

# ANALISIS RANTAI ENERGI *BIODIESEL* DARI BIOMASSA MIKROALGA DI INDONESIA

## *Energy Chain Analysis for Biodiesel from Micro algal in Indonesia*

Arif Dwi Santoso<sup>\*)</sup>, Tresna P. Soemardi<sup>\*\*)</sup>, Kardono<sup>\*)</sup> dan Awal Subandar<sup>\*)</sup>

<sup>\*)</sup>Pusat Teknologi Lingkungan Gedung BPPT II Lt. 19 Jl. M.H. Thamrin No 8 Jakarta

<sup>\*\*)</sup>Pusat Studi Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana Universitas Indonesia Gedung C Lt. V-VI Jl. Salemba Raya 4 Jakarta

<sup>\*\*\*)</sup>Departemen Teknik Mesin FT-UI, Universitas Indonesia Kampus UI Depok  
E\_mail: arif.dwi@bppt.go.id

### **Abstract**

*The purpose of this study was to popularize the microalgal biomass as an alternative source of raw material for biodiesel. In order to gain the goal, the energy balance in the production of biodiesel from microalgae was evaluated using life cycle assessment (LCA) for all process production of biodiesel. Evaluation method that applied is to calculate the value of the NEB (net energy balance) and NER (net energy ratio) for all stages of production. The results stated that the main energy consumption in the production of biodiesel microalgae was cultivation stage. In this stage energy was used around 55 MJ or more than 50% of the total energy input. NEB and NER value of microalgae biodiesel production is relatively low which ranges -59.59, and 0.42 respectively. The low value of NEB and NER microalgae biomass was caused biomass can not competitive to be candidates for future biodiesel.*

**Keywords:** *biodiesel, net energi balance, net energi ratio, life cycle assessment*

### **Abstrak**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempopulerkan biomassa mikroalga sebagai alternatif sumber bahan baku *biodiesel* yang lebih kompetitif. Upaya yang dilakukan adalah dengan mengevaluasi keseimbangan energi pada produksi *biodiesel* dari mikroalga dengan menggunakan sistem penilaian siklus proses produksi (LCA). Metode evaluasi energi yang digunakan adalah menghitung nilai NEB (*net energy balance*) dan NER (*net energy ratio*) terhadap seluruh tahapan produksi. Hasil penelitian menyatakan bahwa konsumsi energi yang terbesar pada produksi *biodiesel* mikroalga terjadi pada tahap budidaya yakni sekitar 55 MJ atau hampir lebih dari 50% dari total energi input. Nilai NEB dan NER produksi *biodiesel* mikroalga adalah berkisar -59,59, dan 0,42. Rendahnya nilai NEB dan NER ini menyebabkan biomassa mikroalga sulit bersaing dengan biomassa lain untuk menjadi kandidat bahan baku *biodiesel* di masa mendatang.

**Kata kunci:** *biodiesel, net energi balance, net energi ratio, life cycle assessment*

Diterima: 24 April 2013; Revisi: 10 Mei 2013; Disetujui: 24 Mei 2013

## **1. PENDAHULUAN**

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil terutama bahan bakar minyak (BBM). Pada tahun 2012, Kebutuhan BBM mayoritas digunakan di sektor rumah tangga, transportasi dan industri mencapai 57,87 juta liter dan diperkirakan mengalami kenaikan sekitar 2,8% per tahun (Kementerian ESDM, 2012). Dalam rangka untuk mengurangi ketergantungan yang tinggi pada BBM tersebut, pemerintah Indonesia melakukan program konversi BBM ke bahan bakar gas (LPG-*liquor petrol gas*). Pada upaya yang sama, pemerintah juga telah mempromosikan upaya diversifikasi energi non BBM dengan menetapkan Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006. Pepres tersebut mentargetkan penggunaan

energi terbarukan yang didalamnya terkandung sumber energi alternatif berupa bahan bakar nabati (BBN) seperti *bioethanol*, *biodiesel* sebanyak 5% pada tahun 2025. BBN *biodiesel* biasanya diproduksi dari bahan minyak kelapa sawit (*crude palm oil-CPO*), sedangkan *bioethanol* berasal dari bahan molase, jagung, singkong dan umbi-umbian.

Kendala utama dalam hal pengembangan BBN *biodiesel* dan *bioethanol* adalah adanya kompetisi bahan baku BBN dengan penyediaan untuk bahan pangan. Harga bahan baku BBN seperti CPO, jagung dan umbi-umbian masih mahal bila dijual sebagai bahan pangan dibanding sebagai bahan baku BBN. Kendala lainnya adalah struktur pasar yang belum terkonsolidasi, keterbatasan dalam infrastruktur baik dalam mengolah, maupun untuk

mendistribusikan biomassa sebagai bahan BBN, keterbatasan cara bercocok tanam, keterbatasan benih dan pupuk, serta jejaring dalam logistik dan distribusi produk *biodiesel*.

Kendala lain yang mengancam kelangsungan pengembangan BBN adalah adanya pemikiran di kalangan peneliti dan pemerhati lingkungan bahwa produksi BBN secara signifikan berkontribusi dalam memicu meningkatnya emisi gas rumah kaca akibat dari perubahan penggunaan lahan (Searchinger, *et. al.*, 2008), mengancam pasokan pangan (Engelhaupt, E., 2007), dan meningkatkan kerusakan hutan dan keanekaragaman hayati (Khuo, H.H., *et. al.*, 2011).

Melihat semakin kecilnya peluang tanaman darat untuk menjadi sumber bahan baku BBN, maka semakin gencarlah upaya mencari alternatif sumber bahan baku BBN yang lebih kompetitif. Biomas mikroalga mendapat prioritas utama sebagai salah satu kandidat bahan BBN setelah bahan dari tanaman darat banyak mengalami hambatan. Keunggulan dari biomas ini adalah sifatnya yang dapat diperbarui dan mempunyai kemampuan terhadap pengurangan emisi gas CO<sub>2</sub> (Jorquera, O., *et. al.*, 2010). Mikroalga memanfaatkan sinar matahari dalam fungsi fotosintesis untuk merubah CO<sub>2</sub> menjadi karbohidrat, lemak dan protein dengan produktivitas yang jauh lebih efisien dibanding dengan tanaman darat (Scott, S.A., *et. al.*, 2010). Selain itu mikroalga juga memiliki *double time* (kelipatan dua) pertumbuhan sekitar 3,5 jam, memerlukan lebih sedikit air dalam pertumbuhannya dan menghasilkan bahan baku *biodiesel* 15-300 kali lebih cepat dibanding dengan tanaman darat (Chisti, Y., 2007).

Bila mikroalga dijadikan sebagai salah satu sumber bahan BBN, maka selain biomassa mikroalga harus mempunyai produktivitas tinggi, dan bersifat ramah lingkungan, syarat lain adalah ekonomis dalam hal biaya produksi maupun dalam penyediaan kalori energi. Untuk mengetahui apakah biomassa mikroalga mengandung surplus energi dan sebaliknya, maka perlu dilakukan analisis rantai energi pada keseluruhan proses produksinya. *Life Cycle Assessment* (LCA) adalah salah satu metode untuk mengevaluasi semua aspek lingkungan dan potensi dampak yang ditimbulkan oleh suatu produk mulai dari proses penyediaan bahan baku, produksi, hingga proses dekomposisi produk termasuk mengevaluasi energinya (ISO 14040).

Penerapan LCA pada produk *biodiesel* mikroalga akan memberikan informasi sejauh mana produk ini mempengaruhi lingkungan serta analisis rantai energinya, sehingga hasil analisisnya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk menetapkan apakah biomassa mikroalga layak sebagai sumber bahan BBN. Studi penerapan LCA telah dilakukan pada BBN *biodiesel*, metanol, etanol, dari minyak kelapa sawit (Sheehan, J., *et. al.*, 1998; Hackney, J., *et. al.*, 2001). Analisis siklus energi juga telah dilakukan pada perhitungan untuk BBN

etanol dari tetes tebu di Thailand (Nguyen, T.I.T., *et. al.*, 2008).

## 2. BAHAN DAN METODE

### 2.1. Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi keseimbangan energi pada produksi *biodiesel* dari mikroalga dengan menggunakan sistem penilaian siklus proses produksi (LCA). Hasil penelitian diharapkan dapat memberi data untuk masukan bagi para pembuat kebijakan disektor energi khususnya untuk mempromosikan biomassa mikroalga sebagai alternatif bahan untuk *biodiesel* di Indonesia.

Ruang lingkup penelitian ini meliputi perhitungan NEB (*net energy balance*) dan NER (*net energy ratio*) dari produksi *biodiesel* dari mikroalga. NEB adalah perbedaan antara total energi *output* (meliputi energi yang terkandung dalam *biodiesel* produk dan atau produk samping) dan total energi *input*. Nilai NEB merupakan salah satu indeks yang biasa digunakan untuk menganalisis efisiensi energi dari *biofuel* (Nguyen, T.L.T., *et. al.*, 2007). NER adalah rasio dari total energi *output* dan total energi *input* dari suatu proses produksi barang. Nilai NEB dan NER sering indikator untuk mengevaluasi hasil dari analisis siklus energi (Pleanjai, S., *et. al.*, 2009).

### 2.2. Siklus Produksi *Biodiesel* Mikroalga dan Sumber Data

Dalam penelitian ini, total energi yang timbul dari proses produksi *biodiesel* mikroalga dihitung dan dikelompokkan dalam 3 tahap yaitu tahap produksi biomassa mikroalga, tahap produksi minyak alga dan produksi *biodiesel*. Seluruh energi pada setiap tahapan proses diinventarisasi berdasarkan bahan baku yang digunakan, energi yang dipakai dan energi yang dihasilkan. Untuk memenuhi tingkat kesahihan data dengan skala ekonomi, maka data diambil dari 4 kegiatan produksi *biodiesel* alga pada sistem *race way* dengan kapasitas produksi sekitar 10-20 ton/ha/tahun. Analisis tidak menyertakan perhitungan konsumsi energi yang berkaitan dengan penyiapan fasilitas konstruksi seperti pembangunan kolam budidaya mikroalga, pengadaan mesin dan seluruh biaya yang ditimbulkannya. Satuan fungsional perhitungan yang digunakan adalah 1 kg *biodiesel* yang mengacu pada sistem *boundary* proses produksi *biodiesel* yang disajikan dalam Gambar 1.

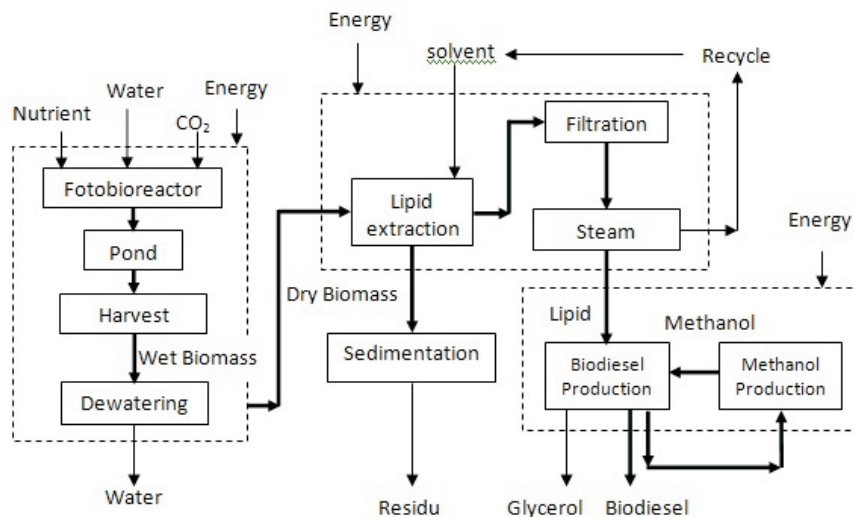
### 2.3. Perkiraan Energi Input

#### 2.3.1. Budidaya Mikroalga

Budidaya mikroalga dimulai dari perbanyakan sel mikroalga dari galur murni dalam botol/reaktor secara bertahap mulai dari 1l, 2l hingga 5l dengan kepadatan berkisar  $5 \times 10^6$  sel/ml. Setelah itu hasil perbanyakan mikroalga diinokulasi dalam kolam kultur sistem *race way* dengan volume 6.000-28.000 liter dengan kepadatan sel sekitar 100.000

sel/ml (Anderson, R.A., 2005). Selama masa perbanyakan sel dan budidaya dalam kolam kultur, media air diberi pupuk berupa nutrisi nitrat dan fosfat dalam bentuk  $KNO_3$  dan  $P_2O_5$  dengan konsentrasi masing-masing 25 ppm dan 40 ppm. Perlakuan lain selama budidaya adalah pemberian aliran udara ambien sebesar 3-5 liter/menit dalam kolam yang berfungsi sumber gas  $CO_2$  dan pengaduk media agar selalu homogen.

Pengadukan media yang utama dilakukan oleh *pedal wheel* yang digerakkan oleh generator listrik. Kondisi kolam yang homogen selalu dijaga untuk menghindari pengendapan sel mikroalga dan meratakan kebutuhan nutrisi dan ruang bagi sel mikroalga. Selain pada proses pengadukan, proses panen juga memerlukan banyak energi listrik. Proses pemanenan mikroalga biasanya dilakukan dengan 2 cara, yaitu dengan menyaring



Gambar 1. Skema sistem *boundary* penelitian

media yang sudah siap panen (kepadatan  $15-20 \times 10^6$  sel/ml) dengan kertas filter berukuran 4-5  $\mu m$ , serta dengan metode sentrifugasi (Anderson, R.A., 2005).

### 2.3.2. Produksi Minyak Alga

Proses pembuatan minyak alga dimulai dari proses ekstraksi biomassa mikroalga hasil panen. Proses ekstraksi adalah proses pemecahan dinding sel mikroalga sehingga komponen lipid dalam sel (trigliserida) dapat dipisahkan dari komponen lainnya yakni protein dan karbohidrat. Tahapan proses ini adalah menambahkan biomassa dengan pelarut alkohol untuk melarutkan lipid/minyak alga sebanyak 0,3 -0,35 l/kg biomassa, kemudian dilanjutkan dengan proses memisahkan campuran alkohol minyak dengan campuran air dan heksan dengan perbandingan 3:1. Fase yang terbentuk selanjutnya adalah fase minyak-heksan yang dipisahkan dengan metode penguapan sehingga didapatkan lipid/minyak alga. Ekstraksi lipid mikroalga merupakan topik yang hangat dibahas oleh para ahli, sebab proses ini merupakan satu proses yang mahal bagi keberlanjutan biomassa mikroalga sebagai bahan *biodiesel* selain proses trans-esterifikasi.

### 2.3.3. Produksi Biodiesel

Proses pembuatan *biodiesel* dari minyak alga adalah sama dengan proses pembuatan *biodiesel*

dari minyak kepala sawit (CPO), minyak jarak (CJO) maupun minyak nabati dan hewani lainnya, yakni dengan mereaksikan trigliserida dengan alkohol menjadi senyawa metil ester (*biodiesel*) dan gliserol dalam katalis asam atau basa. Proses pembuatan *biodiesel* secara trans esterifikasi meliputi 4 tahap yakni tahap penyiapan bahan baku, tahap reaksi, tahap pemisahan dan pemurnian hasil (Wiyarno, B., 2009).

Pada tahap penyiapan bahan baku, hal yang perlu diperhatikan adalah menyimpan minyak alga dalam wadah yang kering, sejuk dan tertutup rapat karena minyak alga sangat mudah teroksidasi. Sebelum minyak alga direaksikan, kandungan asam lemak bebas (*free fatty acid*) dalam minyak tidak boleh melebihi 5% karena dapat mempengaruhi reaksi transesterifikasi. Minyak alga juga harus bebas dari residu lain seperti fosfatida, protein, karbohidrat dan air. Penghilangan residu-residu tersebut adalah dengan cara menambahkan asam fosfat ( $H_2PO_4$ ) dalam minyak alga dengan konsentrasi 85% (Wiyarno, B., 2009).

Pada tahap reaksi dilakukan pencampuran minyak alga yang telah siap dengan alkohol. Alkohol dengan rantai C yang lebih sedikit seperti *metanol* akan memberikan reaksi reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan alkohol dengan rantai C yang panjang seperti etanol atau butanol. Disamping jenis alkohol yang digunakan, perbandingan molaritas antara pereaktan dan

trigliserida juga mempengaruhi proses reaksi *biodiesel*. Penggunaan metanol yang berlebihan justru akan memperlambat proses reaksi, karena metanol yang berlebih akan memperlambat proses hidrolisis terhadap ester sehingga proses lanjutan *biodiesel* menjadi terhambat. Menurut beberapa peneliti perbandingan terbaik molar antara metanol dan trigliserida adalah 6:1 (Ehimen, E.A., et al., 2009)

### 2.4. Perkiraan Energi Output

Produk utama dari proses produksi *biodiesel* dari mikroalga adalah *biodiesel* (metil ester), sedangkan produk sampingnya adalah gliserol dan serat biomassa. Produktivitas gliserol dan serat per produksi 1 kg *biodiesel* adalah 0,18 kg dan 4,44 kg. Jumlah kalori yang terkandung dalam *biodiesel* mikroalga adalah 44,2 MJ/kg (Khoo et al., 2010), sedangkan *glycerol* adalah 19 MJ/kg dan serat biomassa adalah 0,2 MJ/kg (Pleajai, S., et al., 2009).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Perhitungan Energi Input dan Output

Untuk mempermudah menampilkan konsumsi energi secara rinci, maka data hasil perhitungan tentang masukan dan keluaran bahan baku dan energi dalam proses produksi *biodiesel* mikroalga disajikan dalam nilai per kg produk *biodiesel*, seperti terlihat dalam Tabel 1.

Pada Tabel 1 terlihat bahwa energi input utama pada tiap-tiap tahapan berasal dari energi listrik. Pada tahap budidaya, energi listrik banyak digunakan untuk menggerakkan *pedal wheel* dan menginjeksi gas CO<sub>2</sub> ke dalam kolam, selain itu juga banyak terserap untuk proses pemanenan. Pada tahap produksi minyak alga dan *biodiesel*, konsumsi listrik banyak terserap untuk proses pemecahan dinding sel pada saat ekstraksi dan proses reaksi esterifikasi dan transesterifikasi.

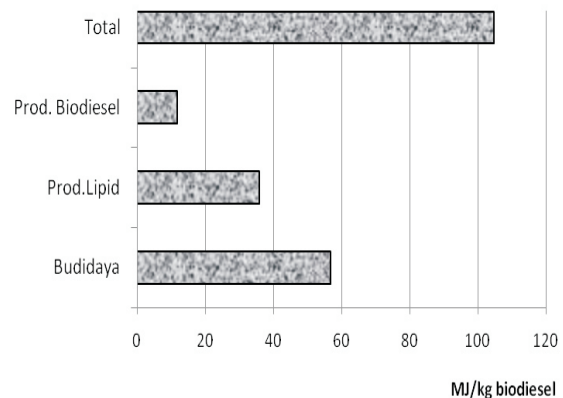
Tabel 1. *Input dan output energi dalam produksi biodiesel mikroalga*

Life cycle produksi biodiesel	Satuan	per kg biodiesel	MJ/kg biodiesel
<b>Input</b>			
A. Budidaya			
KNO <sub>3</sub>	kg	0,34	0,77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg	0,18	0,41
Energi listrik	MJ	55,60	55,60
B. Produksi minyak alga			
Energi listrik	MJ	35,70	35,70
Transportasi	tkm	0,05	0,27
C. Produksi <i>biodiesel</i>			
Metanol	kg	0,21	
NaOH	kg	0,01	0,47
NaOCH <sub>3</sub>	kg	0,03	1,17
HCl	kg	0,02	0,66
Energi panas	MJ	2,06	2,06
Energi listrik	MJ	2,96	2,96
Transportasi	tkm	0,05	0,25
<b>Total Input A+B+C</b>			<b>105,29</b>
<b>Output</b>			
<i>Biodiesel</i>	kg	1,00	44,20
Gliserol	kg	0,18	3,42
Biomassa	kg	4,44	0,89
<b>Total</b>			<b>45,70</b>

### 3.2. Analisis Energi

Proses analisis energi diawali dengan penggambaran konsumsi energi pada setiap proses produksi *biodiesel* per kg, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2 di bawah ini. Konsumsi energi terbesar terjadi pada tahap budidaya yakni sekitar 55 MJ atau hampir lebih dari 50% dari total energi input. Energi pada tahap ini digunakan untuk menggerakkan *pedal wheel* dan menginjeksi gas CO<sub>2</sub> dan untuk proses pemanenan. Untuk menekan energi input pada produksi *biodiesel*, agar lebih dapat meningkatkan nilai NEB dan NER, maka penghematan energi produksi biomassa tersebut dilakukan dengan cara perbaikan dan efisiensi proses pemanenan alga dan penghematan energi listrik dalam proses budidaya.

Pada tahap produksi minyak alga dan produksi *biodiesel*, konsumsi energi banyak digunakan untuk energi listrik, energi panas dan penggunaan metanol dan bahan kimia lainnya. Energi listrik dan panas dipakai untuk proses sonikasi yaitu pemecahan dinding sel dan proses penguapan selama proses transesterifikasi. Sementara itu pada proses ini banyak metanol untuk proses esterifikasitrans esterifikasi, dan bahan kimia untuk sterilisasi. Penggunaan bahan kimia ini perlu diwaspadai karena berpotensi mencemari lingkungan, sehingga diperlukan upaya untuk menetralsir bahan-bahan tersebut sebelum dibuang ke lingkungan atau digunakan lagi dalam siklus produksi.



Gambar 2. Konsumsi energi pada produksi *biodiesel* mikroalga

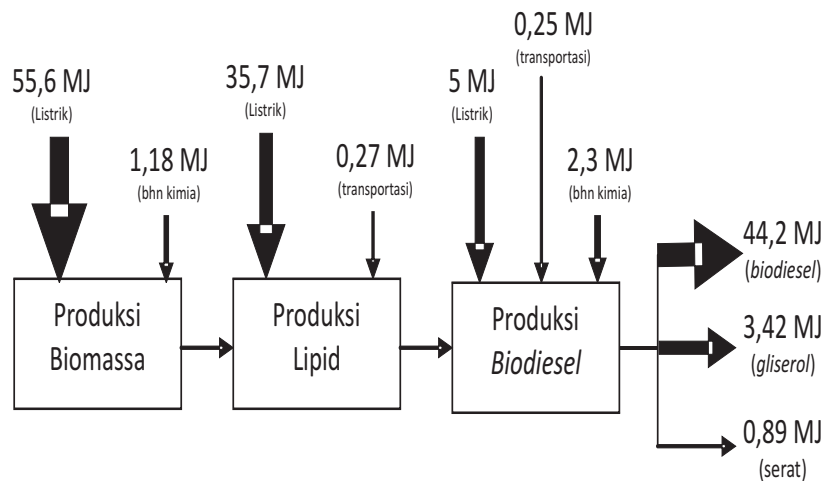
Dari hasil analisis komposisi *input dan output* energi pada Tabel 1, dapat dirangkum siklus energi pada produksi *biodiesel* mikroalga pada Gambar 3. Tahapan produksi *biodiesel* mikroalga terdiri dari proses produksi biomassa, produksi lipid dan produksi *biodiesel*. Pada tahap produksi biomassa, energi *input* sebagai energi listrik yang dibutuhkan sekitar 55,6 MJ/kg *biodiesel* dipakai untuk menggerakkan generator untuk suplai gas CO<sub>2</sub>, menggerakkan *pedal wheel* dan pompa untuk pemanenan. Tingginya energi input pada tahap ini harus ditekan untuk meningkatkan nilai NER dan NEB. Beberapa upaya yang perlu dilakukan antara



lain, mengganti *pedal wheel* dengan kincir angin, dan menggunakan teknik pemanenan secara alami dengan pengendapan. Pada tahap produksi lipid, energi *input* juga didominasi oleh energi listrik untuk keperluan proses awal ekstraksi yakni pemecahan dinding sel. Dalam upaya menghemat energi, harus dicarikan metode yang lebih efisien untuk dapat menggantikan proses pemecahan dinding sel secara fisik. Total energi output pada produksi *biodiesel* adalah 45,7 MJ dengan perincian energi output

seperti disajikan dalam Gambar 4. Total energi output disuplai oleh energi yang dihasilkan dari gliserol dan serat yang masing-masing berkontribusi sebesar 3,42 MJ dan 0,89 MJ. Berdasarkan data di atas, maka nilai NEB produksi *biodiesel* mikroalga berharga negatif yaitu -59,59, sedangkan nilai *NER biodiesel* murni dan *NER biodiesel* dengan produk samping sebesar 0,42 dan 0,43.

Nilai NEB negatif menandakan bahwa energi



Gambar 3. Siklus energi produksi biodiesel mikroalga

input dari proses produksi *biodiesel* mikroalga lebih besar dibanding total energi outputnya. Sedangkan nilai *NER* dibawah angka 1 berarti bahwa upaya produksi *biodiesel* dari mikroalga belum menguntungkan, banyaknya energi fosil yang digunakan tidak sebanding dengan *biodiesel* yang dihasilkan.

Rendahnya nilai *NEB* dan *NER* ini mengindikasikan bahwa biomassa mikroalga masih belum efisien dan ekonomis bila dijadikan sebagai bahan baku *biodiesel*. Namun demikian, nilai *NEB* dan *NER* dari produksi *biodiesel* mikroalga masih bisa ditingkatkan misalnya dengan upaya memperbaiki produktivitas biomassa mikroalga, mengefisienkan penggunaan energi listrik dan bahan bakar fosil, memanfaatkan limbah untuk proses produksi misalnya limbah metanol dapat diolah dan dipakai lagi dalam proses produksi.

Upaya lain untuk meningkatkan nilai *NEB* dan *NER* adalah menambah variasi produk samping seperti produksi gas, dan pemanfaatan limbah biomas untuk keperluan ekonomis yang lain. Hasil perhitungan nilai *NER* pada penelitian ini tidak jauh berbeda nilainya dengan penelitian lain seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Beberapa jenis mikroalga yang diujicoba sebagai bahan *biodiesel* memberikan nilai *NER* berkisar 0,07-0,9. Meskipun nilai *NER* pada biomassa mikroalga rendah, namun tidak

mengurangi upaya peneliti dalam usahanya untuk mencapai agar biomassa mikroalga dapat menjadi salah satu alternatif bahan *biodiesel*. Beberapa alasan yang mendasari antara lain pasokan biomassa alga untuk produksi *biodiesel* lebih terjamin dan berkelanjutan, dibandingkan dengan biomassa tanaman darat seperti sawit atau biji jarak, selain keunggulan perannya dalam mitigasi gas rumah kaca, yang turut memperlebar peluang biomassa mikroalga sebagai bahan utama *biodiesel* di masa depan.

Tabel 2. Nilai *NER* pada beberapa penelitian lain

Jenis Mikroalga	NER	Sumber data
<i>Chlorella vulgaris</i>	0,35	Stephenson <i>et al.</i> , 2010
<i>Chlorella vulgaris</i>	0,98	Lardon <i>et al.</i> , 2009
<i>Haematococcus pluvaris</i>	0,25–0,54	Razon and Tan, 2011
<i>Nannochloropsis sp.</i>	0,09–0,12	Razon and Tan, 2011
<i>Nannochloropsis sp.</i>	0,07	Jorquera <i>et al.</i> , 2010

#### 4. KESIMPULAN

Konsumsi energi yang terbesar pada produksi *biodiesel* mikroalga terjadi pada tahap budidaya yakni sekitar 55 MJ atau hampir lebih dari 50% dari total energi input. Nilai NEB dan NER produksi *biodiesel* mikroalga relatif rendah yakni berkisar 59,59, dan 0,42. Rendahnya nilai NEB dan NER ini menyebabkan biomassa mikroalga sulit bersaing dengan biomassa lain untuk menjadi kandidat bahan baku *biodiesel* di masa mendatang. Beberapa upaya untuk meningkatkan nilai NEB dan NER antara lain memperbaiki produktivitas biomassa, meng-efisienkan penggunaan energi listrik dan bahan bakar fosil, memanfaatkan limbah untuk proses produksi lanjutan dan menambah variasi produk samping untuk meningkatkan nilai ekonomis.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, R.A., 2005. *Algal culturing techniques*. Elsevier Academic Press. P589.
- Chisti, Y., 2007. *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnol Adv.*, 25. 294–306.
- Ehimen, E.A., Sun, Z.F., Carrington, C.G., 2009. *Variable affecting the in situ transesterification of microalgae lipids*. *Fuel Jurnal*, 89. 677-684.
- Engelhaupt, E., 2007. *Biofuelling water problem*. *Environmental Science and Technology*, 15
- Hackney, J., Neufville, R., 2001. *Life cycle model of alternative fuel vehicles: emissions, energy, and cost trade-offs*. *Transport Res Part A*, 35(3). 243–66.
- ISO Environmental Standard ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework, 1997. [Http://www.ce.cmu.edu/~hsm/lca2006/readings/iso14040.pdf](http://www.ce.cmu.edu/~hsm/lca2006/readings/iso14040.pdf)
- Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E.A., Embirucu, M., Ghirardi, M.L., 2010. *Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomassa production in open ponds and photobioreactors*. *Bioresour Technol*, 101. 1406–1413.
- Kementerian Energi Sumberdaya Mineral, 2012. *Handbook of Energy and economic Statistic of Indonesia*. Center for Data and Information on Energy and Mineral Resources Ministry of Energy and Mineral Resources, p.121.
- Khoo, H.H., Sharatt, P.N., Das, P., Balasubramanian, R.K., Narahariseti, P.K., Shaik, S., 2012. *Energy and CO2 analysis of microalgae to biodiesel: preliminary result and comparisons*. *J. Biortech* 2011. Doi:10.1016/j.biortech. 2011.02.02.055.
- Lardon, L., Helias, A., Sialve, B., Steyer, J.P., Bernard, O., 2009. *Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae*. *Environmental science and technology* 43(17). 6475-6481.
- Nguyen, T.L.T., Gheewala, S.H., Garivait, S., 2008. *Full chain energy analysis of fuel etanol from cane molasses in Thailand*. *Appl Energy*, 85. 722–734.
- Nguyen, T.L.T., Gheewala, S.H., Garivait, S., 2007. *Full chain energy analysis of fuel etanol from cassava in Thailand*. *Environ Sci Technol*, 41(11). 4135–4142.
- Pleanjai, S., Gheewala, S.H., 2009. *Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand*. *Applied Energy*, 18. 209-214.
- Razon, L.F., and Tan, R.R., 2011. *Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from microalgae: Haematococcus pluvialis and Nannochloropsis*. *Applied Energy*, 88. 3507-3514.
- Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., Shapouri, H., 1998. *An overview of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus*. National Renewable Energy Laboratory.
- Searchinger, et. al., 2008. *Use of USA cropland for biofuels increases green house gases through emissions from land use change*. *Science*, 319 (5867). 1238-1240.
- Scott, S.A., Davey, M.P., Dennis, J.S., Horst, I., Howe, C.J., Lea-Smith, D J., and Smith, A.G., 2010. *Biodiesel from algae: challenges and prospects*. *Current Opinion in Biotechnology*, 21. 227–286.
- Wiyarno, B., 2009. *Bahan bakar alternatif generasi ketiga Biodiesel Mikroalga*. Indoalgaetech consultant press. p.138