasi AR<sub>Pir-Oks</sub> yang sama.

Pada masukan udara bertingkat bukan hanya ER yang menjadi variabel kontrol, tetapi AR<sub>Pir-Oks</sub> berperan dalam meningkatkan suhu di sepanjang ketinggian reaktor. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Su yang menyatakan fenomena ini terjadi karena ketika zona pirolisis diberi masukan udara, zona pirolisis tidak lagi bersifat endothermal tapi eksotermal, sehingga jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk dekomposisi komponen biomassa disuplay dari zona itu sendiri dan menyediakan panas tambahan untuk proses lainnya. Reaksi panas yang dihasilkan pada kondisi oksidatif ini sebesar -7,23 MJ/kg untuk 5% oksigen, nilai ini lebih besar dari pada kondisi tanpa masukan udara sebesar +0,28 MJ/kg, peningkatan konsentrasi oksigen menghasilkan peningkatan pelepasan panas. Kondisi yang berbeda diperlihatkan ketika reaktor dioperasikan dengan masukan udara tunggal, suhu disepanjang ketinggian reaktor hanya bergantung dari panas yang dilepaskan oleh zona oksidasi dimana udara dimasukkan. Hal ini sama dengan hasil penelitian Jarunthammachote (2012) Oleh karena itu keuntungan utama dari gasifikasi dengan masukan udara bertingkat ini sangat efektif untuk meningkatkan suhu selama proses gasifikasi dan kenaikan temperatur tidak hanya terjadi di mana udara tersebut dimasukkan tetapi juga terjadi di seluruh zona gasifikasi.

Pengaruh Equivalence Ratio (ER) terhadap masing-masing AR<sub>Pir-Oks</sub>

Gambar 6, 7, 8, dan 9 menunjukkan pengaruh masing-masing ER 0,3, 0,4, dan 0,5 (14,4 Nm<sup>3</sup>/jam, 19,2 Nm<sup>3</sup>/jam, dan 24 Nm<sup>3</sup>/jam) pada distribusi suhu sepanjang ketinggian *gasifier* untuk masing-masing AR<sub>Pir-Oks</sub> 0%, 70%, 80%, dan 90%. Gambar ini menyajikan suhu pada titik tertentu sepanjang ketinggian gasifier yang diukur pada tinggi, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 50 cm, 68 cm, 78 cm dan 98 cm di atas grate sedangkan untuk zona reduksi 20 cm dibawah grate.

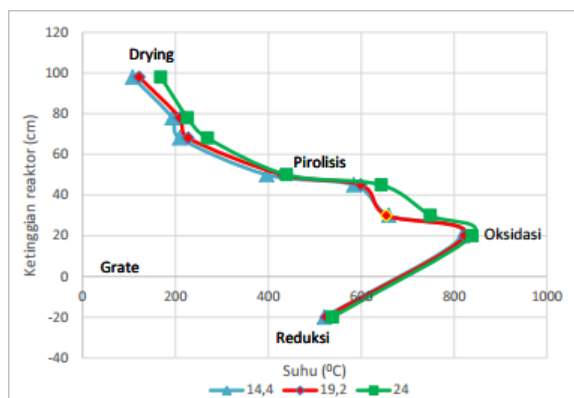
Gambar 6 memperlihatkan kenaikan suhu pada setiap zona gasifikasi seiring dengan bertambahnya nilai ER pada AR<sub>Pir-Oks</sub> 0% (masukan udara tunggal). Suhu di zona pirolisis yang berada 45 cm diatas grate meningkat masing-masing 420° C, 478° C dan 502° C, sedangkan suhu di zona oksidasi tertinggi yang berada 20 meter diatas grate dicapai pada ER 0,5 (24 Nm<sup>3</sup>/jam) sebesar 833° C. Masukan udara yang lebih besar menyebabkan peningkatan suhu operasi yang lebih tinggi direaktor sehingga ketika ER meningkat reaksi pembakaran akan meningkat untuk melepaskan panas.



Gambar 6. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian *Gasifier* pada AR<sub>Pir-Oks</sub> 0% dengan ER 0,3, 0,4, dan 0,5 (14,4 Nm<sup>3</sup>/jam, 19,2 Nm<sup>3</sup>/jam, dan 24 Nm<sup>3</sup>/jam)

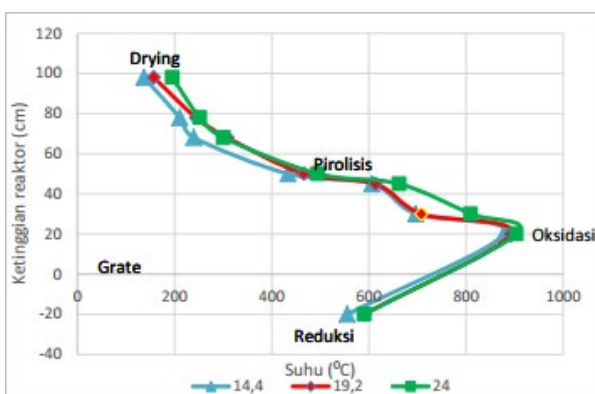
Hasil yang sama juga dikemukakan oleh Guo, (2014) bahwa peningkatan ER akan meningkatkan reaksi pembakaran untuk melepaskan panas yang pada akhirnya akan

menghasilkan suhu operasi yang lebih tinggi di reaktor.



Gambar 7. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian *Gasifier* pada  $AR_{Pir-Oks}$  70% dengan ER 0,3, 0,4, dan 0,5 (14,4  $Nm^3/jam$ , 19,2  $Nm^3/jam$ , dan 24  $Nm^3/jam$ )

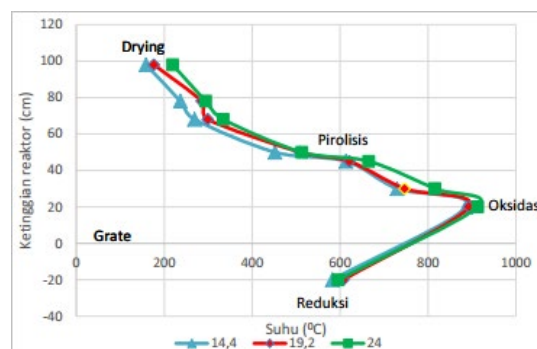
Gambar 7 memperlihatkan trend peningkatan untuk setiap peningkatan ER, suhu tertinggi dicapai pada ER 0,5 sebesar 833 0C zona oksidasi sedikit lebih tinggi dari masukan udara tunggal (0%). Rata-rata peningkatan suhu pada  $AR_{Pir-Oks}$  70% dibandingkan dengan masukan udara tunggal (0%) tidak begitu signifikan, sehingga tidak ada pengaruh yang begitu besar untuk perubahan suhu untuk variasi untuk kondisi ini. Hasil yang sama didapat oleh Jarunthammachote (2012) pada AR 40%.



Gambar 8. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian *Gasifier* pada  $AR_{Pir-Oks}$  80% dengan ER 0,3, 0,4, dan 0,5 (14,4  $Nm^3/jam$ , 19,2  $Nm^3/jam$ , dan 24  $Nm^3/jam$ )

Gambar 8 memperlihatkan trend peningkatan yang sama pada ER 0,5 disetiap zona gasifikasi drying, pirolisis, oksidasi, dan reduksi

masing-masing 195, 662, 904, dan 590 0C jauh lebih tinggi dari  $AR_{Pir-Oks}$  0% dan 70%. Peningkatan suhu ini terjadi karena stabilitas dari reaktor dua tingkat terjaga, yaitu keseimbangan antara gerakan yang solid kebawah dengan rambat api. Seperti yang disebutkan Bui (1993) jika rambat api melebihi konsumsi biomassa, maka kedua tingkat masukan udara tetap berjalan dalam operasi yang stabil.



Gambar 9. Distribusi Suhu Sepanjang Ketinggian *Gasifier* pada  $AR_{Pir-Oks}$  90% dengan ER 0,3, 0,4, dan 0,5 (14,4  $Nm^3/jam$ , 19,2  $Nm^3/jam$ , dan 24  $Nm^3/jam$ )

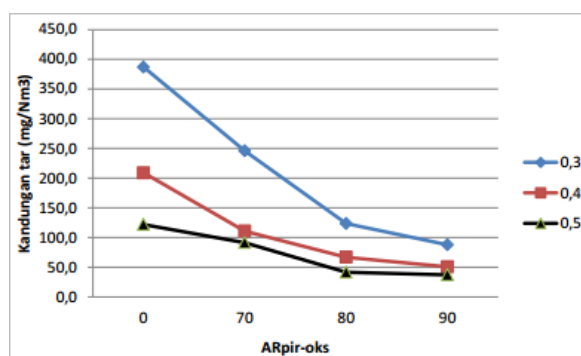
Gambar 9 menunjukkan distribusi sepanjang ketinggian reaktor pada  $AR_{Pir-Oks}$  90% untuk masing-masing masukan udara total atau ER. Hasil menunjukkan bahwa suhu tertinggi zona oksidasi dan pirolisis dicapai pada ER 0,5 (24  $Nm^3/jam$ ), masing-masing 665 dan 913<sup>o</sup> C. Hal ini menunjukkan semakin banyak masukan udara yang dimasukkan ke dalam reaktor akan menyebabkan peningkatan suhu. Tapi pada kondisi ini dapat dilihat jika dibandingkan dengan  $AR_{Pir-Oks}$  80% distribusi suhu tidak mengalami kenaikan yang berarti dari 904<sup>o</sup> C ( $AR_{Pir-Oks}$  80%) ke 913<sup>o</sup> C ( $AR_{Pir-Oks}$  90%). Hal ini dimungkinkan juga karena ketika masukan udara total dibagi menjadi dua tempat masukan udara akan menyebabkan suhu udara maksimum di zona oksidasi berkurang, sehingga ketika dalam kondisi  $AR_{Pir-Oks}$  90% dimungkinkan kenaikan suhu tidak begitu signifikan, karena jumlah udara yang dimasukkan ke zona pirolisis hampir mendekati zona oksidasi.

Dalam kasus masukan udara bertingkat yang diamati pada Gambar 6, 7, 8 dan 9 memperlihatkan bahwa masukan udara total (ER)

dibagi antara dua zona pirolisis dan oksidasi, akibatnya asupan udara di zona oksidasi berkurang sehingga suhu maksimumnya juga berkurang. Oleh karena itu penggunaan ER dan  $AR_{pir-oks}$  digunakan secara bersamaan untuk mendapatkan suhu yang optimum yang nantinya juga dilihat dari kandungan tar dan produksi *syngas*. Tambahan masukan udara di zona pirolisis memang membantu pembakaran produk di zona oksidasi, serta meningkatkan suhu reaktor ke nilai maksimum yang lebih tinggi dari reaktor dengan masukan udara tunggal.

#### Kandungan Tar dalam Gas

Pengaruh kandungan tar pada masukan udara bertingkat dilihat dengan memvariasikan persentase masukan udara antara kedua zona pirolisis dan oksidasi dengan  $AR_{Pir-Oks} = 0\%$ ,  $70\%$ ,  $80\%$ , dan  $90\%$  dengan tiga masukan udara total yang berbeda. Hasil penelitian ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengaruh  $AR_{Pir-Oks} = 0\%$ ,  $70\%$ ,  $80\%$ , dan  $90\%$  terhadap Kandungan Tar dalam Gas

Gambar 10 memperlihatkan bahwa kandungan tar tertinggi ( $386,7 \text{ mg/Nm}^3$ ) diperoleh untuk aliran udara total  $14,4 \text{ Nm}^3/\text{jam}$  (ER 0,3), pada  $AR_{Pir-Oks} = 0\%$  (masukan udara tunggal) yang mungkin terkait dengan suhu rendah dicapai pada zona pirolisis, pada kondisi ini suhu pirolisis hanya sebesar  $389^\circ \text{C}$ . sedangkan kadar tar terendah ditemukan pada masukan udara bertingkat  $AR_{Pir-Oks} = 70\%$ ,  $80\%$ , dan  $90\%$  masing-masing  $91,1 \text{ mg/Nm}^3$ ,  $41,2 \text{ mg/Nm}^3$ , dan  $37 \text{ mg/Nm}^3$  pada masukan udara total  $24 \text{ Nm}^3/\text{jam}$  (ER 0,5), pada kondisi ini suhu pirolisis masing-masing  $643^\circ \text{C}$ ,  $662^\circ \text{C}$ ,  $665^\circ \text{C}$ . Hasil ini menunjukkan ketergantungan dari kandungan tar pada suhu di zona pirolisis.

Perilaku ini memperlihatkan pengurangan jumlah tar yang terbentuk selama proses pirolisis karena suhu tinggi bisa membantu meningkatkan retak tar di zona oksidasi. Hal ini seperti yang diungkapkan Prabir Basu (2010) bahwa pada kondisi ini proses pemecahan tar primer akan mulai mengalami perubahan dan lebih banyak membentuk gas *noncondensable* dengan molekul yang lebih ringan yang disebut tar sekunder. Ketika tar sekunder melewati zona oksidasi maka akan terjadi proses thermal cracking dan kemudian akan terbentuk tar tersier yang lebih ringan.

#### SIMPULAN

Hasil penelitian pengaruh masukan udara bertingkat terhadap distribusi suhu sepanjang ketinggian reaktor memberikan peningkatan suhu yang signifikan dibandingkan hanya satu masukan udara. Dari hasil penelitian diatas juga dapat disimpulkan pengaruh masukan udara bertingkat terhadap kadar penurunan kadar tar juga sangat signifikan sehingga masukan udara bertingkat sangat direkomendasikan untuk meningkatkan suhu dan menurunkan kadar tar dalam gas.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Atnaw, S. M., Sulaiman, S. A., & Yusup, S. (2013). Syngas production from downdraft gasification of oil palm fronds. *Energy*, 61, 491-501.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- Bhattacharya, S. C., Siddique, A. M. M. R., & Pham, H. L. (1999). A study on wood gasification for low-tar gas production. *Energy*, 24(4), 285.
- Brandt, P., Larsen, E., & Henriksen, U. (2000). High tar reduction in a two-stage gasifier. *Energy & Fuels*, 14(4), 816-819.
- Bui, T., Loof, R., & Bhattacharya, S. C. (1994). Multi-stage reactor for thermal gasification of wood. *Energy*, 19(4), 397-404.



- Chen, Y., Luo, Y. H., Wu, W. G., & Su, Y. (2009). Experimental investigation on tar formation and destruction in a lab-scale two-stage reactor. *Energy & Fuels*, 23(9), 4659-4667.
- Devi, L., Ptasinski, K. J., & Janssen, F. J. (2003). A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass and bioenergy*, 24(2), 125-140.
- Galindo, A. L., Lora, E. S., Andrade, R. V., Giraldo, S. Y., Jaén, R. L., & Cobas, V. M. (2014). Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. *Biomass and bioenergy*, 61, 236- 244.
- Guangul, F. M., Sulaiman, S. A., & Ramli, A. (2014). Study of the effects of operating factors on the resulting producer gas of oil palm fronds gasification with a single throat downdraft gasifier. *Renewable Energy*, 72, 271-283.
- Guo, F., Dong, Y., Dong, L., & Guo, C. (2014). Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(11), 5625- 5633.
- Jarunthammachote, S., & Dutta, A. (2012). Experimental investigation of a multi stage air-steam gasification process for hydrogen enriched gas production. *International Journal of Energy Research*, 36(3), 335-345.
- Martinez, J. D., Lora, E. E. S., Andrade, R.V., & Jaén, R. L. (2011). Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3465-3480.
- Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10-25.
- Samiran, N.A, Jaafara, M.N, Chonga C, Ng Jo-Han. (2015). Review of Palm Oil Biomass as a Feedstock for Syngas Fuel Technology. *Jurnal teknologi*, 5, 13-18.
- Sudarmanta Bambang, Agus Wijianto. (2002). Karakterisasi Gasifikasi Downdraft Berbahan Baku Cangkang Kelapa Sawit Dengan Varasi Gasifying Agent. *Conference paper*.
- Sudarmanta Bambang, D. F. W. J., Daniar Baroroh Murtadji. (2009). Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Menggunakan Reaktor Downdraft dengan Dua Tingkat Laluan Udara. *Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin*, 8.
- Sudarmanta Bambang, Kadarisman. (2010). Variasi Rasio Gasifying Agent-Biomassa Terhadap Karakterisasi Gasifikasi Tongkol Jagung pada reactor downdraft. *Semin. Nas. Perkemb. Ris. dan Teknol. di Bid. Ind*, 16.