

Studi Simulasi dan Eksperimental Pengaruh *Equivalence Ratio* dan Temperatur Udara *Inlet* pada Proses Gasifikasi Tongkol Jagung terhadap *Gasifier* Tipe *Downdraft* Berdasarkan Prinsip Energi dan Eksergi

Gianardo Satria Primandanu dan Ary Bachtiar Krishna Putra
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: arybachtiar90@gmail.com

Abstrak—Solusi untuk mengurangi penggunaan energi fosil, yaitu dengan pemanfaatan Energi Baru Terbarukan, salah satunya adalah Gasifikasi Biomassa. Dari proses Gasifikasi akan menghasilkan *synthetic gas*, dan akan digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil pada mesin diesel *dual-fuel*. Penelitian ini menggunakan dua analisa, yaitu analisa energi dan analisa eksergi, untuk mengetahui unjuk kerja dari *gasifier*. Penelitian ini bersifat simulasi dan eksperimen. Untuk metode simulasi menggunakan *software* Aspen Plus V10, sedangkan pada eksperimen reaktor yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah reaktor tipe *downdraft*. Terdapat 3 variasi *T inlet* zona oksidasi yaitu 30°C, 50°C, dan 75°C, sedangkan untuk 5 variasi ER yaitu 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; sehingga menghasilkan nilai AFR aktual tertentu. Hasil dari penelitian ini didapatkan nilai LHV tertinggi untuk hasil simulasi, yaitu pada ER 0,2 dengan *T inlet* 30°C sebesar 5052,65 kJ/kg, dan tertinggi untuk hasil eksperimen sebesar 3736,67 kJ/kg. Hasil *cold gas efficiency* tertinggi untuk hasil simulasi pada ER 0,35 dengan *T inlet* 30°C yaitu sebesar 36,47%, dan hasil eksperimen yaitu pada ER 0,35 dengan *T inlet* 30°C didapatkan 53,84%. Sedangkan nilai efisiensi eksergi tertinggi untuk hasil simulasi yaitu pada ER 0,2 dan *T inlet* 30°C, didapatkan nilai 34,06%, dan untuk hasil eksperimen yaitu 25,45% pada ER 0,2 dengan *T inlet* 30°C.

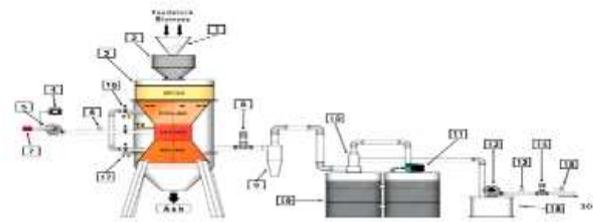
Kata Kunci—Biomassa, Eksergi, Gasifikasi, Gas Sintetik, Tongkol Jagung.

I. PENDAHULUAN

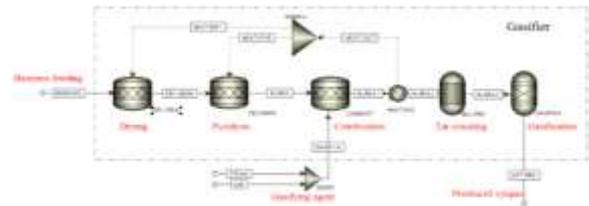
KEBUTUHAN bahan bakar untuk energi di Indonesia tiap tahunnya tercatat semakin meningkat, akibatnya cadangan minyak dan bahan bakar fosil, khususnya di Indonesia semakin lama semakin menurun. Untuk mengatasi krisis energi yang terjadi, Energi alternatif yang saat ini banyak dikembangkan merupakan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), salah satunya adalah Biomassa dengan bahan Tongkol Jagung. Dengan mengetahui komposisi dan kandungan kimia yang terdapat di dalam tongkol jagung, bahan tersebut dapat dijadikan sebagai sumber energi alternatif melalui proses gasifikasi [1].

Gasifikasi merupakan proses konversi biomassa dengan bahan baku padat atau cair yang berubah menjadi gas secara proses termokimia [2]. Secara sederhana proses gasifikasi biomassa dapat dikatakan sebagai reaksi kimia pada temperatur tinggi antara biomassa dengan *gasifying agent* berupa udara atau O₂ untuk menghasilkan gas produser [3].

Reaktor yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah reaktor tipe *downdraft*, karena dari kandungan tar yang



Gambar 1. Skema instalasi sistem gasifikasi tipe *downdraft*.



Gambar 2. Desain PFD reaktor untuk metode simulasi.

dihasilkan lebih rendah pada kisaran 0,015-3,0 g/Nm³ [4]. Pada reaktor tipe *downdraft*, bahan baku padat dan udara mengalir searah menuju ke dasar reaktor [5].

Penelitian akan di analisa secara Eksergi, sebagai potensial energi yang bisa dimanfaatkan sepenuhnya seperti energi kinetik dan energi potensial dan tidak terpengaruh oleh suhu dan tekanan lingkungan. Efisiensi Eksergi menjadi tolak ukur unjuk kerja dari sistem gasifikasi untuk membandingkan antara Eksergi yang dihasilkan dengan Eksergi yang dibutuhkan dan juga dapat berkurang ketika variabel operasional bertambah [6].

Penelitian Tentang Variasi Rasio Gasifying Agent-Biomassa Terhadap Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Tongkol Jagung Pada Reaktor *Downdraft*, dengan pengaturan rasio gasifying agent dan biomassa mulai dari rentang 1,00-1,20; didapatkan rasio optimum pada 1,05 dengan efisiensi gasifikasi mencapai 30,44% dan komposisi syngas didapatkan; H₂=13,29%; O₂=8,51%; N₂=57,86%; CO₂=8,33%; CO=10,52%; CH₄=1,4%; C₂H₆=0,08%; dengan nilai LHV sebesar 2,65 MJ/kg [7].

Pada penelitian Rustam. D, salah satu parameter output dari proses gasifikasi adalah distribusi temperatur sepanjang gasifier [8]. Distribusi temperatur ditampilkan untuk mengetahui pengaruh temperatur pemanasan udara yang di variasikan dalam 5 variasi yaitu 80°C, 110°C, 150°C, 180°C, dan 200°C. Proses gasifikasi pada pelet MSW dengan penambahan pemanas eksternal dapat meningkatkan persentase volumetris pada flammable syngas (CO, H₂, dan

Tabel 4. Parameter Input dan Output Pada Simulasi

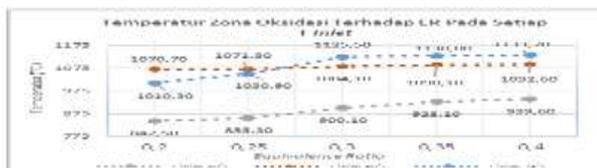
No.	Parameter	Unit	Nilai	
1	Moisture content	%wt	10,15	
2	Ash content	%wt	1,8	
3	Volatile matter	%wt	87,9	
4	Fixed carbon	%wt	0,15	
5	Density	kg/m ³	296	
6	LHV	MJ/kg	10,85	
7	Komponen	C	%wt	47,6
		H	%wt	5,91
		N	%wt	0,84
		S	%wt	0,15
		O	%wt	38,7

Tabel 5. Analisis Ultimate dan Proximate Tongkol Jagung

Input	Output
<ul style="list-style-type: none"> T inlet (30, 50, dan 75) (°C) m udara (20,93% O₂ dan 78,1% N₂) (kg/jam) m biomassa (kg/jam) Analisis Proximate dan Ultimate Tongkol Jagung T zona oksidasi di ketiga variasi T inlet (°C) 	<ul style="list-style-type: none"> Komposisi penyusun syngas (%volumetric)

Tabel 6. Parameter Input Pengukuran Penelitian

Parameter Input	Variasi
Konstan	
<ul style="list-style-type: none"> Dimensi Reaktor Putaran Suction Pump atau Induced Fan Biomassa tongkol jagung 	<ul style="list-style-type: none"> Equivalence ratio pada zona oksidasi (0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4) Temperatur udara inlet (30°C; 50°C; 75°C)



Gambar 4. Grafik temperatur zona oksidasi terhadap ER pada tiap T inlet.

CH₄) dari 20,03%, 7,79%, dan 2,39% menjadi 21,99%, 8,87%, dan 2,44%. Kemudian meningkatkan LHV syngas dari 4227,99 kJ/m³ menjadi 4609,99 kJ/m³. Cold gas efficiency meningkat secara linear dengan bertambahnya temperatur udara inlet zona oksidasi. Peningkatan temperatur udara (80-200°C) menjadikan cold gas efficiency meningkat sebesar 13,7% (dari 47,37% menjadi 61,07%). Faktor utama yang mempengaruhi tar adalah temperatur operasi gasifier. Pada penelitian Venugopal. D. melakukan simulasi gasifikasi sekam padi untuk menganalisis energi dan eksergi [6]. Pada 600°C kenaikan nilai ϕ dari 0,15-0,55 meningkatkan cold gas efficiency. Untuk 625°C dan 650°C, nilai η meningkat hingga $\phi=0,45$, untuk 675°C, dan 700°C, η meningkat hingga $\phi=0,35$ dan 725-800°C, η meningkat hingga $\phi=0,25$. Setelah 800°C peningkatan ϕ menurunkan cold gas efficiency. Peningkatan nilai ϕ menurunkan LHV syngas tetapi meningkatkan volume syngas.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian kali ini bersifat simulasi dan eksperimental. Untuk metode simulasi dengan menggunakan software Aspen Plus V10, sedangkan pada eksperimen reaktor yang

Tabel 1. Parameter Output Pengukuran Penelitian

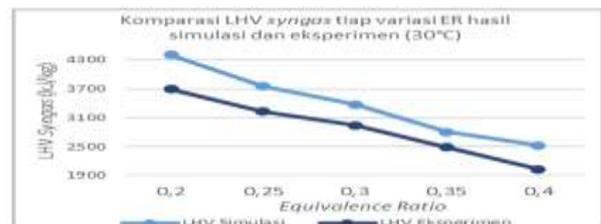
Parameter Output		
Diukur	Dihitung	Visualisasi
<ul style="list-style-type: none"> Durasi konsumsi biomassa total (s) Pgas oksidasi (inHg) Pgas output (inHg) T drying (°C) T oksidasi (°C) T reduksi (°C) Komposisi syngas (CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂, O₂) 	<ul style="list-style-type: none"> Equivalence Ratio (ER) m syngas (kg/s) m udara (kg/s) m biomassa (kg/s) LHVsyngas (kJ/kg) Efisiensi gas dingin (η_{cc}) (%) Efisiensi Eksergi (%) 	<ul style="list-style-type: none"> Nyala api Syngas

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Tekanan Udara Inlet

Dimmer	ΔP (Pa)	V average (m/s)	m udara (kg/s)
1	117,21	10,3	0,007796
2	180,91	12,87	0,009745
3	258,01	15,44	0,011694
4	348,38	18,02	0,013642
5	451,97	20,59	0,015591

Tabel 3. Data Hasil Perhitungan ER

Dimmer	ΔP (Pa)	V (m/s)	m udara (kg/s)	AFR actual	Equivalence Ratio (ER)
1	117,21	10,3	0,007796	1,342	0,2
2	180,91	12,87	0,009745	1,6775	0,25
3	258,01	15,44	0,011694	2,013	0,3
4	348,38	18,02	0,013642	2,3485	0,35
5	451,97	20,59	0,015591	2,684	0,4



Gambar 3. Grafik komparasi LHV Syngas dari hasil simulasi dan eksperimen.

digunakan untuk proses gasifikasi adalah reaktor tipe downdraft dengan ukuran reaktor $\phi=50$ cm; t=92cm, karena bahan baku padat dan udara mengalir searah menuju ke dasar reaktor. Diperlukan pengujian untuk mengetahui pengaruh ER dan T udara inlet terhadap unjuk kerja gasifikasi dengan analisa energi dan eksergi. Terdapat 3 variasi T inlet zona oksidasi dan 5 variasi ER, sehingga menghasilkan nilai AFR aktual tertentu.

Eksperimen dilakukan di Laboratorium Gasifikasi, Departemen Teknik Mesin ITS, yang dirancang dengan skema seperti Gambar 1. Pengujian dilakukan dengan variasi temperatur udara masuk pada zona oksidasi 30°C, 50°C, dan 75°C.

Dipilih 30°C karena asumsi untuk suhu inisial atau suhu lingkungan di Kampus ITS Surabaya, lalu ditambah variasi temperatur 50°C dan 75°C pada inlet zona oksidasi sebagai variasi perubahan temperatur inlet udara. Rasio kesetaraan (Equivalence Ratio/ER) dapat di definisikan sebagai perbandingan antara rasio udara bahan bakar dari proses gasifikasi dan rasio udara bahan bakar untuk pembakaran yang sempurna. Dan untuk variasi ER yang digunakan pada pengujian kali ini penulis menggunakan variasi 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; dan 0,4 (Gambar 1).

Tabel 7.
Nilai LHV Syngas dari Hasil Simulasi

Variasi		LHV (kJ/m ³)	ρ syngas (kg/m ³)	LHV (kJ/kg)
ER	T inlet (°C)			
0,2	30	4490,14	0,8886707	5052,6577
	50	4453,91	0,88821769	5014,4431
	75	4082,95	0,92671317	4405,8471
0,25	30	3997,39	0,93500665	4275,262
	50	3979,27	0,93882962	4238,5451
	75	3642,18	0,96896946	3758,8250
0,3	30	3573,85	0,96592389	3699,6516
	50	3538,25	0,69533624	3665,3043
	75	3347,79	0,99274071	3372,2746
0,35	30	3262,18	0,99242808	2387,0765
	50	3025,79	0,98859729	3060,6961
	75	2818,36	1,00674160	2799,4899
0,4	30	2664,88	1,00642375	2647,8727
	50	2594,56	1,00667527	2577,3558
	75	2530,48	1,00337353	2521,9789

Tabel 8.
Nilai LHV Syngas dari Hasil Eksperimen

Variasi		LHV (kJ/m ³)	ρ syngas (kg/m ³)	LHV (kJ/kg)
ER	T inlet (°C)			
0,2	30	3591,694	0,961201	3736,674
	50	3587,904	0,961026	3733,412
	75	3543,89	0,959936	3691,799
0,25	30	3175,396	0,976302	3252,474
	50	3171,976	0,979001	3240,013
	75	3168,388	0,980496	3231,413
0,3	30	2950,349	0,999637	2951,421
	50	2946,76	0,999578	2948,005
	75	2940,999	1,000211	2940,379
0,35	30	2539,713	1,01846	2493,679
	50	2538,635	1,020245	2488,259
	75	2532,52	1,019023	2485,244
0,4	30	2083,89	1,026078	2030,928
	50	2082,274	1,027587	2026,372
	75	2082,274	1,027512	2026,52

Data yang telah didapat dari hasil eksperimen dan pengumpulan data berdasarkan penelitian sebelumnya, selanjutnya digunakan dalam pembuatan desain dari proses termokimia gasifikasi di gasifier tipe fixed bed downdraft yang pada penelitian ini dibuat menggunakan perangkat lunak Aspen Plus V.10 dengan menggunakan desain PFD reaktor pada Gambar 2.

Setelah dilakukan eksperimen gasifikasi tongkol jagung, selanjutnya adalah memasukkan input data pada proses simulasi yang dihasilkan dari eksperimen, lalu akan dilakukan simulasi dengan menggunakan Aspen Plus V.10 untuk menghasilkan output data yaitu %vol komposisi penyusun syngas, dapat dilihat pada Tabel 1.

Bahan uji biomassa yang digunakan adalah limbah tongkol jagung kering. Sebelum digunakan, biomassa di analisa dulu secara ultimate analysis dan proximate analysis Untuk karakteristik analisa hasil pengujian ultimate dan proximate dari tongkol jagung merujuk pada penelitian Sudarmanta. B pada Tabel 2 [7].

Pada penelitian ini akan digunakan biomassa berupa limbah tongkol jagung yang selanjutnya akan dilakukan proses gasifikasi. Terlihat pada Tabel 2 untuk detail hasil ujinya.

Parameter pengukuran merupakan suatu nilai atau kondisi yang menjadi tolak ukur di dalam suatu penelitian yang dilakukan. Tabel 3 merupakan parameter input pengukuran proses gasifikasi pada penelitian yang dilakukan. Untuk

parameter output dari penelitian terbagi menjadi parameter diukur, dihitung, dan visualisasi (Tabel 4).

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil yang didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan, diantaranya:

A. Analisa Data dan Hasil Eksperimen

Parameter operasional ini menentukan temperatur operasional dari proses gasifikasi. Untuk menentukan nilai ER diperlukan \dot{m}_{udara} dan \dot{m}_{bahan} bakar juga laju alir *stoichiometric*. Data dibawah ini pada Tabel 5 merupakan hasil yang diperoleh dari pengujian melalui alat ukur *pitot static tube* dan manometer digital.

B. Analisa Perhitungan Laju Alir Massa Udara

\dot{m}_{udara} didapatkan dengan menghitung V_{max} dari tekanan stagnasi yang terjadi pada *pitot static tube*.

1) Mencari Nilai Kecepatan Maksimum (V_{max})

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2(P_o - P_i)}{\rho_{udara}}}$$

Dimana:

ρ_{udara} = Massa jenis udara (1,176 kg/m³)

Didapatkan:

Tabel 9.
Efisiensi Gasifikasi dari Hasil Simulasi (%)

Variasi		$\dot{m}_{biomassa}$ (kg/s)	\dot{m}_{syngas} (kg/s)	LHV _{syngas} (kJ/kg)	LHV _{biomassa} (kJ/kg)	Efisiensi Energi (%)
T inlet	ER					
30°C	0.2	0,005809	0,0035787	5052,6577	10850	28,69
	0.25		0,0047067	4275,262		31,93
	0.3		0,0058347	3699,6517		34,25
	0.35		0,0069932	3287,0765		36,47
	0.4		0,0081042	2647,8728		34,05
50°C	0.2	0,005809	0,0040215	5014,4432	10850	32,00
	0.25		0,0047259	4238,5452		31,78
	0.3		0,0057141	3665,3043		33,23
	0.35		0,0069661	3060,6961		33,83
	0.4		0,0081978	2577,3559		33,52
75°C	0.2	0,005809	0,0046823	4405,8471	10850	32,73
	0.25		0,0055291	3758,8251		32,97
	0.3		0,0059967	3372,2746		32,08
	0.35		0,0073001	2799,4899		32,42
	0.4		0,0083501	2521,9789		33,41

Tabel 10.
Efisiensi Gasifikasi dari Hasil Eksperimen (%)

Variasi		$\dot{m}_{biomassa}$ (kg/s)	\dot{m}_{syngas} (kg/s)	LHV _{syngas} (kJ/kg)	LHV _{biomassa} (kJ/kg)	Efisiensi Energi (%)
T inlet	ER					
30°C	0.2	0,0029438	0,00372	3736,6738	10850	43,52
	0.25		0,00465	3252,4743		48,09
	0.3		0,00558	2951,4215		53,62
	0.35		0,00651	2493,6793		53,84
	0.4		0,00744	2030,9279		50,49
50°C	0.2	0,0029438	0,00418	3733,4121	10850	43,48
	0.25		0,00465	3240,0133		47,91
	0.3		0,00547	2948,0053		53,56
	0.35		0,00651	2488,259		53,73
	0.4		0,00752	2026,3723		50,37
75°C	0.2	0,0029438	0,00467	3691,7991	10850	42,99
	0.25		0,00527	3231,413		47,78
	0.3		0,00558	2940,3793		53,42
	0.35		0,00670	2485,2436		53,66
	0.4		0,00769	2026,5203		50,38

Tabel 11.
Properties Gas Penyusun Syngas

Gas Penyusun	C _{pi} (kJ/kg K)
CO	1,043
H ₂	14,389
CH ₄	2,316
CO ₂	0,884
N ₂	1,0416
H ₂ O	2,06
O ₂	0,92

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2(P_o - P_i)}{\rho_{udara}}} = \sqrt{\frac{2(117,21 Pa)}{1,176 kg/m^3}} = 14,118 m/s$$

2) Mencari Nilai Re_{Vmax}

$$Re_{Vmax} = \frac{\rho_{udara} \cdot V_{max} \cdot D}{\mu}$$

Dimana:

D = Diameter pipa (m)

μ = Viskositas udara pada 27°C (184,6 × 10⁻⁷ kg/(m·s))

Didapatkan:

$$Re_{Vmax} = \frac{\rho_{udara} \cdot V_{max} \cdot D}{\mu} = \frac{1,176 \cdot 14,118 \cdot 0,02}{184,6 \cdot 10^{-7}} = 17987,83$$

3) Mencari Nilai V_{avg}

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re_{Vmax}$$

Persamaan menghitung kecepatan alir rata-rata (V).

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}$$

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re_{Vmax} = 4,354896$$

$$V_{avg} = \frac{2 \cdot 4,354896^2}{(4,354896 + 1)(2 \cdot 4,354896 + 1)} \times 14,118 = 10,3m/s$$

4) Menghitung Laju Alir Massa Udara (ṁ)

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{udara} \cdot \bar{V} \cdot A_{pipa}$$

Dimana:

A_{pipa} = luasan pipa inlet udara (0,000314 m²)

Didapatkan:

Tabel 12.
Efisiensi Eksergi Proses Gasifikasi dari Hasil Simulasi Tiap Variasi ER pada T inlet 30°C

T inlet (°C)	ER	Ex. biomass (kJ/kg)	Ex. Ph. gas (kJ/kg)	Ex. Ch. gas (kJ/kg)	Eff. Exergy (%)
30	0,2	12544,106	50,547	4221,956	34,06
	0,25		49,428	3585,151	28,97
	0,3		47,026	3112,98	25,19
	0,35		44,17	2779,727	22,51
	0,4		43,203	2554,399	18,32

Tabel 13.
Efisiensi Eksergi Proses Gasifikasi dari Hasil Simulasi Tiap Variasi ER pada T inlet 50°C & 75°C

T inlet (°C)	ER	Ex. biomass (kJ/kg)	Ex. Ph. gas (kJ/kg)	Ex. Ch. gas (kJ/kg)	Ex. Ph. agent (kJ/kg)	Eff. Ex. (%)
50	0,2	12544,106	50,671	4189,628	1,0214	33,8
	0,25		49,578	3555,754	1,0805	28,74
	0,3		47,421	3086,514	1,2134	24,98
	0,35		45,178	2592,178	0,0647	21,02
	0,4		43,704	2198,402	0,3203	17,87
75	0,2	12544,106	49,404	3689,498	1,0234	29,81
	0,25		48,853	3160,017	1,0896	25,58
	0,3		46,582	2847,038	1,2213	23,07
	0,35		44,798	2378,512	0,0742	19,32
	0,4		43,907	2153,562	0,3198	17,52

Tabel 14.
Efisiensi Eksergi Proses Gasifikasi dari Hasil Eksperimen pada Tiap Variasi ER dan T inlet

T inlet (°C)	ER	Ex. Biomass (kJ/kg)	Ex. Ph. Gas (kJ/kg)	Ex. Ch. Gas (kJ/kg)	Eff. Ex. (%)
30	0,2	12544,106	51,939	3140,9	25,45
	0,25		50,567	2750,1	22,33
	0,3		47,322	2502,7	20,33
	0,35		44,607	2127,5	17,31
	0,4		43,087	1755,2	14,34
50	0,2	12544,106	51,944	3138,391	1,0214
	0,25		50,408	2740,239	1,0807
	0,3		47,334	2499,786	1,2125
	0,35		44,532	2123,116	0,0644
	0,4		43,051	1751,412	0,3221
75	0,2	12544,106	51,971	3106,038	1,0241
	0,25		50,471	2733,23	1,0896
	0,3		47,289	2493,533	1,2201
	0,35		44,543	2120,446	0,0732
	0,4		43,051	1751,556	0,3115

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{udara} \cdot \bar{V} \cdot A_{pipa} = 0,003803409 \text{ kg/s}$$

C. Analisa Perhitungan Laju Alir Biomassa

Analisa perhitungan laju alir biomassa meliputi:

1) Mencari Bulk Density dari Tongkol Jagung

$$\text{Bulk density} = \frac{\text{Massa total} - \text{Massa gelas ukur}}{\text{Volume gelas ukur}}$$

Dimana:

Volume ember = 0,022 m³ ; Massa total = 7,1 kg

Massa ember = 0,5 kg

Didapatkan:

$$\text{Bulk density} = \frac{7,1 - 0,5}{0,022} = 296 \text{ kg/m}^3$$

2) Menghitung Volume Tongkol Jagung Terbakar

$$V = L_{\text{alas reaktor}} \times \Delta t_{\text{biomassa}}$$

$$V = (\pi \times 0,252) \times 0,09 \text{ m} = 0,0176625 \text{ m}^3$$

3) Mencari Massa Tongkol Jagung Terbakar

$$m_{\text{biomassa}} = \rho_{\text{biomassa}} \times V = 5,2281 \text{ kg}$$

4) Laju Alir Massa Tongkol Jagung per Detik

$$m = 5,2281 / 3600 \text{ s} = 0,00145225 \text{ kg/s}$$

Untuk mendapatkan laju alir massa tongkol jagung dengan t = 900 s (15 menit).

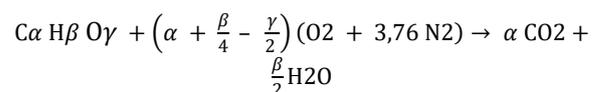
$$\dot{m} = 0,00145225 / (15/60) = 0,005809 \text{ kg/s}$$

D. Analisa Perhitungan ER

Perhitungan ER didapatkan dari perbandingan antara AFR aktual dan AFR stoichiometric seperti berikut.

1) Menghitung AFR Stoichiometric

Reaksi kimia untuk pembakaran biomassa dapat dirumuskan sebagai berikut:



$$\frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{fuel}} \text{ stoich} = \left(4,76 \alpha + \frac{\beta}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \frac{MW_{udara}}{MW_{fuel}}$$

Dimana:

MW udara = Molecular weight of air (28,96 g/mol)

MW fuel = Molecular weight of corncob (93,2 g/mol)

α = (%wt C ÷ Ar C) ; β = (%wt H ÷ Ar H) ;

γ = (%wt O ÷ Ar O)

Dengan Ar C = 12, Ar H = 1, Ar O = 16, dan untuk %wt C, H, O didapatkan dari hasil Analisis *Ultimate* biomassa tongkol jagung.

Didapatkan:

$$\alpha = \frac{wt\% C}{Ar C} = \frac{47.6}{12} = 3,9667 ; \beta = \frac{wt\% H}{Ar H} = \frac{5.91}{1} = 5,91$$

$$\gamma = \frac{wt\% O}{Ar O} = \frac{38.7}{16} = 2,4185$$

$$AFR Stoich = \left(4,76 \cdot 3,9667 + \frac{5,91}{4} + \frac{2,4185}{2} \right) \cdot \left(\frac{28,96}{93,2} \right) = 6,70188104$$

2) Menghitung Equivalence Ratio (ER)

$$ER = \frac{AFR actual}{AFR Stochiometric} = \frac{1,342}{6,70188104} = 0,2$$

Dari hasil pengujian yang dilakukan serta analisa perhitungan \dot{m}_{udara} dan $\dot{m}_{biomassa}$ didapatkan ER (Tabel 6).

E. Analisa Distribusi Temperatur Zona Oksidasi Gasifikasi

Pada Gambar 3 menunjukkan perubahan Temperatur zona oksidasi akibat perbedaan ER. Dari Gambar 3 terlihat dari 3 variasi T *inlet* yang berbeda mempengaruhi perbedaan temperatur pada zona oksidasi. Pada T *inlet* 30°C zona oksidasi tertinggi pada ER 0,4 yaitu 939,6°C, Sedangkan pada T *inlet* 50°C zona oksidasi tertinggi pada ER 0,4 yaitu 1092,6°C, dan pada T *inlet* 75°C zona oksidasi tertinggi pada ER 0,4 yaitu 1133,7°C. Dari data yang didapatkan bahwa semakin tinggi T *inlet* maka menyebabkan temperatur zona oksidasi meningkat.

F. Analisa Komposisi Kandungan Syngas

Hasil analisa komposisi kandungan *syngas* meliputi:

1) Hasil Simulasi Software Aspen Plus

Hasil komposisi *syngas* ini diperoleh dari simulasi dengan menggunakan *software* Aspen Plus V.10 pada Tabel 7. Senyawa yang terdapat dalam *syngas* terdiri dari senyawa yang dapat terbakar (CO, H₂ dan CH₄) dan senyawa gas yang tidak bisa terbakar (CO₂, N₂ dan O₂). Dari ketiga senyawa gas yang dapat terbakar, secara umum mengalami penurunan jumlah persentase volumenya seiring dengan meningkatnya nilai ER dan perubahan variasi T *inlet*. Hal ini dikarenakan meningkatnya ER maka pembakaran dalam zona *partial combustion* semakin mendekati kondisi stoikiometrisnya sehingga akan lebih banyak senyawa gas CO₂ yang terjadi dibanding senyawa gas CO. Untuk kandungan O₂ yang ada dalam senyawa gas hasil reaksi merupakan udara yang tidak ikut bereaksi yang cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya ER.

2) Hasil Eksperimen

Hasil komposisi *syngas* pada Tabel 8 diperoleh berdasarkan pengujian di Laboratorium Kimia Material dan Energi (Lab. KME), Departemen Kimia ITS menggunakan alat *Gas Chromatography* (Tabel 8). Dapat dilihat pada Tabel 8 komposisi CO₂ mengalami peningkatan dan CO mengalami penurunan. Hal tersebut menunjukkan jumlah udara yang dimasukkan ke dalam zona pirolisis dan zona oksidasi hanya dapat meningkatkan kualitas *syngas* hingga keadaan tertentu, sehingga udara yang berlebih akan menyebabkan pembakaran sempurna yang menghasilkan CO₂.

Komposisi N₂ cenderung konsisten memiliki persentase volumetrik di atas 50% pada setiap variasi. Hal ini terjadi karena N₂ memiliki persentase yang tinggi pada udara di atmosfer, gas yang tidak dapat bereaksi dengan komponen kimiawi lainnya, sehingga persentase volumetriknya cenderung konstan. Kandungan CH₄ pada semua variasi sangat rendah dikarenakan AFR tinggi menyebabkan temperatur yang tinggi dan membuat reaksi endotermal lebih dominan di zona reduksi.

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan dari hasil simulasi dan eksperimen, terdapat perbedaan hasil dengan selisih hasil kedua metode cukup jauh, hal ini diakibatkan karena pada metode simulasi yang menggunakan *software* Aspen Plus, ketika memproses hasil komposisi *syngas* ini terjadi pada kondisi ideal, sedangkan pada metode eksperimen terpengaruh dari faktor lingkungan, seperti kendala saat pengambilan data, temperatur ruangan di laboratorium dan faktor lain yang dapat mempengaruhi hasil *syngas* proses gasifikasi.

G. Analisa Nilai Kalor LHV Syngas

Hasil analisa nilai kalor LGV Syngas diantaranya meliputi:

1) Hasil Simulasi Software Aspen Plus

Berdasarkan komposisi senyawa dalam *syngas* diatas maka LHV dari *syngas* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$LHV_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i LHV_i)$$

Keterangan:

Y_i = konsentrasi gas terbakar (CO, CH₄, H₂).

LHV_i = Nilai Kalor bawah (LHV) gas terbakar (CO, CH₄, H₂).

Nilai LHV dari tiap gas yang *flammable* ditampilkan pada Tabel 9. Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk nilai LHV dengan menggunakan data dari komposisi *syngas* pada variasi ER 0,2 dengan Temperatur *inlet* 30°C.

a) Y_i untuk gas CO = 11,575% = 0,11575

b) Y_i untuk gas CH₄ = 2,966% = 0,02699

c) Y_i untuk gas H₂ = 18,21% = 0,1821

$$LHV_{syngas} = \sum_i^n (0,11575 \times 12633) + (0,02699 \times 35883) + (0,1821 \times 10783)$$

$$LHV_{syngas} = 4490,14 \text{ kJ/m}^3$$

Untuk mendapatkan *psyngas* maka digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$\rho_{gas} = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \rho_i \text{ gas}$$

Dimana:

Y_i = Konsentrasi senyawa gas dalam *syngas* (CO, CH₄, H₂, CO₂, N₂, dan O₂)

ρ_{i gas} = Nilai massa jenis senyawa gas dalam *syngas*

Berdasarkan Tabel 8 maka didapat seperti pada Tabel 10 [9]. Berikut ini adalah perhitungan untuk mencari massa jenis *syngas* pada ER 0,2 dan T *inlet* 30°C:

$$\rho_{gas} = \sum_{i=1}^n (0,11575 \times 1,0126) + (0,1821 \times 0,07316) + (0,02966 \times 0,588) + (0,14531 \times 1,5964) + (0,44305 \times 1,10171) + (0,04525 \times 1,128) = 0,8887 \text{ kg/m}^3$$

Jadi untuk nilai LHV_{syngas} (kJ/kg) adalah:

$$LHV_{syngas} = 4490,14 \frac{kJ}{m^3} \div \rho_{syngas} LHV_{syngas}$$

$$= 4490,14 \frac{kJ}{m^3} \times \frac{1}{0,8886707 \frac{kg}{m^3}}$$

$$LHV_{syngas} = 5052,6577 \text{ kJ/kg}$$

Berdasarkan Tabel 11, nilai LHV *syngas* yang menurun, seiring dengan peningkatan ER akan meningkatkan suplai \dot{m}_{udara} yang masuk ke dalam reaktor gasifikasi, sehingga mempengaruhi proses reaksi kimia pembentukan kandungan gas terbakar, maka kandungan gas terbakar (CO, H₂, dan CH₄) akan cenderung menurun, terutama CO dan H₂, kemudian untuk nilai LHV CH₄ merupakan yang terbesar (35883 kJ/kg) secara signifikan penurunan kandungan CH₄ mengakibatkan penurunan LHV *syngas*. Sebaliknya (CO₂, N₂, O₂), meningkat seiring dengan peningkatan suplai \dot{m}_{udara} . Proses gasifikasi membutuhkan suplai udara yang terbatas, sehingga kandungan gas terbakar akan cenderung meningkat, jika suplai \dot{m}_{udara} terbatas yang dibutuhkan tepat.

2) Hasil Eksperimen

Pada hasil eksperimen didapatkan hasil pada Tabel 12. Nilai LHV yang terbesar pada ER 0,2 dan T *inlet* 30°C, yaitu sebesar 3736,67 kJ/kg, dan terendah pada ER 0,4 dengan T *inlet* 75°C, yaitu sebesar 2026,52 kJ/kg. Hasil tersebut sesuai dengan perubahan temperatur pada tiap ER, sehingga menunjukkan bahwa temperatur dan pasokan udara memengaruhi kualitas *syngas* yang dihasilkan secara signifikan.

Grafik pada Gambar 4 merupakan grafik komparasi dari nilai LHV *syngas* yang diperoleh antara hasil simulasi dengan eksperimen, menunjukkan kedua hasil dari metode yang berbeda memiliki *trendline* yang sama dengan perbedaan nilai LHV *syngas* yang tidak terlalu jauh. Hasil dari metode eksperimen dipengaruhi peningkatan ER serta T *inlet* dan faktor eksternal lainnya sehingga dapat mempengaruhi kualitas *syngas*, akibat dari komposisi senyawa gas yang bersifat *flammable* semakin menurun. Sedangkan untuk hasil simulasi, sangat kecil sekali pengaruh dari faktor eksternal yang menyebabkan hasil dari simulasi lebih besar nilainya daripada hasil eksperimen.

H. Efisiensi Gasifikasi (Cold Gas Efficiency)

Hasil efisiensi gasifikasi diantaranya meliputi:

1) Hasil Simulasi Software Aspen Plus

Untuk menghitung efisiensi gasifikasi maka digunakan persamaan *cold gas efficiency* (η_{CG}) sebagai berikut.

$$\eta_{CG} = \frac{(\dot{m}_{gas} \times LHV_{gas})}{(\dot{m}_{biomassa} \times LHV_{biomassa})}$$

Berikut adalah perhitungan efisiensi gasifikasi untuk variasi ER 0,2 dengan T *inlet* 30°C.

$$\dot{m}_{gas} = 0,0035787 \text{ kg/s}$$

$$LHV_{gas} = 5052,6577 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{biomassa} = 0,005809 \text{ kg/s}$$

$$LHV_{biomassa} = 10850 \text{ kJ/kg}$$

Didapatkan:

$$\eta_{CG} = \frac{(0,0035787 \times 5052,6577)}{(0,005809 \times 10850)}$$

$$\eta_{CG} = 0,2869 \times 100 = 28,69\%$$

Didapatkan nilai efisiensi gasifikasi untuk hasil simulasi seperti pada Tabel 13. Nilai terendah untuk efisiensi gasifikasi yaitu pada T *inlet* 30°C dan ER 0,2 yaitu 28,69%, dan untuk nilai tertinggi pada T *inlet* 30°C dan ER 0,35 yaitu 36,47%. Hal ini terjadi karena adanya penurunan LHV *syngas*, karena semakin besar \dot{m}_{udara} dalam proses gasifikasi yang disebabkan oleh kenaikan kecepatan pembakaran, maka akan menaikkan efisiensi energi, lalu saat mencapai kondisi optimum, pembentukan CO₂ akan semakin banyak, sehingga gas yang dihasilkan akan semakin reaktif dan kualitas gas yang semakin buruk, maka nilai efisiensi energi (η_{CG}) akan menurun seiring bertambahnya ER dan T *inlet*.

2) Hasil Eksperimen

Tabel 14 adalah tabel efisiensi gasifikasi dari metode eksperimen setiap variasi ER dan T *inlet*. Efisiensi tertinggi berada di ER 0,35 dan T_{inlet} 30°C dengan hasil efisiensi 53,66% dan terendah pada T_{inlet} 75°C ada di ER 0,2 yaitu sebesar 42,99%. Penurunan Efisiensi terjadi karena penurunan nilai LHV *syngas*, walaupun terjadi kenaikan \dot{m}_{syngas} yang disebabkan karena peningkatan \dot{m}_{udara} , η_{CG} mengalami penurunan karena udara berlebih pada zona pirolisis dan reduksi menyebabkan terjadinya pembakaran sempurna yang dapat menurunkan komposisi *flammable gas*, sehingga hasilnya semakin kecil seiring bertambahnya \dot{m}_{udara} .

I. Analisa Eksergi proses Gasifikasi

Hasil analisa eksergi proses gasifikasi diantaranya meliputi:

1) Hasil Simulasi Software Aspen Plus

a) Exergy Biomassa

Exergy yang dimiliki oleh biomassa didapatkan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Ex_{biomass} = b \cdot LHV_{biomass}$$

Dengan *b* sebagai berikut:

$$b = \frac{1,0414 + 0,0177 \cdot \left(\frac{H}{C}\right) - 0,3328 \cdot \left(\frac{O}{C}\right) \cdot \left[1 + 0,0537 \cdot \left(\frac{H}{C}\right)\right]}{1 - 0,4021 \cdot \left(\frac{O}{C}\right)}$$

Menghitung nilai *b*

$$b = \frac{1,0414 + 0,0177 \cdot \left(\frac{0,0591}{0,476}\right) - 0,3328 \cdot \left(\frac{0,387}{0,476}\right) \cdot \left[1 + 0,0537 \cdot \frac{0,0591}{0,476}\right]}{1 - 0,4021 \cdot \left(\frac{0,387}{0,476}\right)}$$

$$b = 1,1561388$$

Menghitung nilai *exergy biomass*

$$Ex_{biomass} = 1,1561388 \cdot 10850 \text{ kJ/kg}$$

$$= 12544,106 \text{ kJ/kg}$$

b) Exergy Syngas

Exergy syngas pada ER 0,2 dan T *inlet* 30°C didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$Ex_{product} = Ex_{ph} + Ex_{ch}$$

Menghitung *exergy physical gas*

$$Ex_{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0)$$

Dengan $h-h_0$ dan $s-s_0$ sebagai berikut:

$$h - h_0 = \int_{T_0}^T c_p dT, \quad s - s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT$$

Dengan C_p setiap gas didapatkan dari "Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure" ditampilkan pada Tabel 15 [9].

Didapatkan nilai *exergy physical gas* sebesar:

$$Ex_{physical} = 50,547 \text{ kJ/kg}$$

Menghitung *exergy chemical gas*

$$Ex_{ch} = m_{syngas} \cdot b \cdot LHV_{syngas}$$

$$Ex_{ch} = 4221,956 \text{ kJ/kg}$$

Menghitung efisiensi *exergy*

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{X}_{product}}{\dot{X}_{feed}} = \frac{Ex_{ph\ gas} + Ex_{ch\ gas}}{Ex_{biomassa} + Ex_{ph\ agent}} = \frac{50,547 + 4221,9}{12544,106} \times 100$$

$$\eta_{exergy} = 34,06\%$$

Efisiensi *exergy* yang didapat dari hasil simulasi pada tiap variasi ER ditampilkan pada Tabel 16 dan Tabel 17. Pada Tabel 16, Efisiensi *exergy* untuk T_{inlet} 30°C, *exergy physical agent* diasumsikan nol atau dapat ditiadakan karena berada pada temperatur lingkungan di Kota Surabaya (30°C). Pada Tabel 17, untuk T_{inlet} 50°C dan 75°C ditambahkan *exergy physical agent* karena terdapat variasi temperatur *inlet* udara.

Seperti pada Tabel 16 dan Tabel 17, terlihat bahwa *exergy chemical gas* cenderung jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *exergy physical gas*, hal ini menandakan bahwa pemanfaatan *syngas* lebih baik dengan menggunakan proses reaksi kimia, yaitu pembakaran. Nilai efisiensi *exergy* tertinggi dari semua variasi ER dan T_{inlet} berada pada ER 0,2 dan T_{inlet} 30°C sebesar 34,06%.

2) Hasil Eksperimen

Efisiensi *exergy* yang didapatkan untuk hasil eksperimen dengan langkah perhitungan yang sama seperti metode simulasi untuk tiap variasi ER dan T_{inlet} , ditampilkan pada Tabel 18.

Peningkatan T_{inlet} dan semakin tinggi ER serta banyaknya *exergy* hilang di lingkungan, akan membuat temperatur zona oksidasi semakin tinggi yang menyebabkan hasil T_{output} dari *exergy physical gas* semakin tinggi pada tiap perubahan variasinya, hal ini diakibatkan karena adanya perubahan LHV *syngas* dan media udara yang semakin banyak menjadikan irreversibilitas sistem yang terjadi semakin besar, sehingga akan menyebabkan penurunan efisiensi *exergy* proses gasifikasi. Nilai efisiensi yang terbesar 25,45%, pada ER 0,2 dengan T_{inlet} 30°C.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dengan judul "Studi Simulasi dan Eksperimental Pengaruh Variasi *Equivalence Ratio* dan Temperatur Udara *Inlet* Pada Proses Gasifikasi Tongkol Jagung Terhadap Unjuk Kerja *Gasifier* Tipe *Downdraft* Berdasarkan Prinsip Energi dan Eksergi", maka didapatkan disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

(1) Peningkatan ER dan temperatur udara *inlet* akan menyebabkan penurunan LHV yang linier, akibat dari komposisi senyawa gas yang bersifat *flammable* semakin menurun. Nilai LHV terbesar untuk hasil simulasi terjadi pada ER 0,2 dan T_{inlet} 30°C didapatkan 5052,65 kJ/kg; dan untuk hasil eksperimen didapatkan LHV *syngas* sebesar 3736,67 kJ/kg. (2) Peningkatan ER dan temperatur udara *inlet* akan menyebabkan adanya kenaikan η_{CG} , hal ini terjadi karena pengaruh dari nilai kalor (LHV) yang semakin menurun, karena semakin besar \dot{m}_{udara} pada proses gasifikasi, maka akan menaikkan η_{CG} . Saat mencapai efisiensi optimum, pembentukan CO₂ akan semakin banyak, sehingga gas semakin reaktif dan mempengaruhi LHV *syngas*, maka efisiensi akan menurun seiring bertambahnya ER dan T_{inlet} . Didapatkan hasil η_{CG} tertinggi untuk hasil simulasi pada ER 0,35 dan T_{inlet} 30°C sebesar 36,47%; dan untuk hasil dari eksperimen pada ER 0,35 dan T_{inlet} 30°C sebesar 53,84%. (3) Peningkatan parameter operasi ER menyebabkan efisiensi *exergy* semakin kecil, maka komposisi *flammable gas* seperti H₂, CO, dan CH₄ semakin menurun. Peningkatan parameter temperatur *inlet* dan semakin tinggi ER serta banyaknya *exergy* yang hilang di lingkungan, serta dari faktor lingkungan sekitar yang mempengaruhi proses kerja gasifikasi, akan membuat temperatur zona oksidasi semakin tinggi yang menyebabkan hasil temperatur *output* dari *exergy physical gas* semakin tinggi pada tiap perubahan variasinya, hal ini diakibatkan karena adanya perubahan LHV *syngas* dan media udara yang semakin banyak menjadikan irreversibilitas sistem yang terjadi semakin besar, sehingga menyebabkan penurunan efisiensi *exergy* pada proses gasifikasi. Analisa nilai efisiensi *exergy* tertinggi untuk hasil simulasi yaitu pada ER 0,2 dan T_{inlet} 30°C didapatkan nilai sebesar 34,06%; dan untuk hasil eksperimen yaitu sebesar 25,45% pada ER 0,2 dengan T_{inlet} 30°C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mahardhika and F. R. Dewi, "Analisis pengembangan usaha pemanfaatan limbah bonggol jagung menjadi produk kerajinan multiguna," *J. Manaj. dan Organ.*, vol. 5, no. 3, pp. 214–226, 2014.
- [2] P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, 3rd ed. United States: Academic Press, 2018.
- [3] H. Susanto, "Pengembangan Teknologi Gasifikasi untuk Mendukung Kemandirian Energi dan Industri kimia," Institut Teknologi Bandung, 2018.
- [4] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, "Biomass gasification technology: The state of the art overview," *J. Energy Chem.*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, 2016, doi: 10.1016/j.jechem.2015.11.005.
- [5] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, and others, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 989–1003, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.112.
- [6] D. Venugopal, L. Thangavelu, and N. Elumalai, "Energy, exergy and sustainability analysis of rice husk air gasification process," *Therm. Sci.*, vol. 23, no. 2 Part A, pp. 549–560, 2019, doi: 10.2298/TSCI170613068V.
- [7] B. Sudarmanta, "Variasi Rasio Gasifying Agent-Biomassa terhadap Karakterisasi Gasifikasi Tongkol Jagung Pada Reaktor Downdraft," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2010.
- [8] D. R. Ependi, "Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur Udara Inlet Zona Oksidasi pada Proses Gasifikasi Pelet Municipal Solid Waste Terhadap Unjuk Kerja *Gasifier* Tipe Downdraft," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [9] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, and others, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed., vol. 6. New York: Wiley, 1996.