

## MAKALAH ILMIAH HASIL PENELITIAN



## ANALISIS EFEK PENGGUNAAN BODIESEL SEBAGAI BAHAN BAKAR TERHADAP KINERJA FIRE TUBE BOILER

**Leily Nurul Komariah, ST, MT**  
NIP. 19750326 1999032002

UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
JURUSAN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK  
2015

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Untuk memenuhi kebutuhan steam di sektor industri, boiler merupakan fasilitas yang intensif mengkonsumsi energi melalui kegiatan pembakaran. Meskipun penggunaan bahan bakar minyak pada boiler semakin berkurang dan jumlahnya lebih kecil dibandingkan bahan bakar fosil lainnya, namun dari segi kuantitas konsumsi minyak solar untuk kebutuhan sektor industri tetap tinggi.

Kebijakan energi nasional saat ini telah diarahkan untuk mengurangi porsi penggunaan bahan bakar fosil dan meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan. Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan yang memiliki banyak kesamaan sifat dengan minyak solar sehingga dapat diimplementasikan pada mesin diesel dengan minimum atau tanpa modifikasi, terutama dalam porsi pencampuran yang rendah. Mandatori pemerintah mengenai pentahapan penggunaan bahan bakar nabati telah dipertegas melalui Peraturan Menteri ESDM No 25 tahun 2013. Dalam peraturan ini, penggunaan biodiesel di sektor industri dan komersial ditargetkan mulai 5% pada tahun 2010, 10% pada awal tahun 2015 dan 20% pada tahun 2025.

Pengujian biodiesel telah banyak dilakukan pada berbagai jenis mesin diesel, termasuk boiler. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel menunjukkan pengaruh yang positif terhadap terhadap emisi gas buang dan efek yang bervariasi terhadap kinerja mesin. Kinerja mesin ditandai dengan parameter efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar. Aspek lain yang penting dipertimbangkan adalah kompatibilitas boiler akibat skenario pemanfaatan tersebut baik jangka pendek maupun panjang. Untuk itu dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian dan penentuan kondisi optimum operasi boiler pipa api menggunakan campuran bahan bakar biodiesel minyak solar pada masing-masing skema pencampuran (sesuai mandatori) untuk menemukan mekanisme yang paling tepat untuk memperoleh manfaat penurunan emisi yang maksimal dan kinerja boiler yang optimal.

## **1.2. Tujuan Khusus**

Secara khusus tujuan penelitian ini adalah :

- a. Menentukan kondisi optimum dari operasi pembakaran campuran biodiesel-minyak diesel pada boiler dengan variasi komposisi pencampuran, udara pembakaran dan temperatur bahan bakar.
- b. Menguji penggunaan kondisi optimum yang diperoleh untuk mengetahui efek terhadap penurunan emisi dan kinerja boiler (efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar).

## **1.3. Urgensi Penelitian**

Hasil pengujian pada kebanyakan mesin diesel dan boiler menunjukkan bahwa pada satu sisi penggunaan biodiesel mampu memberikan efek penurunan emisi terutama pada parameter SO<sub>2</sub>, PM, CO dan HC, namun sebaliknya menunjukkan kecenderungan peningkatan terhadap emisi NO<sub>x</sub> [Xue et al., 2011; Um and Park, 2009 ; Miller, 2008]. Perbedaan komposisi penyusun biodiesel akibat perbedaan bahan baku dapat mempengaruhi karakteristik dan kuantitas emisi yang dihasilkan. Selain itu penyesuaian parameter operasi pembakaran dapat mempengaruhi kinerja operasi mesin dan emisi yang dihasilkan.

Biodiesel memiliki beberapa karakteristik yang disinyalir dapat mempengaruhi penurunan kinerja mesin, diantaranya viskositas dan densitas yang lebih tinggi serta nilai kalor yang lebih rendah, dibandingkan minyak solar. Tingginya viskositas dan densitas dapat mempengaruhi tahapan injeksi bahan bakar, atomisasi dan turbulensi dengan udara dalam reaksi pembakaran. Selain itu nilai kalor yang rendah hampir selalu berpengaruh terhadap peningkatan konsumsi bahan bakar. Biodiesel juga memiliki sifat pelumasan yang tinggi, sehingga pada satu kondisi dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan pada komponen mesin yang mempengaruhi pola pemeliharaan dan umur operasi mesin.

Mandatori pemerintah tentang pemanfaatan bahan bakar nabati, telah dipertegas dengan diberlakukannya Permen ESDM No. 25 tahun 2013. Dalam peraturan ini dinyatakan bahwa pentahapan penggunaan biodiesel terus ditingkatkan sampai 25% pada tahun 2025. Untuk merespon aturan ini, salah satu faktor utama yang penting diperhatikan bagi pengguna boiler atau mesin diesel lainnya adalah kompatibilitas mesin. Selain itu, hingga saat ini belum ada industri manufaktur boiler yang mengeluarkan garansi terhadap daya tahan dan kinerja boiler berbahan bakar minyak dengan campuran biodiesel pada tingkat tertentu.

Untuk itu penelitian ini diselenggarakan agar diperoleh kondisi optimum dalam pengoperasian boiler berbahan bakar biodiesel, serta mendapatkan mekanisme penyesuaian teknis atau modifikasi teknik yang diperlukan pada boiler dalam rangka mengantisipasi efek negatif yang mungkin timbul (penurunan kinerja) namun tetap mengoptimalkan potensi penggunaan biodiesel terutama dalam hal penurunan emisi.

## BAB II

### STUDI PUSTAKA

#### 2.1. Karakteristik Biodiesel

Potensi penggunaan biodiesel pada boiler sangat besar, karena biodiesel memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan minyak diesel (solar). Biodiesel diproduksi dari bahan baku nabati (dan hewani), sehingga bebas dari kandungan sulfur, senyawa aromatik, logam mineral dan residu. Praktis, hal ini akan menghasilkan emisi yang jauh lebih rendah. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa makin besar prosentase biodiesel dalam campuran, akan meningkatkan prosentase penurunan emisi CO, SO<sub>2</sub>, partikulat, hidrokarbon dan opasitas (Lapuerta *et al.*, 2008; Miller, 2008; Jaichandar & Annamalai, 2011; Xue *et al.*, 2011; Ghorbani, 2011), namun kecenderungan efek ini inkonsisten terhadap emisi NO<sub>x</sub>. Sebagian peneliti menyebutkan bahwa sifat oksigenatif yang dimiliki biodiesel mempengaruhi peningkatan emisi NO<sub>x</sub>, namun disisi lain dijelaskan bahwa pembentukan polutan NO<sub>x</sub> lebih dipengaruhi pada kondisi operasi pembakaran (Hansen, 2008; Mantari dan Jafaar, 2009; Avecedo dan Mantilla, 2011). Meskipun masih ditemukan perbedaan pada hasil-hasil penelitian, pengujian biodiesel pada boiler menunjukkan kecenderungan emisi NO<sub>x</sub> yang cenderung lebih rendah dibandingkan minyak diesel (Miller, 2008; Hosseini, 2010; Ghorbani, 2011; Makaire *et al.*, 2011).

Karena diproduksi melalui reaksi trans-esterifikasi, biodiesel memiliki kadar oksigen yang sehingga mampu mempromosikan pembakaran sempurna, (Lapuerta, 2008; Dincer, 2008; Nagi, 2008). Sifat ini dapat meningkatkan homogenitas oksigen dalam pembakaran sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran (Demirbas, 2008). Selain itu biodiesel memiliki angka setana yang jauh lebih tinggi, sehingga berpengaruh pada waktu tunda penyalaan, hal ini dapat mempercepat waktu pembakaran (Ismail *et al.*, 2011); Boyd, 2007; Sivaramakrishnan, 2012). Untuk kepentingan penyimpanan dan transportasi, biodiesel aman digunakan karena memiliki titik nyala (flash point) yang lebih tinggi. Keuntungan lain adalah biodiesel memiliki sifat pelumasan yang hebat sehingga mampu menekan *friction loss* dan mencegah pembentukan deposit karbon dan pembentukan kerak (Lapuerta, 2008; Xue *et al.*, 2011; da Silva, 2011).

Dibalik sejumlah fakta menguntungkan, biodiesel memiliki beberapa sifat fisik yang dianggap merugikan, diantaranya memiliki kandungan energi yang lebih rendah, kurang stabil, dan memiliki viskositas dan tegangan muka (surface tension) yang lebih tinggi dibandingkan minyak diesel. Dalam aplikasi pada mesin diesel, viskositas dan densitas sangat signifikan mempengaruhi atomisasi dan evaporasi partikel bahan bakar, sehingga dapat mempengaruhi perilaku pembakaran di ruang bakar (Yoon, 2008 ; Boyd, 2007; Dobovisek, *et al.*, 2009). Viskositas bahan bakar yang lebih tinggi dapat menyulitkan proses atomisasi bahan bakar, sehingga berakibat pada penurunan daya mesin. Daya mesin yang lebih rendah dapat menyebabkan penurunan efisiensi termal mesin (Xue *et al.*, 2011; Ismail *et al.*, 2011 ; Um dan Park, 2009).

Dilain pihak, karena mengandung oksigen, biodiesel memiliki nilai kalor yang 5-13% lebih rendah dibandingkan minyak solar, sehingga bila diaplikasikan pada sistem bahan bakar, lebih banyak massa bahan bakar yang diinjeksikan untuk mencapai stoikiometri pembakaran sehingga berpengaruh pada peningkatan konsumsi bahan bakar (Miller, 2008 ; Lapuerta *et al.*, 2008; Xue *et al.*, 2011; Tesfa *et al.*, 2011; Sivasami *et al.*, 2012).

Sebagian peneliti menyatakan bahwa sifat lubrikasi biodiesel yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya penyumbatan pada saringan bahan bakar dan terjadinya injector coking, sehingga berdampak negatif bagi daya tahan mesin (Parsons, 2007; Okamoto, 2010). Namun sebagian peneliti lain menyatakan bahwa pada prosentase pencampuran yang rendah, penggunaan biodiesel dapat mengurangi terbentuknya deposit karbon dan mempersingkat frekuensi perawatan mesin (Sinha dan Agarwal, 2010 ; Xue *et al.*, 2011).

Minyak sawit merupakan bahan baku pembuatan biodiesel yang paling potensial dikembangkan Indonesia. Dibandingkan sumber bahan nabati lainnya, minyak sawit memiliki komposisi molekular yang khusus, karena memiliki rantai karbon ikatan tunggal tak jenuh (C18, C>18) yang lebih dominan (Boyd, 2007). Biodiesel sawit menunjukkan angka setana, viskositas dan densitas yang lebih tinggi, dan nilai kalor yang relatif lebih rendah (Nagi, 2008; Wirawan *et al.*, 2008; Jaichandar, 2011). Menurut Yang *et al.* (2012) pembakaran biodiesel sawit pada mesin diesel menunjukkan kesetimbangan kimia dengan temperatur adiabatik yang lebih rendah dibandingkan biodiesel dari bahan nabati lainnya

dan dibandingkan petrodiesel, sehingga berpotensi menghasilkan emisi NO<sub>x</sub> yang lebih rendah (Debnath, 2011; Yang, *et al.*, 2012).

Sifat fisik dan kimia biodiesel sangat dipengaruhi oleh proses produksi dan sifat yang dibawa oleh bahan bakunya. Fitur struktural bahan nabati ditentukan oleh panjang rantai, tingkat saturasi dan keberadaan rantai cabang. Sifat ini menentukan sejumlah karakter biodiesel diantaranya angka Setana, viskositas, panas pembakaran, stabilitas oksidatif, lubrisitas, dll (Dermirbas, 2008; de Silva, 2011; Sivaramakrishnan dan Ravikumar, 2012). Analisis biodiesel dari minyak sawit menunjukkan bahwa kandungan asam lemak terdiri dari gugus C16 dan C18 yang berarti rantai hidrokarbon panjang mendominasi struktur molekul biodiesel dibandingkan rantai bercabang (Komariah *et al.*, 2013). Akibatnya biodiesel sawit lebih mudah teroksidasi dan menunjukkan perilaku pembakaran yang lebih baik.

## **2.2. Aplikasi Biodiesel pada mesin diesel**

Biodiesel dapat diaplikasikan pada mesin pembakaran dengan atau tanpa modifikasi, tergantung pada beberapa kondisi. Pada persentase pencampuran yang rendah, biodiesel dapat diaplikasikan pada mesin dengan sedikit bahkan tanpa modifikasi (Wirawan *et al.*, 2009; Jaichandar dan Annamalai, 2011; Avecedo dan Mantila, 2011).

Deepanraj *et al.* (2011) menguji mesin diesel 4 tak dengan bahan bakar biodiesel dari minyak sawit, hasilnya menunjukkan bahwa campuran biodiesel dan minyak diesel antara 20-40% dapat digunakan tanpa modifikasi mesin. Penggunaan biodiesel menunjukkan emisi hidrokarbon dan karbon monoksida yang lebih rendah, namun menunjukkan emisi NO<sub>x</sub> yang lebih tinggi. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel dalam komposisi pencampuran yang rendah, dapat meningkatkan efisiensi termal, namun menyebabkan peningkatan temperatur gas buang dan konsumsi bahan bakar.

Umumnya efek terhadap kinerja mesin berbahan bakar biodiesel diuji berdasarkan variasi beban kerja, seperti yang dilakukan Rao (2011), Sivasami *et al.*, (2012), Rahim *et al.*, (2012). Hasil penelitian tersebut menunjukkan peningkatan beban mesin, berpengaruh pada peningkatan pembentukan emisi NO<sub>x</sub>. Peningkatan beban kerja mesin menyebabkan

emisi NO<sub>x</sub> semakin meningkat. Yadav *et al.*, (2010) menggunakan biodiesel dari asam lemak sawit, dan menyatakan bahwa B40 dapat digunakan tanpa modifikasi. Kecenderungan efek terhadap efisiensi termal, emisi CO, hidrokarbon semakin berkurang dengan bertambahnya kandungan biodiesel dalam bahan bakar.

Dilain pihak, Wirawan, *et al.*, (2008) menguji biodiesel sawit pada mesin kendaraan, menunjukkan emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan dari pembakaran biodiesel dan atau campuran biodiesel-minyak diesel relatif lebih rendah dibandingkan minyak diesel, hal ini disebabkan oleh tingginya cetane number dan viskositas yang lebih rendah.

Pohit *et al.*, (2013) melakukan kajian eksperimental untuk menentukan campuran optimum bagi biodiesel dari minyak keranji untuk mencapai performa mesin yang optimum dengan memvariasikan beban dan rasio kompresi. Metode statistik kombinasi Grey-Taguchi dipilih untuk memvalidasi data eksperimen. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa B50 merupakan komposisi campuran yang optimum, sementara kondisi optimum lainnya tercapai pada rasio kompresi 17 dan beban mesin 80%.

Xue *et al.*, (2011) mengkompilasi beberapa hasil penelitian yang menguji penggunaan biodiesel pada mesin diesel, menyimpulkan bahwa emisi polutan CO, PM, SO<sub>2</sub>, HC, dan CO<sub>2</sub> berkurang dan profilnya semakin menurun dengan bertambahnya kandungan biodiesel dalam bahan bakar. Sedangkan konsumsi bahan bakar dan daya mesin cenderung lebih rendah dibandingkan penggunaan minyak diesel, namun pengaruhnya tidak signifikan pada tingkat campuran biodiesel yang lebih rendah. Untuk mengantisipasi efek penurunan daya mesin dan peningkatan konsumsi bahan bakar, penggunaan *turbocharged engine* atau mesin dengan pelepasan panas yang rendah serta penyesuaian kondisi operasi mesin berhasil memberikan efek yang lebih baik.

Gordon dan Mastorakos (2011) meneliti sifat *autoignition* biodiesel dan hubungannya dengan efek kecepatan fluktuasi dan skala panjang, ukuran droplet, kecepatan udara dan temperatur. Penelitian ini menggunakan tube berlapis jaket, yang dirangkai dengan nozzle pada sistem burner, alat ini dilengkapi dengan termokopel serta instrumen kontrol atas kondisi turbulen dan laju udara. Untuk mendapatkan visualisasi droplet, ditempatkan kamera dengan tingkat resolusi tinggi. Hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan laju udara dan penurunan temperatur akan meningkatkan waktu pengapian, sebaliknya ukuran droplet yang kecil dapat menurunkan waktu pengapian.

Kesimpulan penelitian ini adalah bahwa minyak diesel memiliki waktu pengapian yang lebih lambat dibanding biodiesel.

Rahim, *et al.*, (2012) membuat simulasi menggunakan metode numerik dengan software GT-Power untuk menguji efek penggunaan B5 pada mesin diesel. Simulasi dikerjakan pada kondisi beban penuh dengan variasi temperatur bahan bakar dan kecepatan mesin. Hasil penelitian ini adalah temperatur bahan bakar yang lebih tinggi menyebabkan tekanan injeksi yang lebih besar sehingga mempersingkat waktu tunda penyalaan (*ignition delay*). Selain itu dilaporkan bahwa peningkatan temperatur bahan bakar dapat meningkatkan kandungan energi sehingga menghasilkan *brake specific fuel consumption* (BSFC) yang lebih rendah sesuai yang diharapkan.

Gowthaman *et al.*, (2012) menguji biodiesel dari bijih kapas pada mesin diesel *direct engine* menggunakan teknologi Scr, mereka menyimpulkan bahwa konsumsi bahan bakar meningkat seiring dengan bertambahnya persentase biodiesel, diakibatkan oleh lebih rendahnya nilai kalor biodiesel. Sedangkan efisiensi termal biodiesel dan campurannya dinyatakan sedikit lebih tinggi dibandingkan minyak solar pada semua kondisi beban mesin.

Yang *et al.*, (2012) mempelajari fenomena pembakaran biodiesel dari rapeseed oil menggunakan pendekatan mekanisme reaksi pembakaran dan pemodelan kesetimbangan dan kinetika kimia. Pendekatan ini dilakukan dengan teknik komputasi menggunakan software aplikasi KIVA-3V dan CFD untuk menjelaskan fenomena peningkatan emisi NO<sub>x</sub> dari pembakaran biodiesel. Dilaporkan bahwa pembakaran biodiesel lebih efektif terjadi dalam kondisi lebih sedikit oksigen.

Prilaku pembakaran biodiesel dari soybean oil dalam prosentase 20% campuran dipelajari oleh Nagaraju, *et al.* (2008) pada serangkaian tes pada mesin diesel. Mereka menggunakan parameter Apparent Rate Heat release (ARHR) untuk mengetahui pengaruh penggunaan B20 terhadap sifat *autoignition* dan pembakaran biodiesel. Hasilnya menyatakan bahwa B20 menunjukkan penundaan penyalaan yang 29% lebih rendah dibandingkan pembakaran minyak diesel. Dalam penelitian ini dilaporkan hubungan kondisi tahap awal pembakaran (*penyemprotan* dan *evaporasi* bahan bakar) menentukan peningkatan atau penurunan emisi. Nagaraju *et al.*, melaporkan emisi NO<sub>x</sub> akibat

pembakaran B20 lebih rendah dibandingkan minyak diesel, demikian pula terhadap polutan lainnya.

Um dan Park (2009) menyelenggarakan studi numerik mengenai efek rasio pencampuran biodiesel terhadap karakteristik emisi dan perilaku pembakaran pada mesin diesel HCCI (*homogeneous charge compression ignition*) menggunakan simulasi KIVA-chemkin chemistry solver. Variabel proses yang diuji adalah rasio pencampuran dan rasio ekivalen. Hasil penelitian ini menunjukkan waktu tunda penyalaan biodiesel lebih singkat dikarenakan tingginya angka setana, sementara, emisi CO cenderung turun karena rasio ekivalen yang rendah, dan NO<sub>x</sub> meningkat akibat waktu penyalaan yang singkat.

### **2.3. Uji Emisi dan Kinerja pada Boiler**

Efek terhadap emisi dan efisiensi boiler dengan bahan bakar biodiesel dari soybean dan minyak hewan diselenggarakan Miller (2008) pada dua jenis boiler skala residensial dan komersial. Pengukuran emisi di cerobong menggunakan Continuous Emission Monitoring System (CEMS). Hasil analisa emisi menunjukkan penurunan emisi SO<sub>2</sub>, PM dan hidrokarbon, sedangkan konsentrasi CO dan NO<sub>x</sub> terdeteksi lebih tinggi dari minyak diesel. Evaluasi terhadap efisiensi thermal boiler dilakukan berdasarkan besaran energi input masing-masing bahan bakar. Sesuai dengan nilai energinya, efisiensi boiler berbahan bakar biodiesel dari minyak hewan lebih tinggi dibandingkan minyak diesel, sedangkan efisiensi boiler berbahan bakar biodiesel dari minyak kedelai lebih rendah dibandingkan minyak diesel.

Sementara itu, Komariah *et al.* (2013) menggunakan biodiesel dari minyak sawit dan menguji penggunaannya pada boiler pipa api pada kondisi operasi yang sama dengan penggunaan minyak solar (business as usual), dinyatakan bahwa emisi CO<sub>2</sub> cenderung lebih tinggi dan emisi NO<sub>x</sub> cenderung lebih rendah 10,27% dibanding penggunaan minyak solar. Hal ini disebabkan karena karakteristik biodiesel sawit menyebabkan ignition delay yang lebih singkat dan temperatur pembakaran yang lebih rendah.

Valdman *et al.* (2011) mengembangkan metode pengukuran emisi pada boiler industri yang menggunakan bahan bakar campuran biodiesel-minyak diesel. Penelitian ini menggunakan sistem SCADA yang terkoneksi dengan gas analyzer. Sistem ini

memungkinkan pengukuran pada variable proses kontinyu seperti temperatur bahan bakar, level tanki bahan bakar, temperature air umpan, laju alir dan level tanki air umpan, laju alir dan tekanan steam serta temperatur gas buang. Hasil penelitian ini merekomendasikan sistem sensor *monitoring* berbasis on line dapat digunakan untuk memantau sistem bahan bakar, sistem air umpan dan steam, serta gas buang pada boiler industri berbahan bakar biodiesel dan campuran dengan minyak diesel.

Ghorbani *et al.* (2011) melakukan menguji penggunaan biodiesel dari soybean dan sunflower pada sebuah boiler eksperimental dengan variasi pencampuran dengan minyak diesel antara 10-80%. Rekayasa teknis dilakukan terhadap tekanan pompa bahan bakar (level energi) dan laju alir udara masuk (fan damper number). Hasil penelitian ini. menunjukkan bahwa pada tingkat energi yang rendah, efisiensi pembakaran dan emisi cenderung lebih rendah dibandingkan pada minyak diesel. Makin meningkat laju udara masuk, menyebabkan efisiensi pembakaran turun, dan berpengaruh pada peningkatan emisi CO dan penurunan emisi CO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>.

Makaire *et al.* (2011) mengkompilasi hasil pengujian beberapa jenis biodiesel pada sistem pemanas konvensional (boiler) melalui pendekatan analisis sifat fisik bahan bakar biodiesel berdasarkan jenis bahan bakunya, antara lain rapeseed, soybean, sunflower, jagung, jarak pagar dan bahan bakar Fischer-Tropsch. Menurut penelitian ini, karena terdapat kemiripan karakteristik biodiesel dengan bahan bakar petrodiesel, pada campuran kurang dari 50% biodiesel dapat digunakan pada sistem burner tanpa modifikasi.

Dengan target efisiensi maksimum dan emisi minimum, Veski *et al.* (2002) melakukan penelitian pada boiler berbahan bakar biomassa dengan mengubah kondisi operasi pembakaran melalui parameter rasio udara. Analisa emisi yang berhubungan dengan penelitian ini difokuskan pada pembentukan CO, CO<sub>2</sub> dan *soot formation*. Veski *et al.* (2002) menyimpulkan bahwa rasio udara optimum adalah rasio udara yang menunjukkan fluksi panas pengapian yang paling maksimum.

## **BAB III**

### **PETA JALAN PENELITIAN**

#### **3.1. Penelitian Pendahuluan**

Penelitian ini didahului oleh beberapa kajian literatur dan eksperimental, antara lain :

##### **a. Karakterisasi dan Kuantifikasi Emisi dari Pembakaran Biodiesel Sawit pada Boiler**

Penelitian ini menguji pembakaran campuran biodiesel dan minyak solar dengan variasi komposisi pencampuran 10-30%, pada boiler pipa api dengan tekanan operasi 3 bar. Emisi gas buang di cerobong diukur menggunakan gas analyzer. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hingga pencampuran biodiesel sebanyak 30% dalam campuran bahan bakar, boiler dapat digunakan tanpa modifikasi. Parameter emisi yang diukur adalah CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>2</sub>. Diketahui, tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada komposisi CO dalam gas buang, dibandingkan pada pembakaran dengan minyak solar. Emisi SO<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> menurun seiring dengan meningkatnya kandungan biodiesel. Pada penggunaan B10 dan B20, emisi NO<sub>x</sub> jauh lebih rendah dibandingkan pembakaran dengan minyak solar.

##### **b. Faktor Emisi Pembakaran Biodiesel pada Boiler**

Penelitian ini telah menghasilkan artikel yang telah diseminarkan pada Asia-Pacific Forum on Renewable Energy di Jeju Island Korea Selatan, November 2012 dengan judul artikel “Emission Factors of Biodiesel Combustion in Industrial Boiler; A Comparison to Fossil Fuel”. Artikel telah dimuat pada Journal of Renewable and Sustainable Energy Vol 5, No. 052005 tahun 2013 (doi: 10.1063/1.4822036). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor emisi boiler berbahan bakar biodiesel dapat ditentukan melalui analisis bahan bakar dan neraca massa dilengkapi dengan hasil pengukuran langsung (stack sampling). Dalam penentuan kuantifikasi emisi, metode pengukuran langsung harus mempertimbangkan kondisi operasi pembakaran, jenis dan tipe boiler serta kondisi mesin.

**c. Efek Penggunaan Biodiesel pada Boiler Pipa Api terhadap Konsumsi Bahan bakar**

Penelitian ini telah menghasilkan artikel yang telah diseminarkan pada International Conference on Advances in Mechanics Engineering (ICAME 2013) dan artikel berjudul “Effects of Palm Biodiesel Blends on Fuel Consumption in Fire Tube Boiler” telah di muat pada International Journal of Applied Mechanics and Materials Vol. 391 (2013) pp 93-97 (doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.391.93). Penelitian ini mengkaji pengaruh karakteristik campuran biodiesel-minyak solar, terutama parameter viskositas, nilai kalor dan cetane number, terhadap konsumsi bahan bakar. Diketahui bahwa makin banyak kandungan biodiesel pada campuran bahan bakar, konsumsi bahan bakar cenderung meningkat sampai 17% lebih tinggi.

**3.2. Peta Jalan Penelitian**

Penelitian ini merupakan satu bagian penting dalam peta jalan penelitian yang dirumuskan dibawah ini.

<b>MARKET/POLICY</b>			ANALISIS EKONOMI TEKNIK DAN LINGKUNGAN (COST OF UTILIZATION)	INSTRUMEN KEBIJAKAN ENERGI TERBARUKAN & KEBIJAKAN LINGKUNGAN
<b>PRODUCT</b>	POTENSI PENGEMBANGAN PEMANFAATAN BIODIESEL	REKOMENDASI PENGGUNAAN BIODIESEL PADA BOILER	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OPTIMUM BLENDING &amp; REKAYASA SISTEM BAHAN BAKAR</li> <li>• SISTEM MODIFIKASI BOILER</li> </ul>	SKENARIO PEMANFAATAN BIODIESEL PADA BOILER
<b>METHODS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• INVENTORI</li> <li>• ANALISIS BAHAN BAKAR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PENGUJIAN BIODIESEL PADA BOILER PILOT PLANT</li> <li>• ANALISA BAHAN BAKAR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• REKAYASA PEMBAKARAN &amp; SISTEM BAHAN BAKAR</li> <li>• EVALUASI TEKNIS ATAS KINERJA &amp; DAYA TAHAN BOILER</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SIMULASI EKONOMI</li> </ul>
<b>RESEARCH &amp; DEVELOPMENT</b>	PELUANG PENGGUNAAN BIODIESEL PADA BOILER INDUSTRI	KUANTIFIKASI DAN PENGENDALIAN EMISI	ANTISIPASI DAMPAK TEKNIS PEMANFAATAN BIODIESEL PADA BOILER	
	KARAKTERISASI BIODIESEL SAWIT DAN CAMPURAN BIODIESEL- SOLAR	EVALUASI KINERJA BOILER BERBAHAN BAKAR BIODIESEL	PENENTUAN KONDISI OPTIMUM PEMBAKARAN BIODIESEL	KAJIAN EKONOMI TEKNIK DAN EKONOMI LINGKUNGAN
	<b>2011</b>	<b>2012-2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>

## **BAB IV**

### **MANFAAT PENELITIAN**

Dalam mendukung kebijakan nasional dibidang energi, target pencapaian energi mix 2025 yang berupaya menekan konsumsi energi fosil, penelitian ini secara jelas mendukung upaya peningkatan pemanfaatan energi baru dan terbarukan melalui optimalisasi pemanfaatan biodiesel khususnya pada boiler industri dan komersial. Bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, penelitian ini bermanfaat dalam memperkaya referensi dalam pengembangan ilmu rekayasa pembakaran, teknik reaksi kimia dan teknik mesin, serta teknologi pengendalian emisi.

Luaran yang ditargetkan dari penelitian ini adalah menghasilkan rancangan sistem penggunaan biodiesel pada boiler industri dan komersial, untuk kemudian terdokumentasi pada artikel ilmiah yang dipublikasikan pada jurnal internasional. Lebih lanjut, penelitian ini akan disertai kajian analisis ekonomi teknik dan ekonomi lingkungan, yang pada gilirannya dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pengguna boiler berbahan bakar minyak (khususnya dari sektor industri dan komersial), serta menjadi referensi bagi pemerintah untuk merumuskan regulasi dan atau kebijakan lingkungan dan kebijakan energi, khususnya yang berkaitan dengan pengendalian emisi sumber tidak bergerak dan kebijakan pemanfaatan bahan bakar nabati.

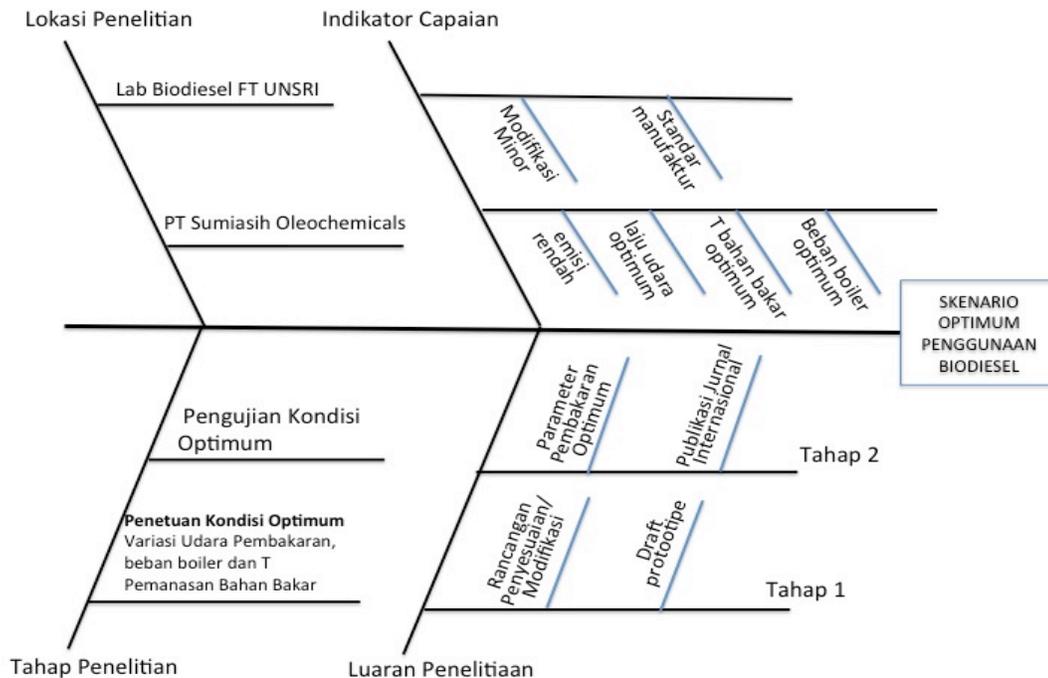
# BAB V

## METODE PENELITIAN

### 5.1. Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah boiler pipa api (fire-tube) berbentuk tipe silinder vertikal yang digunakan pada pilot plant Biodiesel Universitas Sriwijaya. Boiler beroperasi pada tekanan disain 3 bar dengan kapasitas panas 60.000 kkal/jam. Untuk mengevaluasi gas buang, digunakan portable gas analyzer, sistem pitot-manometer untuk mengukur laju alir, serta flowmeter minyak dan steam. Untuk mengevaluasi perilaku pembakaran pada boiler ditempatkan thermocouple pada ruang bakar dan cerobong boiler. Untuk keperluan analisa campuran bahan bakar, akan digunakan gas chromatography, bomb calorimeter, water content, flash point, carbon residue, dll.

Bahan bakar yang digunakan adalah biodiesel dari minyak sawit (CPO) dan untuk membentuk bahan bakar campuran, digunakan minyak diesel (Industrial Diesel Oil) dari Refinery Unit (RU-III) PT. PERTAMINA.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## **5.2. Prosedur Penelitian**

### **5.2.1. Penentuan Kondisi Optimum Operasi Boiler**

Untuk pengujian masing-masing campuran bahan bakar dengan porsi biodiesel sebanyak 5-25%, boiler pipa api akan dioperasikan selama 1 (satu) jam terhitung setelah kondisi boiler *steady*. Gas Analyzer dikoneksikan pada bagian ujung cerobong boiler untuk pembacaan komposisi CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> dan sisa O<sub>2</sub> pada gas buang. Pengukuran temperatur pada main body boiler, combustion chamber, pangkal cerobong dan ujung cerobong dipantau melalui *temperature indicator*. Laju konsumsi bahan bakar diukur melalui pembacaan flow meter, bersamaan dengan pemantauan temperatur dan laju alir pada aliran air umpan dan steam. Pengambilan data dilakukan setiap 10 menit. Efisiensi boiler dikalkulasi dengan pendekatan perbandingan energi bahan bakar dan energi yang dihasilkan pada steam. Selain itu perlu dilakukan pencatatan terhadap setiap respon yang diberikan sistem pengendali otomatis pada boiler, khususnya yang menyangkut water level, safety valve, pressure gauge, dll.

#### **a. Pengaruh jumlah udara berlebih**

Pada tahap ini, masing-masing sampel bahan bakar diuji pada boiler dengan memanipulasi salah satu bagian dalam burner yaitu fan damper scale. Variasi bukaan kipas udara (fan dumper number) ditentukan pada interval skala 3,5 – 5,0. Interval ini ditentukan melalui uji coba operasi boiler (fase start up) selama masing-masing 20 menit, dengan indikator sistem otomatis pada boiler. Pada interval kurang dari skala 3,5 atau diatas 5,0, sistem boiler akan automatically shutdown atau beroperasi beberapa menit, dengan bunyi mesin yang tidak smooth dan menghasilkan asap pada cerobong yang pekat. Masing-masing variabel terhadap skala fan damper, dilakukan pengukuran pada prosentase CO, CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> pada aliran gas buang. Skala fan damper yang optimum ditentukan berdasarkan kandungan CO dan O<sub>2</sub> yang paling rendah atau CO<sub>2</sub> yang paling tinggi. Udara

ekses optimum dapat dihitung berdasarkan neraca massa stoikimetri dan dikonfrontir dengan hasil pengukuran melalui gas analyzer.

**b. Pengaruh temperatur bahan bakar**

Setiap sampel bahan bakar dimasukkan pada tanki bahan bakar yang terkoneksi dengan heater dan termokopel otomatis untuk memanaskan campuran bahan bakar. Variasi temperatur pemanasan adalah tanpa pemanasan (32-36 °C), 50 °C., 60 °C dan 70°C. Pada tahap ini laju udara pembakaran (pengaturan fan damper number) ditetapkan konstan dalam setiap tempuhan, sesuai dengan hasil optimum tahap sebelumnya untuk setiap komposisi campuran bahan bakar. Secara visual, pada tahap ini dilakukan pengamatan perubahan pada filter solar dan kondisi fisik selang bahan bakar. Temperatur bahan bakar optimum adalah yang menunjukkan efek penurunan emisi yang lebih besar, konsumsi bahan bakar yang lebih rendah serta efisiensi boiler yang maksimal.

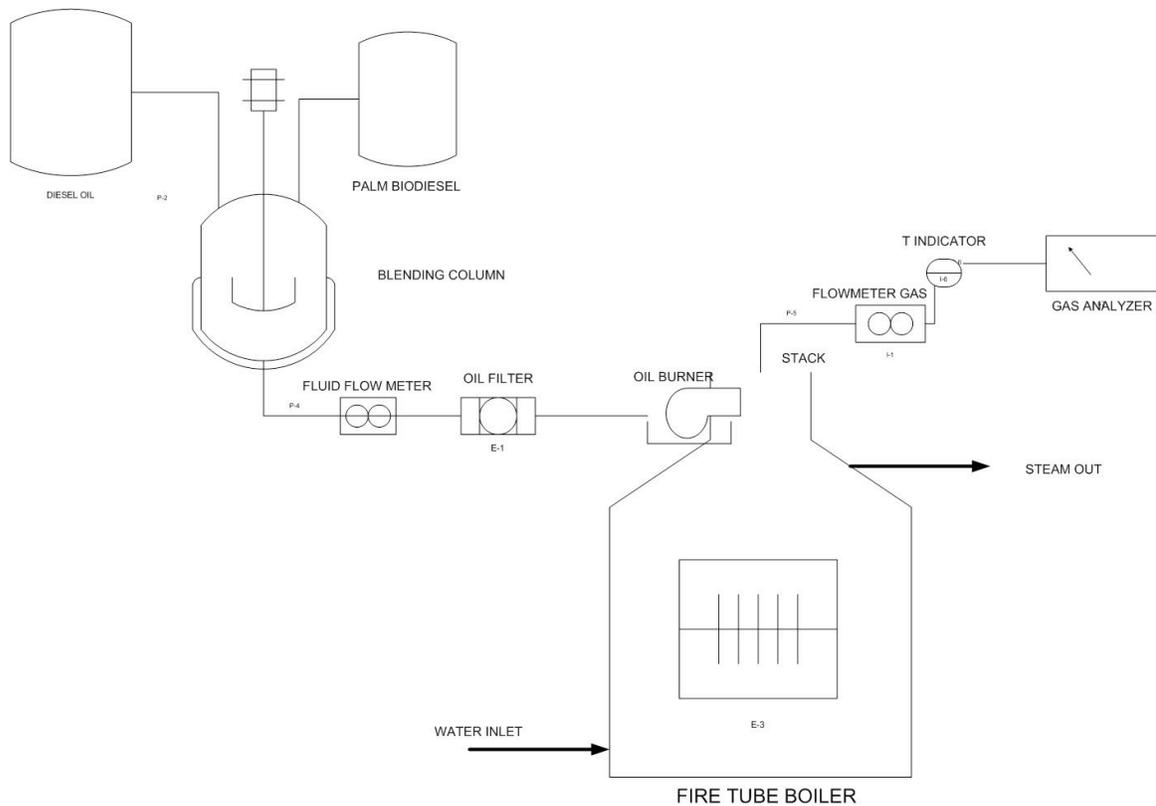
**c. Pengaruh Model Operasi Beban Boiler**

Pengendalian proses pembakaran pada boiler dalam tahap ini akan dilakukan dengan mengatur derajat katup control valve yang terdapat pada aliran steam di steam header sebelum dikirim ke unit pengguna (pabrik). Variasi bukaan control valve diatur pada bukaan separuh (45°), bukaan  $\frac{3}{4}$  atau (67°) dan atau bukaan penuh (90°). Pengujian atas pengaruh variabel ini akan diukur melalui efisiensi boiler, konsumsi bahan bakar dan komposisi dan temperatur gas buang di cerobong.

**5.2.2. Pengujian Kondisi Optimum**

Kondisi optimum yang diperoleh dari tahapan penelitian sebelumnya meliputi rasio udara, temperatur pemanasan, dan mode beban operasi boiler di ujicobakan pada boiler pipa api untuk semua variasi komposisi pencampuran bahan bakar biodiesel, yaitu B5, B10, B20, B30 dan B100. Pada tahap awal, dilakukan *total cleaning* terhadap boiler, disertai pengamatan terhadap kondisi filter solar, dan dinding silinder ruang bakar. Untuk masing-masing tempuhan, boiler dioperasikan selama 60 menit (1 jam) setelah kondisi

steady dalam *setpoint* tekanan disain tercapai. Pengaturan (fan) throttling dampers pada sistem burner, dilakukan untuk set udara pembakaran sesuai kondisi optimum yang diperoleh sebelumnya. Pengukuran temperatur di ruang bakar dan cerobong, dilakukan setiap 10 menit, bersamaan dengan pencatatan data komposisi gas buang pada *gas analyzer* (meliputi parameter emisi CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HC dan soot). Efisiensi boiler akan dievaluasi dengan pendekatan perhitungan langsung dan tidak langsung dengan mempertimbangkan potensi kehilangan panas.



Gambar 2. Rangkaian Peralatan Penelitian

## BAB VI

### HASIL YANG DICAPAI

#### 6.1. Analisa Campuran Biodiesel-Minyak Solar

Pencampuran bahan bakar dilakukan dengan metoda *splash blending*, yaitu dengan menambahkan biodiesel diatas minyak solar. Pengadukan diperlukan untuk menjamin homogenitasnya terutama pada porsi pencampuran biodiesel lebih dari 10%. Hasil analisa campuran minyak solar-biodiesel dilakukan dengan analisa sampel campuran bahan bakar seperti di tunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 6.1. Karakteristik Campuran Bahan Bakar Biodiesel-Minyak Solar

parameter	satuan	B0	B5	B10	B20	B25	B100
viskositas, @40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,96	3,06	3,15	3,34	3,43	4,52
densitas, @15°C	kg/m <sup>3</sup>	822,4	824,40	824,10	826,40	828,61	874,80
<i>calorific value</i>	MJ/lb	46,8	44,507	44,121	43,585	43,388	39,45
<i>water content</i>	mg/kg	266	288	304	333	317	430,0
<i>cetane number</i>	-	47,4	49,52	54,91	57,50	58,45	67,2

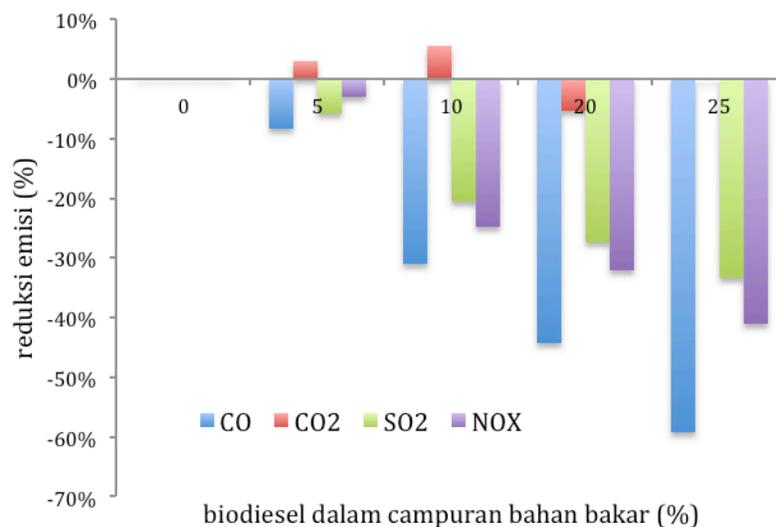
Seperti pada umumnya pencampuran biodiesel-minyak solar, viskositas, densitas, kandungan air, *flash point* dan *cetane number* campuran meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan biodiesel dalam campuran bahan bakar. Sebaliknya nilai kalor dan kandungan karbon residu semakin berkurang.

#### 6.2 Efek penggunaan campuran biodiesel - minyak solar pada boiler pipa api

##### 6.2.1 Efek penggunaan campuran biodiesel-minyak solar terhadap emisi boiler

Evaluasi terhadap emisi gas buang merupakan langkah penting dari setiap operasi pembakaran. Jenis dan sifat fisika dan kimia bahan bakar memberi pengaruh besar terhadap kuantitas dan kualitas emisi. Penggunaan campuran biodiesel-minyak solar sebagai bahan bakar boiler menunjukkan reduksi emisi yang signifikan. Parameter emisi yang dikaji dalam studi ini adalah CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> dan CO. Besarnya reduksi emisi dari masing-masing polutan ditunjukkan pada Gambar 4.1

Emisi boiler atas parameter CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>2</sub> berkurang secara linier seiring dengan bertambahnya kandungan biodiesel dalam campuran bahan bakar. Hasil uji statistik menggunakan SPSS 18 membuktikan bahwa penambahan porsi biodiesel dalam campuran bahan bakar menunjukkan efek yang berbeda nyata terhadap emisi CO, NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> dengan tingkat signifikansi 95%. Persen pencampuran biodiesel tidak berpengaruh secara nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub>.

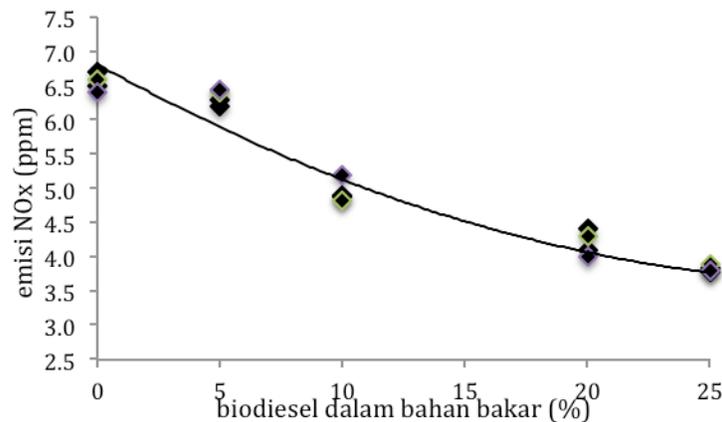


Gambar 6.1. Perubahan emisi dari penggunaan biodiesel pada boiler pipa api

Untuk jumlah udara pembakaran yang sama, penambahan porsi biodiesel dalam campuran bahan bakar berasosiasi dengan peningkatan jumlah oksigen dalam campuran udara dan bahan bakar di ruang bakar sehingga mampu mempromosikan pembakaran lebih sempurna.

### 6.2.1.1 Emisi NOx

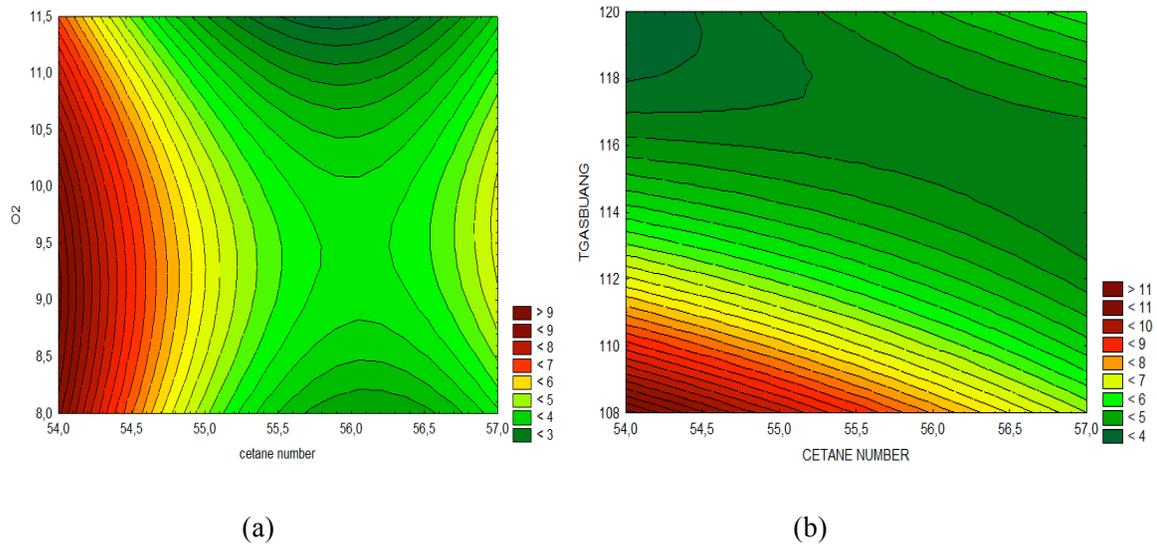
Hasil pengujian penggunaan biodiesel pada mesin diesel umumnya menunjukkan emisi NOx cenderung meningkat seiring peningkatan porsi pencampuran karena tingginya temperatur pengapian. Namun pada aplikasi biodiesel pada boiler, emisi NOx cenderung turun secara signifikan. Gambar 6.2 hasil analisa gas NO<sub>x</sub> yang terdeteksi pada gas buang boiler.



Gambar 6.2. Analisa emisi NOx pada gas buang boiler (pengulangan)

Penurunan emisi NOx dipengaruhi oleh karakteristik biodiesel yang berasal dari minyak sawit, sehingga mempromosikan terjadinya pembakaran sempurna. Hal ini sangat mungkin terjadi karena POME yang digunakan dalam pengujian ini memiliki *cetane number* yang jauh lebih tinggi dibanding minyak solar. Angka setana yang tinggi akan mengurangi waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) sehingga waktu pencampuran udara dan bahan bakar lebih singkat (*shorter premixed combustion*). Tat *et al.*, (2004) menyatakan bilangan setana yang tinggi menyebabkan terjadinya *rapid air swirl* sehingga terjadi turbulensi yang baik dalam tahap pencampuran udara dan bahan bakar. Angka setana yang tinggi juga meningkatkan turbulensi pencampuran antara udara dan bahan bakar, sehingga mampu mengimbangi menekan pembentukan NOx pada zona pembakaran yang diakibatkan oleh tingginya temperatur pembakaran.

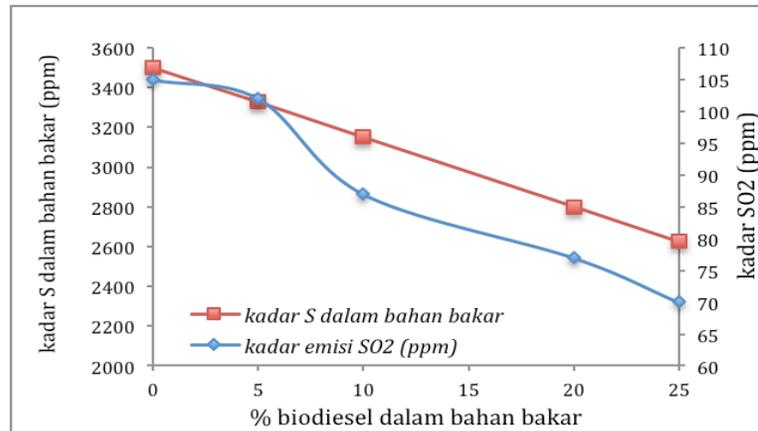
Dalam pengujian ini, kadar NOx pada gas buang lebih rendah rata-rata 25,3% dibandingkan penggunaan minyak solar. Hal ini sejalan dengan kesimpulan pengujian biodiesel sawit pada mesin diesel otomotif yang pernah dilakukan Wirawan, dkk (2008) yang menunjukkan penurunan emisi NOx mencapai 23%.



Gambar 6.3. Profil NOx sebagai fungsi (a) bilangan setana dan kadar oksigen pada gas buang, (b) bilangan setana dan temperatur gas buang

### 6.2.1.2 Emisi SO<sub>2</sub>

Emisi SO<sub>2</sub> pada umumnya sangat ditentukan oleh kandungan sulfur dalam bahan bakar. Biodiesel merupakan bahan bakar dengan kadar sulfur sangat rendah (<2 ppm), sehingga pencampuran 5-25% biodiesel pada minyak solar praktis mengurangi kadar sulfur pada bahan bakar. Berkurangnya kadar sulfur dalam bahan bakar adalah seiring dengan makin besarnya porsi pencampuran biodiesel pada minyak solar, secara linier akan menyebabkan penurunan emisi SO<sub>2</sub> di cerobong. Hasil pengujian pada boiler pipa api menunjukkan pengaruh kadar sulfur pada bahan bakar campuran biodiesel-minyak solar, terhadap kadar SO<sub>2</sub> ditunjukkan pada Gambar 6.4.



Gambar 6.4. Pengaruh pencampuran biodiesel terhadap kadar sulfur bahan bakar dan emisi SO<sub>2</sub>

Makin besar porsi pencampuran biodiesel berkontribusi pada penurunan emisi SO<sub>2</sub> di cerobong boiler rata-rata 21,8 %. Uji statistik dengan SPSS 18 membuktikan bahwa perubahan kondisi operasi dan disain *burner* tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap emisi SO<sub>2</sub>.

### 6.2.2 Pengaruh Penggunaan Biodiesel pada Boiler terhadap Efisiensi boiler

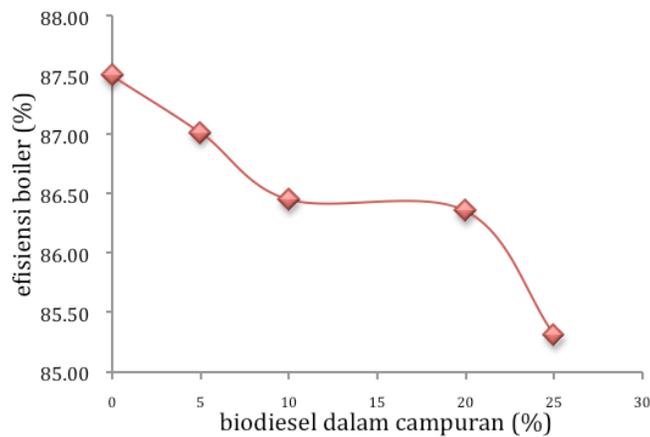
Efisiensi boiler secara sederhana menunjukkan perbandingan energi yang terpakai yang meninggalkan sistem terhadap energi kimia dari bahan bakar yang masuk ke sistem. *Losses method* (metode hilang panas) digunakan dalam penelitian ini untuk menghitung efisiensi boiler. Langkah –langkah perhitungan mengikuti prosedur standar dari *Bureau of Energy Efficiency*. Metode perhitungan yang dipakai khusus untuk boiler berbahan bakar minyak. Kondisi operasi boiler selama pengujian disajikan pada Tabel 6.2.

Pada sebagian besar peralatan pembakaran, kehilangan panas di cerobong memberi kontribusi paling besar terhadap penurunan efisiensi. Kehilangan panas yang diperhitungkan dalam kajian ini adalah kehilangan pada gas kering (*dry flue gas*), yaitu kehilangan panas akibat kandungan hidrogen dan uap air dalam bahan bakar (evaporasi), akibat kandungan air dalam udara pembakaran, dan kehilangan panas akibat konversi elemen C menjadi CO.

Tabel 6.2. Kondisi operasi boiler selama pengujian pada kondisi standar (*business as usual*)

Parameter	satuan	nilai
biodiesel dalam campuran	% vol	5-25%
temperatur ambien	°C	28-32
skala <i>fan damper</i>	-	4,6
<i>load</i> (mode beban)	%	100
waktu operasi	menit	60
temperatur bahan bakar	°C	30

Penggunaan campuran biodiesel-minyak solar sebagai bahan bakar boiler cenderung mengakibatkan penurunan efisiensi seperti ditunjukkan pada Gambar 6.5. Dibandingkan penggunaan minyak solar, pencampuran 5-25% biodiesel pada minyak solar pada boiler pipa api menyebabkan peningkatan kehilangan panas rata-rata 9.71% yang menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi rata-rata sebesar 1,39%, hal ini berlangsung seiring dengan meningkatnya temperatur gas buang rata-rata 5,96 %.



Gambar 6.5. Efisiensi boiler pada variasi penambahan biodiesel dalam campuran bahan bakar

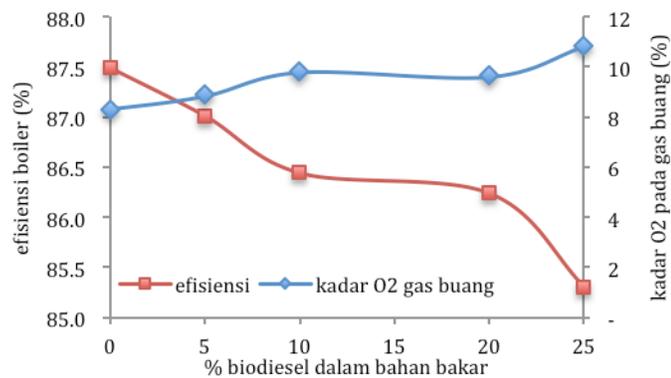
Persamaan yang sesuai untuk menggambarkan efek penambahan biodiesel dalam campuran bahan bakar terhadap efisiensi boiler adalah persamaan kubik yaitu :

$$y = - 0,0539 x^3 + 0,446 x^2 - 1,5511 x + 88,678 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

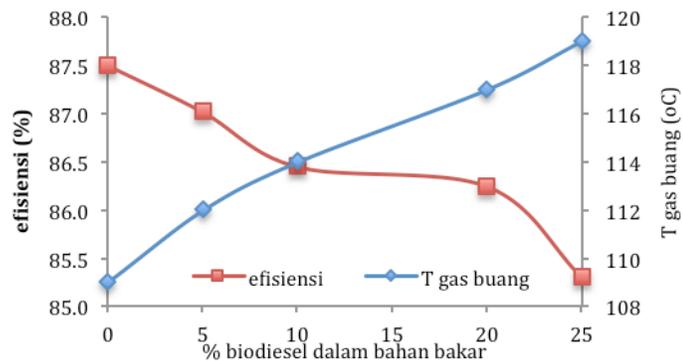
dengan nilai  $R^2 = 0,98763$

dimana  $y$  = efisiensi boiler (%),  $x$  = porsi pencampuran biodiesel (%)

Kecenderungan penurunan efisiensi ini sejalan dengan hasil penelitian Niznik (2010); Miller (2008); Elango (2011); Shrivastava (2009) dan Batey (2003). Penurunan efisiensi ini disebabkan oleh nilai energi input campuran bahan bakar yang lebih rendah, peningkatan kadar oksigen dalam bahan bakar, pembentukan CO serta peningkatan kadar oksigen dan temperatur gas buang. Kondisi ini menyebabkan penurunan laju perpindahan panas, sehingga jumlah hilang panas (*heat loss*) semakin meningkat.



(a)



(b)

Gambar 6.6. Hubungan efisiensi boiler dengan (a) kadar O<sub>2</sub> dan (b) temperatur gas buang

Pada pengujian ini, kontribusi kehilangan panas didominasi oleh kehilangan panas dari *dry flue gas* dan pada tahap evaporasi. Temperatur gas buang, ruang bakar dan temperatur ambien menjadi parameter yang sangat berpengaruh pada jumlah hilang panas

yang terjadi. Sementara hilang panas akibat konversi atom C menjadi CO, berkisar 0,45-1 %, atau kurang dari 5% dari total seluruh kehilangan panas pada boiler.

Kadar oksigen pada gas buang meningkat seiring meningkatnya kandungan biodiesel dalam campuran bahan bakar. Hal ini menunjukkan bahwa boiler beroperasi dengan udara eksek yang tinggi dan melebihi kebutuhan udara teoritis, sehingga tidak semua panas dari pembakaran terkestraksi secara total, hal ini berarti perpindahan panas berlangsung dengan laju yang lebih rendah yang menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi boiler.

Faktor lain yang kuat mempengaruhi efisiensi boiler adalah temperatur gas buang dan beban operasi boiler. Pada penelitian ini, seluruh pengujian dilakukan dengan beban operasi penuh, efisiensi maksimum hanya dapat diperoleh pada interaksi variabel kadar oksigen dan temperatur gas buang yang optimum. Showers (2002) menyatakan efisiensi boiler cenderung berkurang pada eksek air yang rendah pada temperatur gas buang yang tinggi. Efisiensi boiler maksimum tercapai pada mode beban operasi boiler yang rendah.

Uji statistik dengan korelasi Pearson juga menunjukkan bahwa temperatur gas buang berkorelasi signifikan berarah negatif terhadap efisiensi boiler dengan koefisien 94,5%. Pada boiler pipa api, peningkatan temperatur gas buang ini lebih dominan mempengaruhi penurunan emisi boiler. Hal ini dapat diamati pada Gambar 4.8(a) dan (b) dimana makin banyak porsi pencampuran biodiesel dalam bahan bakar, temperatur gas buang cenderung meningkat dan hal ini diikuti dengan penurunan efisiensi. Temperatur gas buang yang tinggi menunjukkan lebih banyak energi yang tidak terkonversi menjadi energi terpakai pada penggunaan biodiesel-minyak solar sebagai bahan bakar.

Bertambahnya kadar oksigen dalam campuran bahan bakar akibat peningkatan persen pencampuran biodiesel dengan jumlah suplai udara pembakaran yang sama, menyebabkan terjadinya penurunan temperatur adiabatik pengapian (*flame*) di zona pembakaran sehingga mengurangi laju perpindahan panas. Meningkatnya jumlah udara pembakaran, atau udara eksek yang berlebih menyebabkan jumlah gas buang per satuan bahan bakar meningkat. Kondisi ini menyebabkan jumlah hilang panas (*loss in dry flue gas*) semakin meningkat, sehingga berimbas pada penurunan efisiensi. Besarnya

peningkatan hilang panas melalui gas buang (kering) meningkat rata-rata 0,71 % seiring dengan meningkatnya pencampuran biodiesel. Penurunan efisiensi ini juga dapat dijelaskan terjadi karena udara masuk ke sistem *burner* pada temperatur ambien (antara 28 - 32 °C) dan meninggalkan boiler pada temperatur yang tinggi (98 - 124 °C). Menurut Bhatia (2012), setiap kenaikan 3,4 % kadar oksigen pada gas buang, menunjukkan bahwa pembakaran berlangsung dengan akses udara yang tinggi, sehingga terjadi penurunan temperatur adiabatik hingga mencapai 260 °C.

### **6.2.3 Pengaruh Penggunaan Biodiesel pada Boiler terhadap Konsumsi bahan bakar**

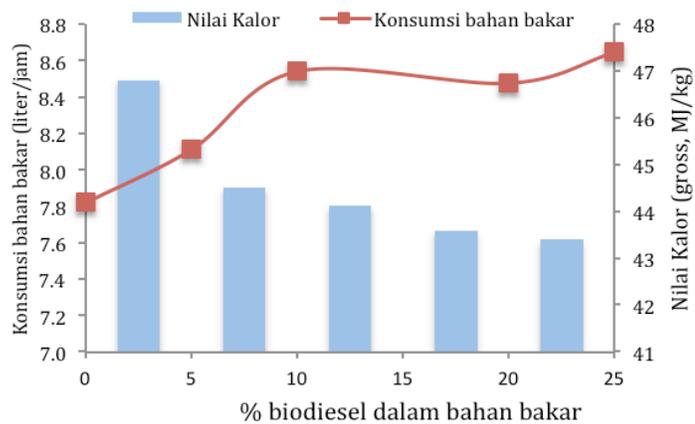
Konsumsi bahan bakar pada mesin diesel umumnya dipengaruhi oleh sifat bahan bakar yang berhubungan dengan tahap injeksi. Selain densitas dan viskositas, faktor lain yang menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar adalah nilai kalor yang rendah. Menurut Xue *et al.*, (2011) peningkatan konsumsi bahan bakar umumnya terjadi berhubungan dengan kehilangan daya mesin (*power loss*).

Dalam pengujian pada boiler pipa api, konsumsi bahan bakar rata-rata meningkat rata-rata 18,97 % seiring dengan penambahan porsi pencampuran biodiesel dalam bahan bakar. Hal ini dipengaruhi oleh nilai kalor biodiesel murni (B100) yang lebih rendah 15,27 % dari minyak solar. Hubungan nilai kalor dan konsumsi bahan bakar pada kasus ini ditunjukkan pada Gambar 6.7. Analisis korelasi Pearson terhadap hubungan nilai kalor dengan konsumsi bahan bakar pada masing-masing campuran menunjukkan adanya hubungan signifikan yang negatif dengan koefisien 92,2%. Sedangkan densitas bahan bakar tidak menunjukkan korelasi yang signifikan dengan konsumsi bahan bakar boiler.

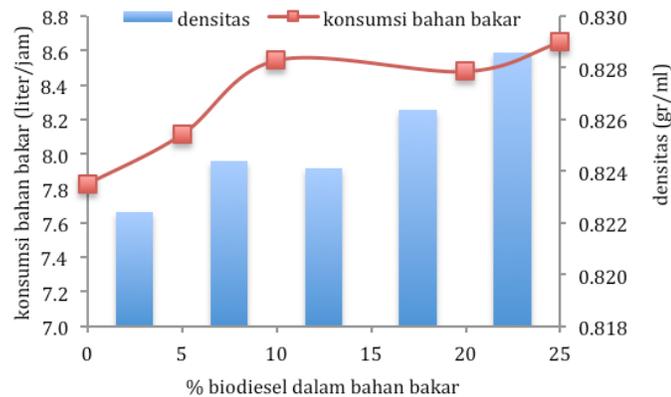
Secara rata-rata, campuran biodiesel-minyak solar (B5-B25) mengalami kehilangan nilai kalor sebesar 6%. Pada volume bahan bakar dan kondisi yang sama, campuran bahan bakar dengan nilai kalor yang lebih rendah membutuhkan lebih banyak massa bahan bakar untuk menuntaskan proses pembakaran. Viskositas campuran bahan bakar yang lebih tinggi mempengaruhi fase injeksi bahan bakar, sehingga mempengaruhi tekanan injeksi pada *burner*. Hal ini dapat menyebabkan penurunan daya mesin sehingga untuk mencapai

kondisi pembakaran yang optimal dibutuhkan sejumlah massa bahan bakar yang lebih besar, sehingga mengakibatkan konsumsi bahan bakar meningkat.

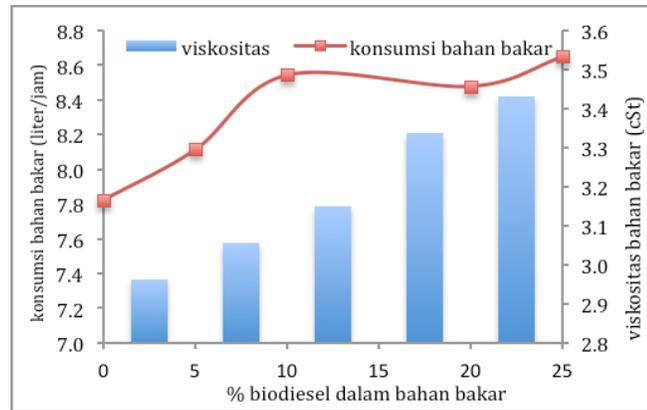
Pada kasus ini boiler beroperasi dengan jumlah udara pembakaran yang sama dan dioperasikan pada beban penuh (*full load*), sehingga peningkatan viskositas dan densitas bahan bakar akibat peningkatan porsi pencampuran biodiesel mempengaruhi peningkatan konsumsi bahan bakar. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 6.7.



(a)



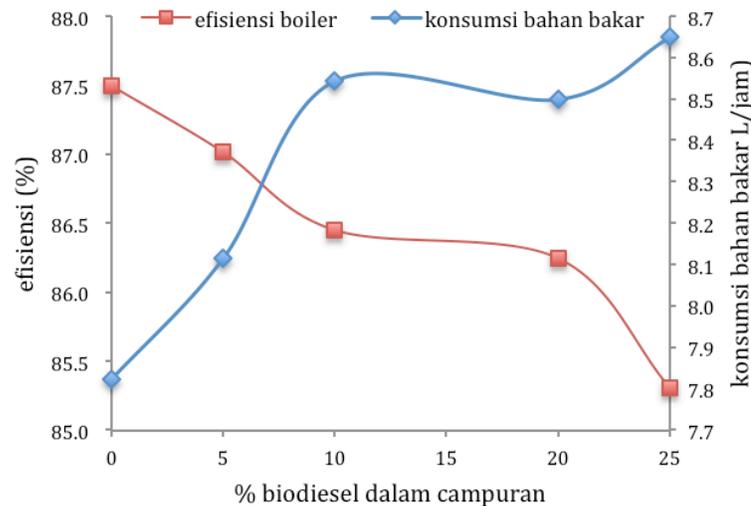
(b)



(c)

Gambar 6.7. Hubungan peningkatan konsumsi bahan bakar dengan (a) nilai kalor, dan (b) densitas, (c) viskositas

Pada umumnya efisiensi boiler berbanding terbalik dengan konsumsi bahan bakar, hal yang sama terjadi pada penelitian ini. Gambar 6.8 menunjukkan hubungan peningkatan konsumsi bahan bakar dan penurunan efisiensi pada masing-masing campuran biodiesel-minyak solar yang diuji pada boiler.



Gambar 6.8. Hubungan peningkatan konsumsi bahan bakar dengan efisiensi boiler

Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan hubungan antara efisiensi boiler dan konsumsi bahan bakar signifikan pada level 0,01 dengan koefisien korelasi sebesar 82,1%. Faktor lain yang berpotensi mempengaruhi hubungan ini antara lain interaksi variabel yang berhubungan dengan kadar oksigen di ruang bakar dan temperatur di zona pembakaran.

### 6.3 Menentukan Kondisi Optimum Operasi Boiler

#### 6.3.1 Pengaruh Skala *Fan Damper* (FD)

Penggunaan biodiesel dengan variasi porsi pencampurannya sebagai bahan bakar boiler mempengaruhi kebutuhan udara pembakaran pada ruang bakar boiler. Untuk mencapai kondisi optimum, kebutuhan masing-masing campuran bahan bakar atas udara pembakaran, dilakukan dengan modifikasi minor melalui pengaturan dan rekayasa pada skala *fan damper* pada *burner*.

*Fan damper* merupakan kipas yang dilengkapi katup pada *oil burner* yang digunakan untuk mengontrol pergerakan udara yang diizinkan masuk ruang bakar. Pada teknologi *burner* modern, *fan damper* juga berfungsi untuk mengurangi timbulnya panas yang terbuang dan meningkatkan pemanasan secara keseluruhan. Kondisi operasi yang dipakai dalam pengujian pengaruh SFD terhadap kinerja boiler ditunjukkan pada Tabel 6.3.

Tabel 6.3. Kondisi Operasi Boiler

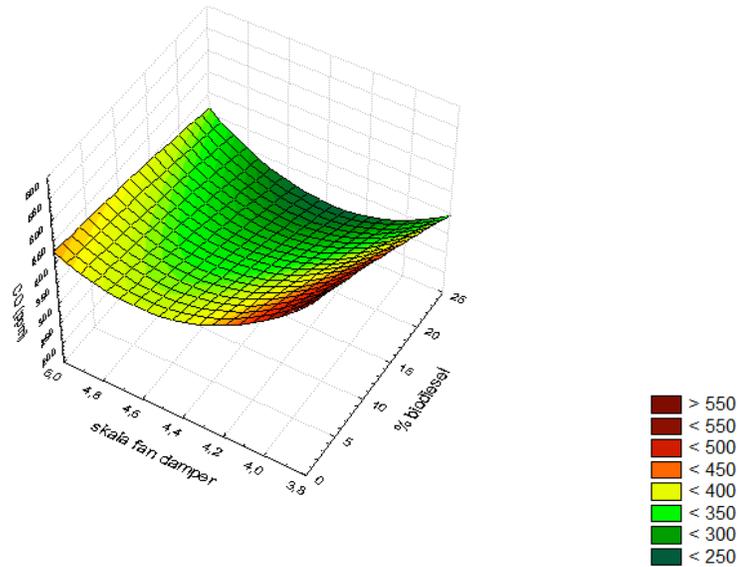
Parameter	satuan	nilai
biodiesel dalam campuran	% vol	5 - 25%
temperatur ambien	°C	28 - 32
skala <i>fan damper</i>	-	4,0 – 4,9
<i>load</i> (mode beban)	%	100
waktu operasi	menit	60
temperatur bahan bakar	°C	30

Skala *fan damper* optimum berhubungan dengan jumlah eksek udara optimum yang disuplai ke ruang bakar, di evaluasi berdasarkan unjuk kinerja boiler yaitu berdasarkan efisiensi boiler dan konsumsi bahan bakar.

Pengaruh variasi skala *fan damper* di evaluasi berdasarkan kadar emisi CO, SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> yang dihasilkan serta kinerja boiler yang diukur melalui efisiensi boiler dan konsumsi bahan bakar. Sesuai Peraturan Gubernur Sumsel No. 6 tahun 2012, baku mutu untuk emisi boiler untuk parameter NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> adalah maksimum 700 mg/m<sup>3</sup> atau setara dengan masing-masing 372 ppm dan 267 ppm. Emisi CO tidak diatur secara tertulis, namun *rule of thumb* operasi boiler umumnya menetapkan kadar CO pada gas buang adalah maksimum 400 ppm.

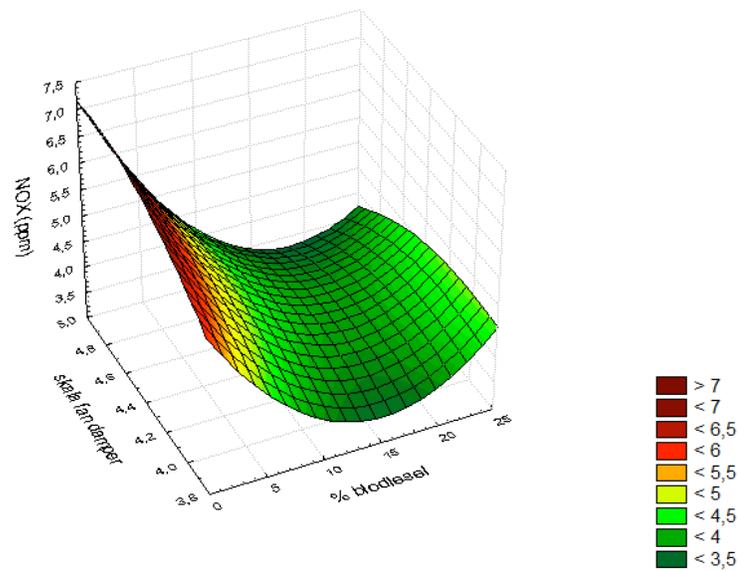
Berdasarkan analisa oksigen sisa pada gas buang, besarnya udara eksek yang disuplai *burner* untuk skala *fan damper* 4,0, 4,3 dan 4,6 berturut-turut adalah 71,13%, 85,54 % dan 119,37%. Besarnya eksek udara ini dipengaruhi oleh setting pompa injeksi *burner* yang beroperasi dengan mode *fuel rich*, sehingga untuk mencapai pembakaran sempurna dibutuhkan sejumlah udara berlebih yang jauh lebih besar dibanding kebutuhan udara teoritisnya. Selain itu, efektivitas sistem *fan damper burner* ini turut dipengaruhi oleh usia peralatan yang sudah beroperasi lebih dari 8 tahun.

Pada Gambar 6.9 - 6.10, *surface plot* digunakan untuk menunjukkan hubungan persen biodiesel dalam bahan bakar dan SFD terhadap emisi kadar emisi yang memenuhi standar baku mutu selama dioperasikan pada skala *fan damper* 4,0 - 4,9 untuk kendali emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub>.

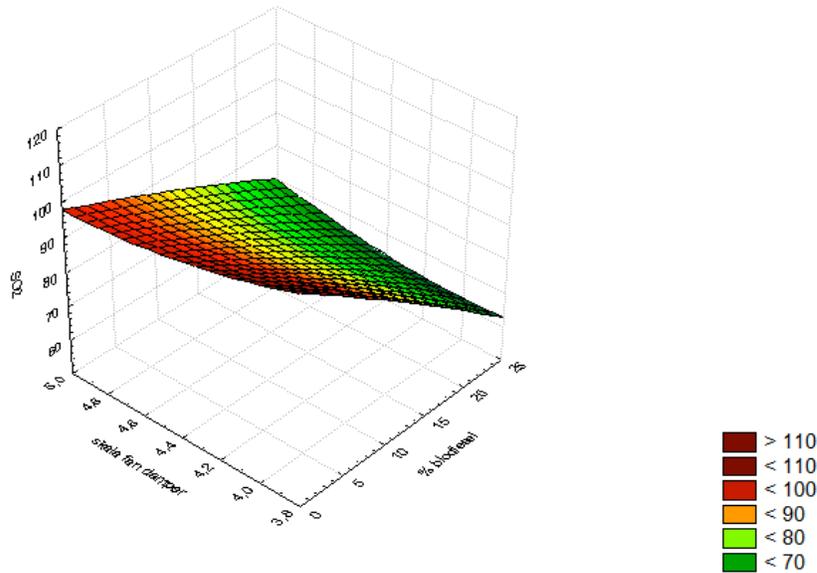


Gambar 6.9. Hubungan *persen biodiesel* dengan variasi skala *fan damper* terhadap emisi CO

Pengamatan pada Gambar 6.10 menunjukkan bahwa emisi CO cenderung lebih tinggi pada penggunaan biodiesel porsi rendah (< 10%) dengan SFD yang rendah. Emisi CO minimum terjadi pada penggunaan B25 dengan SFD antara 4,3-4,5.



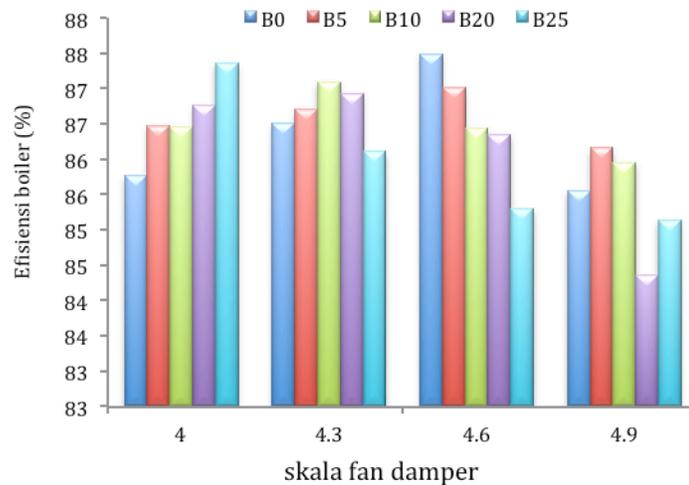
Gambar 6.10. Hubungan *persen biodiesel* dengan variasi skala *fan damper* terhadap emisi NOx



Gambar 6.11. Hubungan *persen biodiesel* dengan variasi skala *fan damper* terhadap emisi  $\text{SO}_2$

Emisi  $\text{NO}_x$  cenderung rendah pada penggunaan biodiesel dengan porsi pencampuran lebih dari 5%. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan SFD tidak mempengaruhi perubahan kadar  $\text{NO}_x$ , dan lebih dominan dipengaruhi oleh peningkatan porsi biodiesel. Hal yang serupa juga ditunjukkan pada emisi  $\text{SO}_2$ , bahwa kadar emisi minimum dicapai pada penggunaan biodiesel dengan porsi yang lebih tinggi (B25) dan tidak terpengaruh oleh perubahan SFD.

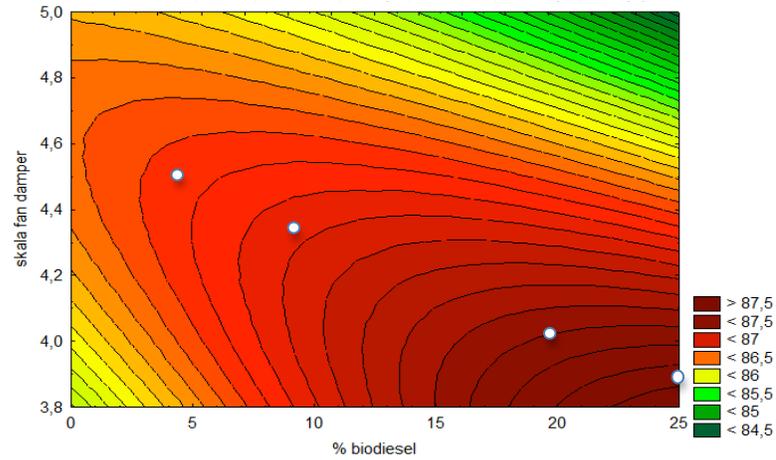
Pengurangan skala *fan damper* merupakan indikasi mekanik, dimana katup kipas udara pada *burner* menekan laju udara masuk. Jumlah dan laju udara pembakaran yang masuk berkurang akibat meningkatnya kandungan oksigen dalam biodiesel serta perubahan perilaku pembakaran bio-solar yang terpengaruh oleh sifat fisika kimia biodiesel. Gambar 6.12 menunjukkan pengaruh variasi skala *fan damper* terhadap emisi boiler pada masing-masing pencampuran bahan bakar.



Gambar 6.12. Hubungan skala *fan damper* terhadap efisiensi boiler pada masing-masing campuran bahan bakar

Pengamatan pada Gambar 6.12 menunjukkan bahwa efisiensi maksimum untuk penggunaan B5, B10, B20 dan B25 dapat dicapai pada *tuning* SFD berturut-turut adalah 4,6 ; 4,3, ; 4,0 dan 4,0. sedangkan penggunaan B10, B20 dan B25, skala *fan damper* optimum adalah berturut-turut 4,3, 4,0 dan 4,0. Pada pengujian ini disimpulkan bahwa untuk memperoleh efisiensi maksimum perlu dilakukan penyesuaian skala *fan damper* (SFD) sebagai indikasi pengurangan suplai udara seiring dengan meningkatnya kandungan biodiesel dalam bahan bakar.

Uji signifikansi membuktikan bahwa efek skala *fan damper* terhadap efisiensi berbeda nyata dengan dengan taraf signifikansi 0,007, tingkat kepercayaan 95%, namun pengaruh SFD terhadap konsumsi bahan bakar tidak berbeda secara nyata (level signifikansi 0,694 (>0,05). Uji lanjut menggunakan *pairwise comparison* menunjukkan bahwa pengaruh SFD 4,6 dan 4,9 terhadap efisiensi boiler tidak berbeda secara nyata. Sehingga pada tahap lanjut SFD yang dianggap berpengaruh adalah 4,0 ; 4,3 dan 4,6.



Gambar 6.13. Plot kontur efisiensi boiler sebagai fungsi kandungan biodiesel dan SFD

Melalui pengamatan pada Gambar 6.13 dapat disimpulkan bahwa efisiensi maksimum pada setiap persen penambahan biodiesel dalam campuran bahan bakar dapat terjadi dengan interval skala FD yang berbeda-beda. Penggunaan 10 akan efektif pada interval skala 4,2-4,4, sementara penggunaan B20 berpeluang menghasilkan efisiensi maksimum pada interval skala FD 4,0-4,2 dan penggunaan B25 optimum pada skala FD 3,8-4,0.

Ada korelasi yang kuat antara variable persen pencampuran biodiesel dan SFD terhadap efisiensi boiler. Persamaan yang mewakili hubungan ini merupakan model optimasi pola kuadratik yaitu :

$$E_{ff} = 59,91 + 0,64 x + 11,56 y - 0,0024 x^2 - 0,1315 xy - 1,26 y^2 \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

dimana  $E_{ff}$  = efisiensi boiler (%)

$x$  = porsi biodiesel dalam campuran bahan bakar (%)

$y$  = skala *fan damper*

Tabel 6.4. Perbandingan efisiensi boiler dengan perubahan skala *fan damper*

Campuran Bahan Bakar	Kondisi <i>business as usual</i>		Kondisi Optimum		
	SFD	efisiensi (%)	SFD	efisiensi (%)	perubahan (%)
B5	4,6	87,02	4,6	87,02	0
B10	4,6	86,45	4,3	87,09	0,64
B20	4,6	86,25	4,0	86,67	0,42
B25	4,6	85,31	4,0	87,37	2,06

Dari data pada Tabel 6.5 menyajikan perbandingan efisiensi boiler yang dicapai pada perubahan skala *fan damper*. Pada penggunaan biodiesel dengan porsi pencampuran 10-25%, penyesuaian SFD berarti mereduksi udara eksek rata-rata 9,2 %. Hal ini memberikan efek peningkatan efisiensi boiler rata-rata 1 %, dimana peningkatan ini disertai dengan penurunan temperatur gas buang rata-rata 7,67 °C (45,8 °F). Dibandingkan dengan *rule of thumb* untuk boiler berbahan bakar minyak pada umumnya, peningkatan 1% efisiensi boiler dicapai dengan reduksi udara eksek sebesar 15% dan temperatur gas buang 40 °C.

### 6.3.2 Pengaruh Temperatur Bahan Bakar

Pemanasan bahan bakar adalah salah satu langkah untuk mengantisipasi pengaruh negatif peningkatan viskositas bahan bakar akibat penambahan porsi pencampuran biodiesel. Efek yang dikontribusikan akibat pemanasan khususnya pada tahap injeksi dan atomisasi bahan bakar. Uji kinerja boiler pipa api berbahan bakar campuran biodiesel-minyak solar dengan variasi temperatur bahan bakar dilakukan dengan kondisi yang ditunjukkan pada Tabel 6.5. Berdasarkan referensi (Murni, 2010) dan hasil penelitian pendahuluan variasi temperatur pemanasan bahan bakar ditetapkan antara 30 – 70 °C.

Instalasi sederhana ditambahkan pada sistem bahan bakar boiler pipa api dengan *oil heater* yang memiliki kontrol otomatis. Tanki bahan bakar dilengkapi dengan pengaduk, yang dioperasikan khususnya pada pencampuran biodiesel yang lebih tinggi (>20%) untuk menghindari *shocking respon* pada sistem *burner* dan menjaga homogenitas temperatur pemanasan dalam tanki bahan bakar.

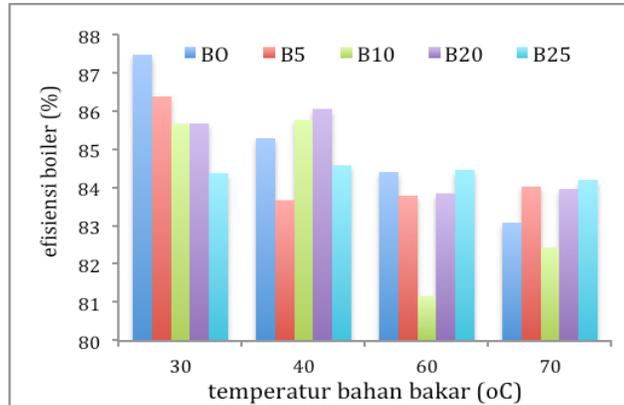
Tabel 6.5. Kondisi operasi boiler pada pengujian variasi temperatur bahan bakar

Parameter	satuan	B0	B5	B10	B20	B25
biodiesel dalam campuran	% vol	0	5	10	20	25
temperatur ambien	°C	30	30	30	30	30
skala <i>fan damper</i>	-	4,6	4,6	4,3	4,0	4,0
<i>load</i> (mode beban)	%	100	100	100	100	100
waktu operasi	menit	60	60	60	60	60

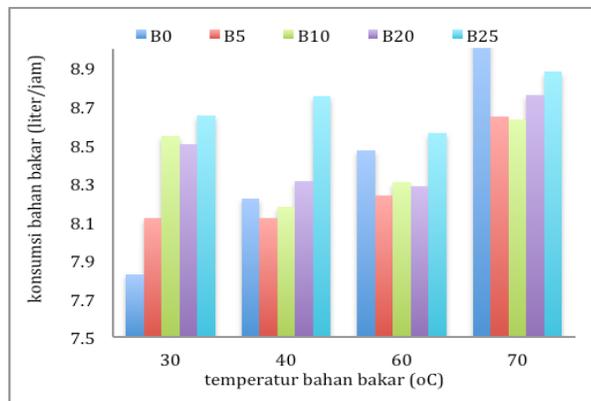
Pemanasan bahan bakar dapat mengendalikan peningkatan viskositas campuran sehingga bahan bakar lebih mudah diinjeksikan ke dalam ruang bakar karena membentuk butiran kabut yang lebih halus. Interaksi dengan sifat fisik lain yang diusung biodiesel seperti bilangan setana dan kadar oksigen yang lebih tinggi, maka pemanasan bahan bakar mampu semakin mempromosikan pembakaran sempurna. Kondisi ini dapat meningkatkan panas yang ditimbulkan di dalam ruang bakar mengimbangi potensi penurunan temperatur adiabatik api (*flame*) seiring dengan bertambahnya porsi biodiesel dalam campuran. Dalam pengujian ini beban boiler dijaga konstan 100% dijaga pada tekanan 3 bar.

Prabowo (2013) menjelaskan peningkatan kinerja mesin akibat pemanasan biodiesel-minyak solar turut dipengaruhi oleh tingginya bilangan setana. Bahan bakar dengan bilangan setana yang tinggi membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai kondisi penyalaan sendirinya (*auto ignition*) pada saat beban motor yang tinggi (*full load*), sehingga persentase bahan bakar yang tidak terbakar berkurang dan daya yang dihasilkan meningkat. Sementara Murni (2010) menjelaskan efek temperatur bahan bakar pada kinerja mesin turut dipengaruhi oleh beban mesin. Pada beban rendah, konsumsi bahan bakar cenderung meningkatkan konsumsi bahan bakar. Efisiensi termal umumnya akan maksimal pada beban operasi rendah (*half load*).

Hasil pengujian variasi temperatur bahan bakar terhadap kinerja boiler ditunjukkan pada Gambar 6.14.



(a)



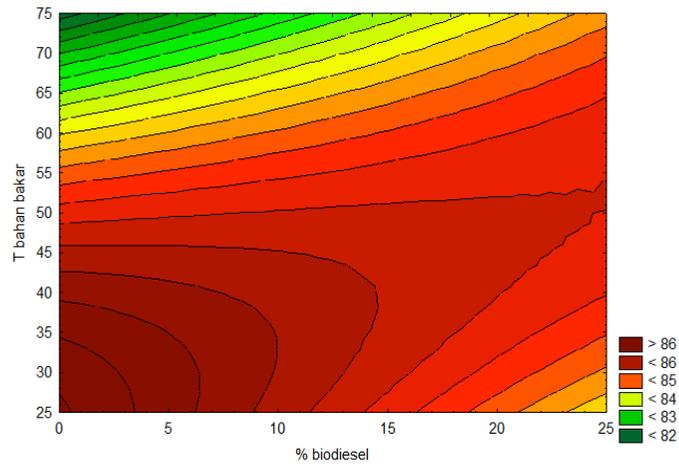
(b)

Gambar 6.14. Pengaruh temperatur bahan bakar terhadap kinerja boiler (a). efisiensi boiler (b). konsumsi bahan bakar

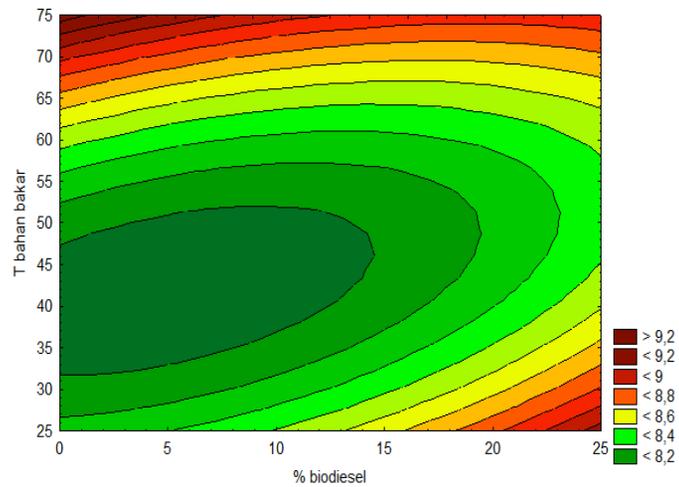
Pada penggunaan biodiesel-minyak solar dengan porsi pencampuran 5-25%, makin tinggi temperatur bahan bakar maka efisiensi boiler cenderung mengalami penurunan. Pemanasan lebih lanjut  $\geq 70$  °C menunjukkan kecenderungan penurunan efisiensi boiler. Sebaliknya, profil konsumsi bahan bakar sebagai fungsi temperatur bahan bakar menunjukkan bahwa makin tinggi temperatur bahan bakar, konsumsi bahan bakar meningkat. Hal ini berkaitan dengan penurunan viskositas campuran sehingga menyebabkan potensi campuran bahan bakar untuk mengalami *overpour*.

Analisa plot kontur hubungan persen biodiesel terhadap efisiensi boiler dan

konsumsi bahan bakar disajikan pada Gambar 6.15. Pemanasan bahan bakar pada temperatur kurang dari  $\leq 60$  °C lebih berpengaruh terhadap perubahan efisiensi dibandingkan terhadap konsumsi bahan bakar. Pemanasan  $\geq 70$  °C hanya berpengaruh pada konsumsi bahan bakar, pemanasan lanjut menyebabkan penurunan efisiensi dan peningkatan konsumsi bahan bakar.



(a)



(b)

Gambar 6.15. Plot kontur hubungan persen biodiesel terhadap kinerja boiler (a). efisiensi boiler, (b). konsumsi bahan bakar

Analisis multivariat dan uji signifikansi antar efek dari masing-masing variabel dilakukan menggunakan SPSS 18. Pada penggunaan B5, temperatur bahan bakar tidak menunjukkan pengaruh yang berbeda nyata terhadap efisiensi boiler. Uji lanjut Duncan menunjukkan efek temperatur 40 °C dan 60 °C tidak berbeda nyata terhadap konsumsi bahan bakar. Sehingga pada kasus ini variabel yang berpengaruh dari T=30°C dan 70°C. Hasil uji signifikansi pada penggunaan B10 menunjukkan efek yang berbeda nyata baik terhadap efisiensi dan konsumsi bahan bakar. Sehingga temperatur optimum dipilih dengan mempertimbangkan semua variabel uji. Sementara untuk penggunaan B20, hasil uji lanjut Duncan, variabel temperatur signifikan terhadap konsumsi bahan bakar, sedangkan terhadap efisiensi boiler T=30°C dan 40°C tidak berbeda nyata. Demikian pula pada penggunaan B25, variasi temperatur bahan bakar menunjukkan efek yang signifikan terhadap konsumsi bahan bakar, namun tidak menunjukkan efek yang berbeda nyata terhadap efisiensi, kecuali pada T=70°C.

Persamaan kondisi optimum yang sesuai dari hubungan persen pencampuran biodiesel dan temperatur bahan bakar dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$E_f = 86,149 - 0,189 x + 0,067 y - 0,0006 x^2 + 0,0043 xy - 0,0017 y^2 \dots (4.5)$$

$$F_c = 9,542 + 0,029 x - 0,076 y + 0,0011 x^2 - 0,0009 xy + 0,0010 y^2 \dots (4.6)$$

dimana :  $E_f$  = efisiensi boiler (%)

$F_c$  = konsumsi bahan bakar (liter/jam)

$x$  = biodiesel dalam campuran (%)

$y$  = temperatur bahan bakar (°C)

Berdasarkan persamaan tersebut diatas diketahui bahwa temperatur bahan bakar berpengaruh positif terhadap efisiensi namun berpengaruh negatif terhadap konsumsi bahan bakar. Interaksi variabel persentase biodiesel dalam campuran dengan temperatur bahan bakar menunjukkan koefisien yang sangat kecil sehingga tidak menunjukkan pengaruh yang berbeda nyata.

#### 6.4 Kondisi optimum penggunaan biodiesel pada boiler pipa api

Umumnya *steam generating cost* atau biaya pembangkitan *steam* melalui operasi boiler dapat diestimasi melalui pendekatan *unloaded steam cost* ( $C_{st}$ ) yang dihitung dengan persamaan (Swagelok Inc, 2011) :

$$C_{GS} = \frac{C_F \times (\Delta H_s - \Delta H_w)}{1000 \times \eta} \quad \dots (4.7)$$

$$C_F = F_C \times P_F \quad \dots (4.8)$$

$$m = \frac{\alpha_F \times (\Delta H_s - \Delta H_w)}{1000} \quad \dots (4.9)$$

$$C_{GS} = \frac{F_C \times m}{\eta} \quad \dots (4.10)$$

dimana :

$C_{GS}$	= biaya pembangkitan <i>steam</i> (USD/kg steam)
$C_F$	= biaya bahan bakar (USD)
$F_C$	= konsumsi bahan bakar (liter/jam)
$\alpha_F$	= harga bahan bakar (USD/liter)
$\Delta H_s$	= <i>enthalpy steam</i> (kJ/kg)
$\Delta H_w$	= <i>enthalpy air umpan</i> (kJ/kg)
$\eta$	= efisiensi boiler (%)

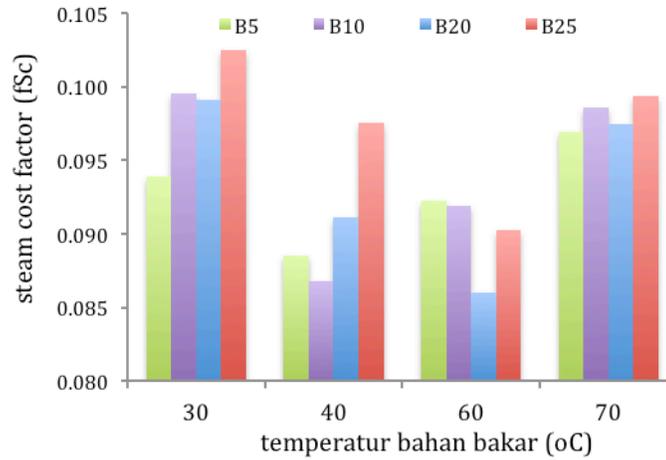
Basis perhitungan menggunakan 1 jam operasi dengan tekanan 3 bar dan mode operasi boiler pada beban penuh (*full load*), sehingga dapat dirumuskan faktor biaya pembangkitan *steam* ( $f_{sc}$ ) pada boiler dalam persamaan berikut :

$$C_{GS} = f_{sc} \cdot m \quad \dots (6.11)$$

$$f_{sc} = \frac{F_C}{\eta} \quad \dots (6.12)$$

Untuk meminimalkan biaya pembangkitan *steam*, kondisi operasi boiler yang optimum adalah yang menunjukkan faktor biaya pembangkitan *steam* ( $f_{sc}$ ) yang paling rendah. Koordinat titik optimum dapat diamati dari grafik yang disajikan pada Gambar

6.18. Seleksi titik optimum dilakukan hanya terhadap variabel yang berpengaruh dari hasil pengujian tahap sebelumnya.



Gambar 6.16. Faktor Biaya pembangkitan *steam* ( $f_{sc}$ ) sebagai fungsi temperatur bahan bakar pada masing-masing campuran bahan bakar

Koordinat  $f_{sc}$  paling rendah menunjukkan kondisi optimum operasi boiler pada masing-masing campuran biodiesel-minyak solar. Secara praktis bagi pengguna boiler di sektor industri dan komersial, perubahan bahan bakar atau modifikasi teknis terhadap boiler akan dapat diterapkan selama memiliki perhitungan ekonomi yang menguntungkan. Perbandingan kinerja pada kondisi *usual* dan optimum disajikan pada Tabel 6.6.

Tabel 6.6. Kondisi Optimum penggunaan biodiesel-minyak solar pada boiler pipa api

Bahan Bakar	SFD, T opt (°C)	Efisiensi Boiler (%)		Konsumsi bahan bakar (ltr/jam)	
		optimum	% perubahan*	optimum	% perubahan*
B5	4,6;30	85,698	0,00%	8,118	0,00%
B10	4,3;40	87,185	1,74%	8,076	11,34%
B20	4,0;60	86,946	1,46%	7,986	11,94%
B25	4,0;60	85,675	1,54%	8,258	10,31%

\*) dibandingkan dengan kinerja boiler tanpa pemanasan bahan bakar (T=30°C)

Perubahan kondisi operasi boiler menggunakan SFD optimum dan temperatur pemanasan menyebabkan terjadinya peningkatan efisiensi boiler rata-rata 1,46 % dan penurunan konsumsi bahan bakar rata-rata 11,19%. Dibandingkan campuran biodiesel

lainnya, B20 menunjukkan faktor biaya pembangkitan *steam* yang paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan konsumsi bahan bakar sangat dipengaruhi oleh interaksi variabel udara pembakaran (SFD) dan temperatur bahan bakar yang optimum.

## **BAB VII**

### **LUARAN PENELITIAN**

Luaran penelitian yang penting dihasilkan dari penelitian ini adalah publikasi dalam jurnal internasional yaitu:

1. Jurnal Applied Mechanics and Materials Vol. 627 (2014) pp 137-140. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.627.137. Publisher : Trans Tech Publications, Switzerland. Judul Artikel : “*Optimum Excess Air for the Utilization of Palm Biodiesel Blends in Fire Tube Boiler*”. Makalah telah di sajikan pada *International Conference Advance Mechanics Engineering* di Hongkong pada 31 Juli 2014.
2. Proceedings of Sriwijaya International Seminars on Energy and Environment Science and Technology (SISEEST 2014), Vol. 1 No. 1. September 2014. ISSN No. 2407-0726. Judul Artikel : The Optimum Conditions of Fire Tube Boiler fuelled with Biodiesel-Diesel Oil Blends. Telah dipaparkan pada Sriwijaya International Seminars on Energy and Environment Science and Technology (SISEEST) di Palembang, Indonesia 10-11 September 2014.

## **BAB VIII**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **8.1. Kesimpulan**

Hasil uji pada boiler pipa api menunjukkan bahwa

- a. Penggunaan biodiesel sebagai campuran minyak solar (porsi pencampuran <25%) dapat diaplikasikan pada boiler dengan kondisi standar tanpa modifikasi. Penggunaan campuran biodiesel-minyak solar menunjukkan efek yang signifikan terhadap emisi dan kinerja boiler.
- b. Pencampuran biodiesel pada BBM solar sebagai bahan bakar boiler efektif menurunkan emisi CO dan SO<sub>2</sub> masing-masing 35,8% dan 21,8%. Berbeda pada sebagian besar hasil pengujian penggunaan biodiesel pada mesin diesel, penggunaan biodiesel pada boiler juga berkontribusi pada penurunan emisi NO<sub>x</sub> sebesar 25,3%.
- c. Peningkatan porsi pencampuran biodiesel dan aplikasinya pada boiler menyebabkan peningkatan hilang panas sebesar rata-rata 9,71% sehingga menyebabkan penurunan efisiensi rata-rata 1,39%.
- d. Pada kondisi *business as usual*, konsumsi bahan bakar cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya porsi pencampuran biodiesel dengan persen peningkatan rata-rata sebesar 18,97%.
- e. Temperatur bahan bakar optimum untuk penggunaan B10, B20 dan B25 berturut-turut adalah 40°C, 60°C dan 60°C. Pemanasan bahan bakar tersebut masing-masing berkontribusi terhadap penurunan konsumsi bahan bakar berturut-turut 11,34% ; 11,94% dan 10,31%.

#### **8.2. Saran**

Untuk memperoleh luaran penelitian yang lebih aplikatif bagi pengguna boiler di sektor industri dan komersial, pada penelitian selanjutnya sebaiknya:

- a. Menambah cakupan evaluasi emisi boiler terhadap parameter emisi lain sesuai baku mutu emisi yang ditetapkan, yaitu partikulat dan opasitas senyawa-senyawa yang tergolong gas rumah kaca.

- b. Mengevaluasi pengaruh penggunaan biodiesel terhadap usia pemakaian boiler (*engine durability*) sehingga mengetahui kontribusinya terhadap efek penggunaan terhadap biaya operasi dan pemeliharaan boiler.
- c. Melengkapi analisa ekonomi dengan memperhitungkan manfaat lingkungan dari penggunaan biodiesel terhadap reduksi emisi gas rumah kaca (pendekatan *life cycle analysis*).

## DAFTAR PUSTAKA

- Avecedo, H., & Mantilla, J. (2011). Performance and emissions of a heavy duty diesel engine fuelled with palm oil biodiesel and premium diesel. *Dyna* , 78 (170), 152-158.
- Boyd, M. (2007). *The Autoignition Properties of Biodiesel Fuels*. Adelaide: University of Adelaide.
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. H. (2003). Comparison on Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel and Soybean Oil Biodiesel. *American Society of Agricultural Engineers* , Vol. 46(4).
- Da Silva, N. D., Batistella, C. B., Filho, R. M., & Maciel, R. W. (2011). Investigation of Biofuels Properties. *Chemical Engineering Transactions Vol 25* .
- Demirbas, A. (2008). Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. *Fuel* , 87, 1743-1748.
- Dincer, K. (2008). Lower Emissions from Biodiesel Combustion. *Energy Sources Part A* 30 , 963-968.
- Dobovisek, Z., Vajda, B., Pehan, S., & Kegl, B. (2009). Influence of Fuel Properties on Engine Characteristics and Tribology Parameters. *GOMABN* , 48 (2), 131-158.
- Ghorbani, A. B. (2011). A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler. *Applied Energy* , 88, 4725-4732.
- Habib, M. A., Elshafei, M., & Dajani, M. (2008). Influence of combustion parameters on NOx production in an industrial boiler. *Computers and Fluids* 37 , 12-23.
- Hosseini, S. B., Bashirnezhad, K., Moghiman, A. R., Khazraii, Y., & Nikoofal, N. (2010). Experiment Comparison of Combustion Characteristic and Pollutant Emission of Gas Oil and Biodiesel. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* , 1 (1), 10-14.
- Jaichandar, S., & Annamalai, K. (2011). The Status of Biodiesel as an Alternative Fuel for Diesel Engine-An Overview. *Journal of Thermal Science and Technology* , 71-75.
- Karademir, A. (2006). Evaluation of the potential air pollution from fuel combustion in industrial boilers in Kocaeli, Turkey. *Fuel* 85 , 1894-1903.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2012). *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. Dipetik April 2013, dari [www.esdm.go.id](http://www.esdm.go.id).
- Krishna, C. R. (2001). *Biodiesel Bends in Space Heating Equipment*. New York: Brookhaven National Laboratory.

Komariah, L.N., Arita, S., Wirawan, S.S., Yazid, M., Novia. 2013. Emission factors of biodiesel combustion in industrial boiler: A comparison to fossil fuel. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 052005.

Komariah, L.N., Arita, S., Wirawan, S.S., Yazid, M., Novia. 2013. Effects of Palm Biodiesel Blends on Fuel Consumption in Fire Tube Boiler. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 391 (2013) pp 93-97

Labeckas, G., & Slavinskas, S. (2006). The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Energy Conservation Management* 47 , 1954-1967.

Lapuerta, M., Herreos, J. M., Lyons, L. I., Garcia-Contreras, R., & Brice, Y. (2008). Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. *Fuel* 87 , 3161-3269.

Nagaraju, V., Henein, N., Quarder, A., Wu, M., & Bryzik, W. (2008). *Effect of Biodiesel (B-20) on performance and Emissions in a Syngle Cylinder HSDI Diesel Engine*. World Congress, SAE International, Detroit Michigan.

Nagi, J., Ahmed, S. K., & Nagi, F. (2008). Palm Biodiesel an Alternative Green Renewable Energy for Energy Demands of the Future. *ICCBT 07* , 79-94.

Mantari, M., & Jafaar, M. N. (2009). Performance of Oil Burner System Utilizing Various Palm Biodiesel Blends. *International Journal of Mechanical and material Engineering* , 4 (3), 273-278.

Miller, C. A. (September 2008). *Characterizing Emissions from the combustion of biofuels*. U.S. Environmental Protection Agency.

Sivasami, K., Selladuari, V., & Devadasan, S. R. (2012). Performance and Emission Characteristics of a Marin Diesel Engine using Biodiesel. *European Journal of Scientific research* , 90 (No. 4), 613-620.

Sivaramakrishnan, K., & Ravikumar, P. (2012). Determination of Cetane Number of Biodiesel and Its Influence on Physical Properties. *ARPJN Journal of engineering and Applied Science* , 7 (2), 205-211.

Ramadhas, A. S., Muraleedharan, C., & Jayaraj, S. (2005). Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil. *Renewable energy* Vol 30 , 1789-1800.

Tesfa, B., Mishra, F., Gu, F., & Ball, A. D. (2011). Combustion Characteristics of CI Engine Running with Biodiesel Engine. *International Conference on renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*. 13th. Las Palmas de Gran Canaria: European Association for the Development of renewable energie, Environment and Power Quality.

Veski, A. Borovikov, T. Tiikma. 2002. Combustion Air Control in Biofuel-Fired Boilers. 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. pp.17-21

Wirawan, S. S., Tambunan, A. H., & Djamin, M. (2008 Vol X). The Effect of Palm Biodiesel Fuel on Performance and Emission of The Automotive Diesel Engine. *Engineering International CIGR EJournal* , 1-13.

Xue, J., Grift, T. E., & Hansen, A. C. (2011). Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 , 1098-1116.

Yuan, W., Hansen, A. C., & Zhang, Q. (2003). Predicting The Physical Properties of Biodiesel for Combustion Modeling. *American Society of Agricultural Engineers* 46 (6) , 1487-1493.

Yang, J., Golovitchev, V. I., Lurbe, P. R., & Sanchez, J. L. (2012). Chemical Kinetic Study of Nitrogen Oxides Formation Trends in Biodiesel Combustion. *International Journal of Chemical Engineering* , 898242, 1-22.

Yoon, S. H., Park, S. H., & Lee, C. S. (2008). Experimental Investigation on the Fuel Properties of Biodiesel and Its Blends at Various Temperatures. *Energy & Fuels* , 22, 652-656.