

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 4, No. 2, Oktober 2016



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) merupakan publikasi resmi Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA). JTEP terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. Sehubungan dengan banyaknya naskah yang diterima redaksi, maka sejak edisi volume 4 No. 1 tahun 2016 redaksi telah meningkatkan jumlah naskah dari 10 naskah menjadi 15 naskah untuk setiap nomor penerbitan, tentunya dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi *online*. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energy alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam **invited paper** yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, **review** perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, **technical paper** hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta **research methodology** berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang B. Seminar (Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Universitas Sriwijaya, Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta)
Y. Aris Purwanto (Institut Pertanian Bogor)
M. Faiz Syuaib (Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Universitas Hasanuddin, Makasar)
Anom S. Wijaya (Universitas Udayana, Denpasar)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah
Sekretaris : Lenny Saulia
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah
Anggota : Usman Ahmad
Dyah Wulandani
Satyanto K. Saptomo
Slamet Widodo
Liyantono
Sekretaris : Diana Nursolehat

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Darmaga, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 4 No. 2 Oktober 2016. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Thamrin Latief, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Ade M. Kramadibrata, (Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwanto, MS (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Tineke Madang, MS (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Budi Indra Setiawan (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Siswoyo Soekarno, M.Eng (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya), Dr.Ir. Nugroho Triwaskito, MP (Prodi. Ilmu dan Teknologi Pangan, Universitas Muhammadiyah Malang), Dr.Ir. Lady Corrie Ch Emma Lengkey, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. Andasuryani, S.TP, M.Si. (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Yazid Ismi Intara, SP.,M.Si. (Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman), Dr. Ir. Supratomo, DEA (Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr. Suhardi, STP.,MP (Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr.Ir. Desrial, M.Eng (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Lilik Pujantoro, M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Wayan Budiastira, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Dyah Wulandani, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Leopold O. Nelwan, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Gatot Pramuhadi, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Sugiarto (Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Chusnul Arief, STP., MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Yudi Chadirin, STP.,M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

Analisis Dimensional Reaktor Berpengaduk Statis untuk Produksi Biodiesel

Dimensional Analysis of Static Mixing Reactor for Biodiesel Production

Akhmad Irfan, Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor.

Email: akhmad.irfan.ipb@gmail.com

Armansyah Halomoan Tambunan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: ahtambun@ipb.ac.id

Desrial, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: desrial@ipb.ac.id

Abstract

Biodiesel production can be done using static mixing reactor (SMR). The production by this method requires less energy than blade agitator. However, the use of elements in the helix-shaped stirrer reactors causing large pressure drop. The other factors that affect the flow in the SMR can be determined using dimensional analysis. Dimensional analysis can be used to eliminate the variables that are not required so that can be done to optimize the energy used in the SMR design. The variables that influence the pressure drop (ΔP) in the SMR can be formulated into mathematical equation as:

$$\Delta P = 1.5747 \rho v^2 \left(\frac{Lp}{D}\right)^{0.624} (Ar)^{-1.089} \left(\frac{1}{Re}\right)^{-0.074}$$

Total irreversibility due to the use of a static mixer in the SMR tested is 0.237 W.

Keywords: *Static mixing reactor, dimensional analysis, exergy analysis, pressure drop*

Abstrak

Produksi biodiesel dapat dilakukan dengan menggunakan reaktor berpengaduk statis atau SMR (*Static Mixing Reactor*). Pembuatan biodiesel dengan metode ini membutuhkan energi yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan blade agitator. Namun demikian penggunaan elemen pengaduk yang berbentuk helix dalam reaktor menimbulkan *pressure drop* yang besar. Faktor-faktor lain yang berpengaruh terhadap aliran di dalam SMR dapat ditentukan dengan menggunakan analisis dimensional. Analisis dimensional mampu menghilangkan variabel-variabel yang tidak diperlukan sehingga dapat dilakukan untuk mengoptimalkan energi yang digunakan dalam perancangan SMR. Variabel-variabel yang berpengaruh terhadap *pressure drop* (ΔP) di dalam SMR yang dapat diformulasikan ke dalam bentuk persamaan matematis sebagai:

$$\Delta P = 1.5747 \rho v^2 \left(\frac{Lp}{D}\right)^{0.624} (Ar)^{-1.089} \left(\frac{1}{Re}\right)^{-0.074}$$

Ketakmampubalikan total akibat penggunaan elemen berpengaduk statis yang diuji adalah 0,237 W.

Kata Kunci: *Static mixing reactor, analisis dimensional, analisis eksergi, pressure drop*

Diterima: 04 Februari 2016; Disetujui: 13 Mei 2016

Pendahuluan

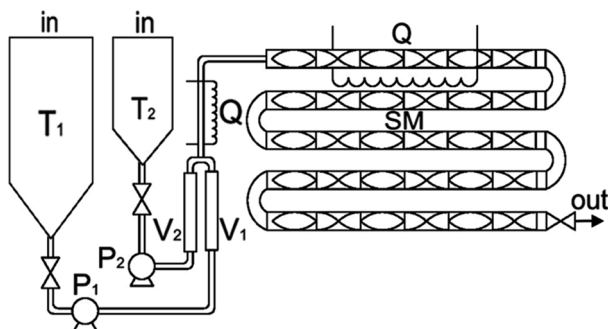
Biodiesel merupakan bahan bakar pengganti minyak diesel yang diperoleh dari minyak nabati ataupun hewani. Minyak jarak dan minyak kelapa sawit merupakan bahan pembuat biodiesel yang

paling banyak tersedia di Indonesia. Proses pembuatan biodiesel dikenal dengan proses transesterifikasi, yaitu merupakan reaksi kimia antara trigliserida dan alkohol rantai pendek ditambah dengan katalis untuk menghasilkan mono-ester dan gliserin (Moser 2009).

Pembuatan biodiesel dapat dilakukan dengan menggunakan reaktor berpengaduk statis atau *static mixing reactor* (SMR). Menurut Alamsyah et al. (2010) pembuatan biodiesel dengan menggunakan SMR membutuhkan energi yang lebih kecil (1,812.60 kJ/kg) dibandingkan dengan menggunakan *blade agitator* (2,212.32 kJ/kg). Selain itu laju reaksi transesterifikasi dengan menggunakan SMR lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan *blade agitator* pada awal proses. SMR mampu menurunkan penggunaan katalis KOH menjadi 0.5%. Untuk memperoleh hasil biodiesel dengan kadar metil ester yang sesuai dengan SNI dengan katalis KOH sebesar 0.5% diperlukan waktu reaksi selama 44 menit dengan suhu reaksi 60°C (Panggabean 2011). Dengan katalis yang sama, penggunaan SMR sistem semi kontinu menghasilkan biodiesel berkadar metil ester sesuai dengan SNI jika dilewatkan 4 kali atau setara dengan menggunakan 8 reaktor dengan masing-masing reaktor terdiri atas 6 elemen pengaduk (Soolany et al. 2014).

Thakur et al. (2003) menyatakan bahwa faktor kunci yang mempengaruhi aliran dalam reaktor elemen berpengaduk adalah *pressure drop*. Menurut Song & Han (2005) penggunaan elemen pengaduk yang berbentuk *helix* dalam reaktor berpengaduk statik mampu menimbulkan *pressure drop* yang besar. Dengan mengestimasi besarnya *pressure drop* dapat digunakan untuk perencanaan desain yaitu untuk menghitung kebutuhan pompa yang akan digunakan.

Faktor-faktor lain yang berpengaruh terhadap aliran di dalam SMR dapat ditentukan dengan menggunakan analisis dimensional. Analisis dimensional merupakan metode yang digunakan untuk menyederhanakan gejala fisik. Bridgman (1922) menyatakan bahwa penggunaan utama dari analisis dimensional untuk menyimpulkan dari studi dimensi variabel dalam keterbatasan sistem fisik tertentu pada bentuk hubungan yang mungkin antara variabel. Inti dari analisis dimensi adalah konsep kesamaan. Analisis dimensional mampu menghilangkan variabel-variabel yang tidak diperlukan, dengan demikian dari analisis



Gambar 1. Skematik SMR kontinu (T_1 : tangki minyak, T_2 : tangki metanol, P_1 : pompa minyak, P_2 : pompa metanol, V_1 : flowmeter minyak, V_2 : flowmeter metanol, Q : heater, SM : *Static Mixer*).

dimensional dapat diperoleh parameter yang benar-benar berpengaruh dalam SMR dan untuk mengoptimalkan energi yang digunakan dalam pembuatan biodiesel menggunakan SMR kontinu.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *pressure drop* akibat dari SMR kontinu dalam proses pembuatan biodiesel dan juga mengkaji penghematan kerja yang dapat dilakukan dalam proses tersebut.

Bahan dan Metode

Alat dan bahan

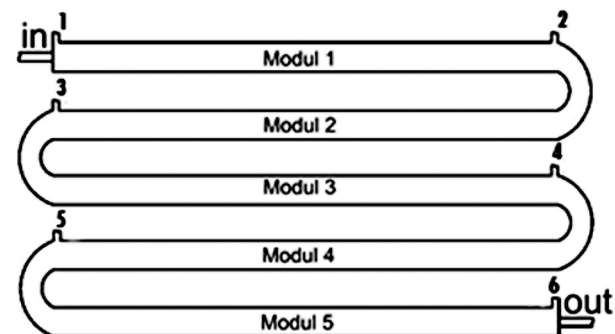
Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah prototipe SMR kontinu dengan 5 modul yang masing-masing modulnya memiliki 12 elemen pengaduk berbentuk *helix* 180°. Skematik SMR yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Metode pengukuran tekanan

Peralatan penunjang yang digunakan dalam penelitian ini meliputi manometer air, viscometer ostwald, kamera digital, dan botol sampel. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah minyak kelapa sawit (Refined Bleached Deodorized Palm Olein-RBDPO), metanol (MeOH), katalis kalium hidroksida (KOH), aquades, hexan dan alkohol teknis.

Pembuatan biodiesel dengan menggunakan SMR sistem kontinu dilakukan dengan suhu operasi 65°C dan katalis KOH 0.5%. Rasio molar antara minyak dan metanol sebesar 1:6 yang merupakan rasio optimum dalam proses transesterifikasi (Freedman et al. 1986; Vicente et al. 2004; Darnoko dan Cheryan 2000; Knothe et al. 2005). Pengoperasian reaktor dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada reaktor tanpa elemen pengaduk statis yang akan digunakan sebagai kontrol dan dengan menggunakan pengaduk statis sebagai bagian yang akan diuji. Perlakuan lain yang diberikan terhadap keduanya sama (Tabel 1). Tekanan yang diukur adalah tekanan yang berada pada awal dan akhir modul (Gambar 2) yang dilambangkan dengan data ke-1, 2, 3, 4, 5, dan data ke-6.

BManometer yang digunakan untuk mengambil



Gambar 2. Titik-titik pengambilan tekanan.

Tabel 1. Kondisi operasi.

Kondisi operasi	Nilai	Satuan
Debit minyak sawit	9	l/m
Debit metanol	2.5	l/m
Katalis KOH	0.5	%
Suhu operasi	65	°C

data tekanan adalah manometer air yang dibuat dari selang transparan berukuran ¼ in. Pengambilan data tekanan dilakukan dengan kamera untuk mengurangi terjadinya paralaks. Pada setiap titik pengambilan data tekanan juga diambil data suhu dan juga sampel minyak. Dari sampel minyak yang diambil nantinya diperoleh data berat jenis (ρ), viskositas dinamik (μ) dan viskositas kinematik (ν) campuran minyak.

Analisis dimensional

Menurut Song & Han (2005) faktor-faktor yang berpengaruh dalam SMR adalah *pressure drop* (ΔP), faktor gesekan (C_f), bilangan Reynold (Re) dan *aspect ratio* (Ar) sehingga dalam persamaan matematis dapat dituliskan sebagai

$$f(\Delta P, D, L_p, Le, \mu, \rho, \nu) = 0 \tag{1}$$

dengan L_p adalah panjang reaktor, Le adalah panjang elemen, D adalah diameter reaktor dan ν adalah kecepatan aliran di dalam pipa. Dari persamaan matematis tersebut maka ditentukan dimensi-dimensi dari parameter-parameter tersebut yang tersaji pada Tabel 2.

Pemodelan yang digunakan dalam analisis dimensional ini adalah dengan metode Buckingham (Phi-Theorema). Dari parameter-parameter pada Tabel 2 ditentukan jumlah grup tak berdimensi (π) dengan menggunakan persamaan

$$i = n - r \tag{2}$$

dengan i adalah jumlah grup tak berdimensi, n adalah jumlah variabel yang terlibat dan r adalah rank dari makriks dimensional. Dalam model ini terdapat 5 grup tak berdimensi sehingga akan terbentuk $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ dan π_5 . Persamaan masing-masing grup tak berdimensi tampak pada Persamaan 3 sampai dengan Persamaan 7.

$$\pi_1 = \Delta P \rho^{-1} \nu^2 \tag{3}$$

$$\pi_2 = L_p D^{-1} \tag{4}$$

$$\pi_3 = Le D^{-1} \tag{5}$$

$$\pi_4 = \mu \nu^{-1} \rho^{-1} D^{-1} \tag{5}$$

$$\pi_5 = 1 \tag{7}$$

Tabel 2. Lambang dan dimensi parameter yang berpengaruh dalam SMR.

Parameter	Lambang	Dimensi (MLT)
Pessure drop	ΔP	$M L^{-1} T^{-2}$
Diameter	D	L
Panjang pipa	L_p	L
Panjang elemen pengaduk	Le	L
Viskositas kinematik	μ	$M L^{-1} T^{-1}$
Berat jenis	ρ	$M L^{-3}$
Kecepatan aliran	ν	$L T^{-1}$
Sudut puntiran	θ	L/L

Dari grup-grup tak berdimensi tersebut jika disubstitusikan ke dalam Persamaan 1 maka dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) = 0 \tag{8}$$

$$f\left(\frac{\Delta P}{\rho^1 \nu^2}, \frac{L_p}{D}, \frac{Le}{D}, \frac{\mu}{\nu \rho D}, 1\right) = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho^1 \nu^2} = f\left(\frac{L_p}{D}, \frac{Le}{D}, \frac{\mu}{\nu \rho D}\right) \tag{10}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho \nu} = f\left(\frac{L_p}{D}, Ar, Re\right) \tag{11}$$

$$\Delta P = C \rho \nu^2 \left(\frac{L_p}{D}\right)^a (Ar)^b \left(\frac{1}{Re}\right)^c \tag{12}$$

Dengan nilai dari $C, a, b,$ dan c didapat dari perhitungan menggunakan data yang diperoleh dalam penelitian ini.

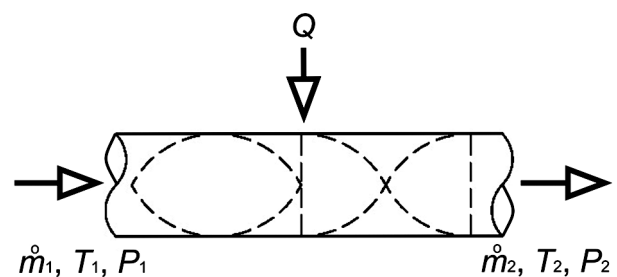
Analisis eksergi

Untuk menganalisis persamaan keseimbangan eksergi aliran di dalam reaktor perlu digambarkan diagram atau skema dari sistem (Gambar 3). Langkah pertama dalam menentukan perubahan eksergi adalah dengan menyusun persamaan kesetimbangan energi aliran minyak.

$$\dot{m} h_1 = \dot{m} h_2 + Q \tag{13}$$

Dengan \dot{m} adalah laju massa aliran minyak dalam reaktor dan h adalah entalpi.

Pada kasus ini Q yang merupakan energi dari pemanas diabaikan karena analisis hanya dilakukan terhadap pengaruh ΔP saja. Selanjutnya disusun persamaan keseimbangan entropi yaitu:



Gambar 3. Skema sistem dalam SMR.

Tabel 3. Pengaruh SMR terhadap sifat fisik dan sifat mekanik campuran minyak dalam proses transesterifikasi.

Data ke-	P (Pa)	T °C	μ (N.s/m ²)	ρ (kg/m ³)	v (m/s)	Re
1	102,168.49	59	0.0267	865.00	0.187	218.8847
2	101,864.44	55	0.0065	852.00	0.190	899.3794
3	101,619.24	55	0.0048	795.33	0.204	3,320.4675
4	101,481.93	65	0.0041	854.00	0.190	1,421.7694
5	101,364.23	56	0.0037	869.33	0.186	1,560.6035
6	101,325.00	50	0.0027	842.67	0.192	2,138.5473

$$\dot{m}S_1 = \dot{m}S_2 + \sigma \tag{14}$$

S merupakan entropi dan σ adalah ketakmampubalikan (*irreversibility*) sistem.

Eksergi merupakan besaran dari kualitas energi sehingga eksergi adalah energi dikurangi dengan entropi yang dikalikan dengan suhu ruang. Dengan demikian persamaan kesetimbangan eksergi dari sistem dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{m}h_1 - T_0 \dot{m}S_1 = \dot{m}h_2 - T_0 \dot{m}S_2 + T_0 \sigma \tag{15}$$

$$T_0 \sigma = \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}T_0(S_2 - S_1) \tag{16}$$

$$T_0 \sigma = \dot{m}dh - \dot{m}T_0 dS \tag{17}$$

Untuk analisis eksergi yang diakibatkan oleh ΔP maka dh dianggap nol karena diasumsikan tidak terjadi reaksi, sehingga Persamaan 17 berubah menjadi:

$$T_0 \sigma = -\dot{m}T_0(S_2 - S_1) \tag{18}$$

Selanjutnya digunakan persamaan $T dS$ agar perhitungan entropi dapat dilakukan dengan data yang lebih banyak dan lengkap.

$$T dS = dh - v dP \tag{19}$$

$$T dS = -v dP \tag{20}$$

$$S_2 - S_1 = \int_{P_1}^{P_2} \frac{v}{T} dP \tag{21}$$

Jika persamaan gas ideal dimasukkan ke dalam Persamaan 21 maka akan diperoleh persamaan

$$S_2 - S_1 = R \int \frac{1}{P} dP \tag{22}$$

Sehingga persamaan eksergi untuk sistem ini adalah:

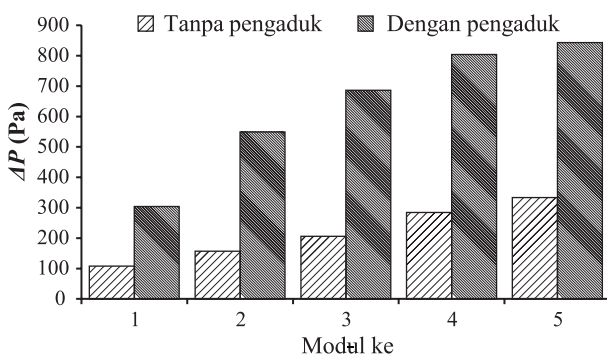
$$T_0 \sigma = \dot{m}T_0 R \ln \frac{P_2}{P_1} \tag{23}$$

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh pengaduk statis terhadap *pressure drop* (ΔP)

Dari hasil pengukuran terhadap pipa tanpa pengaduk dan dengan pengaduk statis menunjukkan bahwa *pressure drop* yang terjadi pada pipa berpengaduk statis lebih besar dibandingkan dengan pipa tanpa pengaduk. Dari hasil pengukuran tekanan ini tampak bahwa dengan adanya elemen pengaduk statis di dalam pipa maka akan meningkatkan *pressure drop* aliran. Bakker et al. (2000) menyatakan bahwa tekanan terbesar yang terjadi pada elemen berpengaduk statis terdapat pada bagian ujung elemen dan daerah dengan tekanan yang rendah terjadi ketika fluida meninggalkan elemen. *Pressure drop* paling besar terjadi pada modul pertama dan yang terkecil pada modul kelima.

Pada Gambar 4 tampak bahwa perubahan *pressure drop* pipa tanpa pengaduk lebih kecil dibandingkan *pressure drop* pipa dengan SMR. Selain itu *pressure drop* pada pipa dengan SMR juga mengalami penurunan yang lebih besar pada setiap modulnya. Hal ini terjadi karena pada pipa dengan SMR mengalami perubahan viskositas dan densitas yang lebih besar sehingga perubahan *pressure drop* yang terjadi lebih besar. Hal ini menunjukkan dengan adanya elemen pengaduk di dalam SMR maka reaksi yang terjadi di dalamnya lebih cepat.



Gambar 4. *Pressure drop* yang terjadi pada setiap modul pada pipa tanpa pengaduk dan dengan pengaduk statis (SMR).

Tabel 4. Validasi persamaan.

Modul	ΔP_{aktual} (Pa)	ΔP_{hitung} (Pa)	Error (%)
1	304.048	309.358	1.72
2	549.248	544.785	0.82
3	686.56	664.360	3.34
4	804.256	791.168	1.65
5	843.488	878.017	3.93

Table 5. Ketakmpubalikan akibat perubahan tekanan.

Modul	σ_{mixer} W	$\sigma_{\text{tanpa mixer}}$ W	$\Delta\sigma$ %
1	0.141	0.050	180.73
2	0.255	0.073	248.99
3	0.319	0.096	232.52
4	0.374	0.133	182.12
5	0.392	0.156	152.36

Analisis dimensional

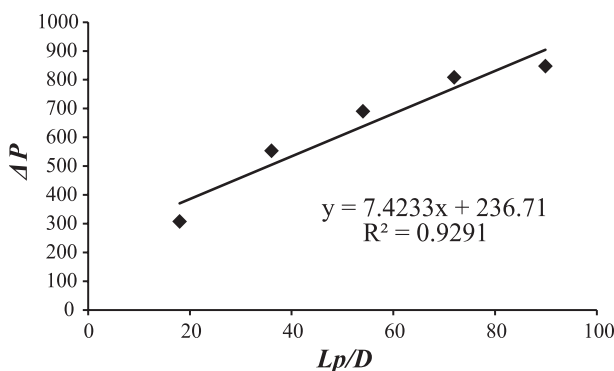
Dari hasil pengoperasian SMR diperoleh data sifat fisik dan mekanik dari campuran minyak (Tabel 3). Data sifat fisik dan sifat mekanik yang telah diperoleh disubstitusikan ke dalam bentuk π (Persamaan 12) dan diubah menjadi bentuk $\ln \pi$.

Dengan menggunakan pendugaan regresi linear terhadap $\ln \pi$ maka didapatkan nilai $C = 1.5747$, $a = 0.624$, $b = -1.089$, dan $c = -0.074$. Dari nilai konstanta dan koefisien tersebut diperoleh persamaan matematis hubungan antara *pressure drop* dengan parameter lainnya sebagai berikut:

$$\Delta P = 1.5747 \rho v^2 \left(\frac{Lp}{D}\right)^{0.624} (Ar)^{-1.089} \left(\frac{1}{Re}\right)^{-0.074} \quad (24)$$

Validasi model dilakukan dengan mensubstitusikan kembali data-data yang ada ke dalam persamaan yang telah diperoleh. Dari hasil validasi tersebut diperoleh nilai error seperti pada Tabel 4. Nilai error yang terjadi masih di bawah 10% sehingga persamaan dapat diterima.

Hubungan antara ΔP dengan Lp/D berupa



Gambar 5. Hubungan antara ΔP dengan Lp/D .

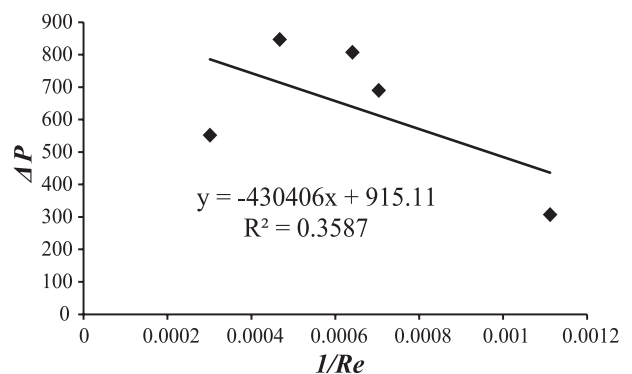
garis linier dengan gradien positif, dengan demikian dengan meningkatnya Lp/D maka akan meningkatkan ΔP . Apabila Lp/D berubah sebesar 100% maka ΔP berubah sebesar 38.54%. Hubungan ini tampak seperti pada Gambar 5. Dari Persamaan 24 tampak bahwa hubungan ΔP dengan Lp/D berbentuk polinomial, namun demikian pada segmen yang terukur dalam penelitian ini hubungan ΔP dengan Lp/D dapat dilinierkan seperti pada Gambar 5. Pada Lp/D sama dengan nol nilai ΔP mendekati nol, hal ini dikarenakan pada saat Lp/D sama dengan nol tekanan fluida yang terukur berada pada satu titik sehingga perubahan tekanan yang terjadi sama dengan nol. Peningkatan 100% $1/Re$ menurunkan ΔP sebesar 100.21%. Hubungan antara ΔP dengan $1/Re$ berupa garis linear dengan gradien negatif (Gambar 6).

Analisis eksergi

Analisis eksergi yang dilakukan merupakan analisis eksergi akibat perubahan tekanan di dalam pipa. Pada analisis ini penambahan panas oleh pemanas dan juga eksergi yang diakibatkan oleh reaksi dianggap nol. Dengan mensubstitusikan hasil pengukuran tekanan ke dalam Persamaan 23 maka diperoleh nilai ketakmpubalikan pada Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan besarnya ketakmpubalikan akibat perubahan tekanan yang terjadi di dalam pipa kosong dan pipa berpengaduk statis. Semakin besar perubahan tekanan yang terjadi di dalam pipa mengakibatkan peningkatan nilai ketakmpubalikan, hal ini mengakibatkan ketakmpubalikan SMR lebih besar dibandingkan dengan pipa tanpa pengaduk.

Selisih ketakmpubalikan antara SMR dengan pipa tanpa pengaduk merupakan ketakmpubalikan akibat penggunaan elemen pengaduk statis. Total ketakmpubalikan akibat elemen pengaduk statis adalah 0.237 W, dan dianggap sebagai nilai ketakmpubalikan yang dapat diminimalkan melalui rancangan elemen pengaduk statik yang lebih baik. Berdasarkan pada hubungan antara ΔP dengan Lp/D dan $1/Re$, untuk menurunkan nilai ΔP dapat dilakukan dengan mengubah parameter yang berhubungan



Gambar 6. Hubungan antara ΔP dengan $1/Re$.

dengan Lp/D dan juga $1/Re$. Lp/D merupakan parameter yang berasal dari spesifikasi mesin sehingga untuk merubah parameter tersebut harus dilakukan dengan mengubah desain mesin. Untuk menurunkan ΔP tanpa mengubah desain mesin adalah dengan mengubah $1/Re$ yaitu dengan mengubah kecepatan aliran di dalam pipa. $1/Re$ berbanding terbalik dengan v sehingga dengan ρ , μ dan D yang sama jika v diturunkan sebesar 50% maka ΔP akan meningkat sebesar 50.105%.

Simpulan

Variabel-variabel yang berpengaruh terhadap *pressure drop* (ΔP) di dalam SMR meliputi diameter pipa (D), panjang pipa (Lp), panjang elemen pengaduk (Le), viskositas kinematik campuran minyak (μ), berat jenis campuran minyak (ρ) dan juga kecepatan aliran di dalam pipa (v) yang dapat diformulasikan ke dalam bentuk persamaan matematis sebagai:

$$\Delta P = 1.5747 \rho v^2 \left(\frac{Lp}{D}\right)^{0.624} (Ar)^{-1.089} \left(\frac{1}{Re}\right)^{-0.074}$$

Total ketakmampubalikan akibat penggunaan elemen pengaduk statis adalah 0.237 W.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang sudah mendukung penelitian ini dalam Penelitian Hibah Kompetensi tahun ketiga sesuai kontrak nomor: 157/SP2H/PL/DI.LITABMAS/2/2015 Tanggal 5 Februari 2015.

Daftar Pustaka

- Alamsyah, R., A.H. Tambunan, Y.A. Purwanto, D. Kusdiana. 2010. Comparison of static-mixer and blade agitator reactor in biodiesel production. CIGR Journal. 12(1):99106.
- Bakker, A., R.D. Laroche, E.M. Marshall. 2000. Laminar flow in static mixers with helical elements. The Online CFM Book [Internet]. [diunduh 2013 Nov 28]. Tersedia pada: <http://www.bakker.org/cfm>.
- Bridgman, P.W. 1922. *Dymensional Analysis*. Yale (US): Yale Univ Pr.
- Darnoko, D., M. Cheryan. 2000. Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. JAOCS. 77(12):1263-1267.
- Freedman, B., W.F. Kwolek, E.H. Pryde. 1986. Quantitation in the analysis of transesterified soybean oil by capillary gas chromatography. JAOCS. 63:1370-1375.
- Knothe, G., J.V. Gerpen, J. Krahl. 2005. *The Biodiesel Handbook*. Champaign, Illinois (US). AOCS Pr.
- Moser, B.R. 2009. Biodiesel production, properties, and feedstocks. In *Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 45:229-266.
- Panggabean, S. 2011. Analisis kinetika reaksi transesterifikasi pada produksi biodiesel secara katalitik dengan *static mixing reactor* [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Song, H.S., S.P. Han. 2005. A general correlation for pressure drop in a Kenics static mixer. *Chem Eng Science*. 60:5696-5704. doi:10.1016/j.ces.2005.04.084.
- Soolany, C., A.H. Tambunan, R. Sudrajat. 2015. Kajian penggunaan static mixing reactor pada proses produksi biodiesel secara katalitik dengan sistem continue. *J Penelitian Hasil Hutan*. 33(3):261-272.
- Thakur, R.K., Ch. Vial, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman, G. Djelveh. 2003. Static mixers in the process industries - a review. *ICHEME*. 81:787-826.
- Vicente, G., M. Martinez, J. Araci. 2004. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource Technology*. 92:297-305.