

MIKROALGAE SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN YANG RAMAH LINGKUNGAN

Sarmidi Amin

Peneliti di Pusat Teknologi Agroindustri – Kedeputian TAB
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

Abstract

Microalgae as biomass are a potential source of renewable energy and they can be converted into energy such as biofuel oil and gas. This paper presents a brief review on the main conversion process of microalgae becoming energy. Since microalgae have high water content, then not all biomass energy conversion processes can be applied. By using thermochemical process it can be produced oil and gas, and by using biochemical process it can be produced ethanol and biodiesel. The properties of microalgae product is almost similar to offish and vegetables oil and therefore it can be considered as a substitute of fossil oil.

Keywords: Biofuel; Oil production; Microalgae; Thermochemical; Biochemical

1. LATAR BELAKANG

Ada dua isu penting saat ini yaitu krisis bahan bakar minyak (BBM) dan pemanasan global. Penggunaan bahan bakar fosil dipercaya akan meningkatkan pemanasan global. Penggunaan energi biomassa diketahui dapat menurunkan emisi gas CO₂. Ada beberapa sumber energi biomassa yang sedang dikembangkan di beberapa negara. Penggunaan ganggang (*microalgae*) sebagai salah satu bahan baku mempunyai prospek cerah karena mikroalgae mudah dibudidayakan dan dapat memproduksi lebih banyak dibanding bahan baku lainnya.

Pemanasan global dipengaruhi oleh peningkatan konsentrasi gas akibat pengaruh rumah kaca di atmosfer dan sekarang menjadi perhatian masyarakat dunia¹⁾. Untuk mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer dapat dilakukan metoda berikut²⁾:

- 1). Pengurangan penggunaan bahan bakar fosil

- 2). Pengurangan CO₂ dari atmosfer, misalnya dengan Penghijauan kembali hutan yang telah gundul
- 3). Mengurangi CO₂ dari cerobong asap sebelum dilepas ke atmosfer

Telah diketahui secara luas bahwa energi biomassa mempunyai kontribusi sebagai penyedia sumber energi di berbagai kegiatan di pedesaan^{3,4)}. Bio-massa dihasilkan dari beberapa tanaman atau dari limbah perkebunan⁵⁾, bahkan sampah rumah tangga dan industri dapat digunakan sebagai bahan⁶⁾.

Menurut Shay, bahan bakar⁷⁾, mikroalgae adalah bahan yang mempunyai efisiensi fotosintetik terbesar dibanding biomassa lainnya. Oleh karena itu jika kita dapat mengekstrak minyaknya secara efisien, maka ganggang dapat dijadikan sumber pengganti BBM,^{3,8)}. Penyerapan CO₂ dan produksi energi dari ganggang diharapkan dapat mengurangi krisis

energi^{9,10}). Telah diketahui pula bahwa CO₂ adalah sumber untuk pertumbuhan ganggang¹¹). dengan menggunakan mikroalga, selain CO₂ dalam udara dapat dikurangi, dengan konversi biologi atau termokimia akan diperoleh minyak^{11,12}). Mikroalga mengandung lipid dan asam lemak (*fatty acids*) sebagai komponen membran, *storage products*, *metabolites* dan sumber energi¹¹).

Makalah ini membahas beberapa metoda mengkonversi ganggang menjadi bahan bakar cair dan gas, biodiesel dan bioethanol.

2. KONVERSI ENERGI BIOMASSA

Keuntungan pengembangan mikroalga sebagai sumber biomassa ada-lah¹³):

- 1). Ganggang dianggap suatu sistem biologi yang sangat efisien dalam memanfaatkan energi matahari untuk memproduksi senyawa organik.
- 2). Ganggang adalah tanaman non-vascular, kurang memreproduksi organ-organ kompleks.
- 3). Banyak spesies ganggang yang menghasilkan komponen yang berharga secara komersial seperti protein, karbohidrat, *lipid* dan *pigmen*.
- 4). Ganggang adalah mikro-organisma yang mengalami pemecahan sel secara sederhana.
- 5). Ganggang dapat tumbuh di laut atau air tawar.
- 6). Ganggang dapat beradaptasi dari berbagai tingkat operasional.

Ganggang adalah tumbuhan yang mengandung minyak tertinggi. Ia dapat menghasilkan 100.000 liter minyak per ha per tahun, sementara sawit, kelapa, jarak dan bunga matahari masing-masing hanya menghasilkan 5.950, 2.689, 1.413, dan 952 liter per ha per tahun¹⁴).

Aquatic Species Program (ASP) menganggap ada 3 produk utama bahan bakar dari biomassa¹⁵) yaitu gas methan, ethanol dan biodiesel. Sebenarnya masih ada yang keempat yaitu pembakaran langsung terhadap ganggang dan

menghasilkan uap atau listrik, tetapi ASP tidak menaruh perhatian pada masalah ini.

Beberapa macam ganggang mempunyai kandungan minyak melebihi 80% dari berat kering biomasnya^{16,17}) dan menurut *oilgae*¹⁴), ada beberapa yang mempunyai minyak 15-40% (berat kering), sementara *palm kernel* mempunyai 50%, kopra sekitar 60%, bunga matahari 55%. Kadar minyak sendiri diperkirakan sekitar 64.4% dari *total lipid*¹⁸).

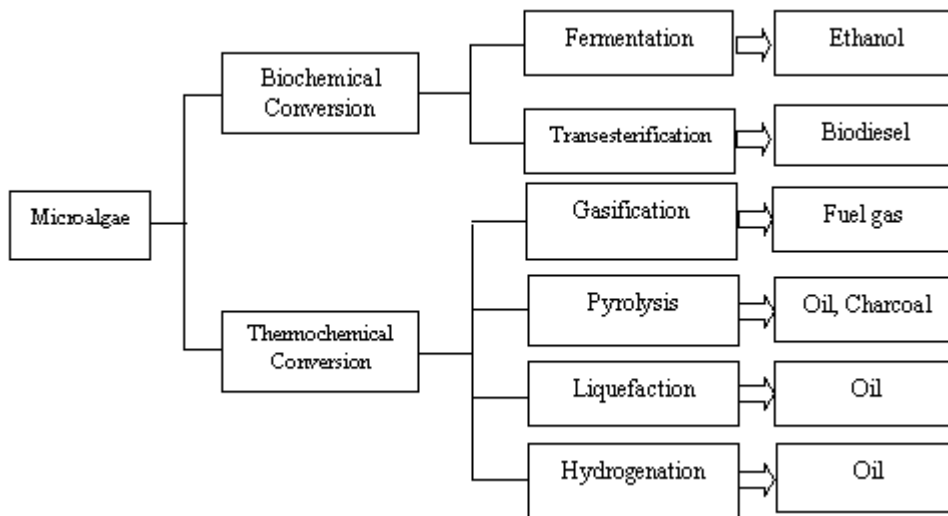
Konversi energi biomassa menjadi minyak adalah dengan metoda biokimia, termokimia dan pembakaran lang-sung^{4,19}). Konversi biokimia lebih lanjut dapat dibagi menjadi fermentasi, *anaerobic digestion*, *bioelectrochemical fuel cells*, dan menggunakan meta-bolisma dari organisma. Konversi termokimia dapat dibagi menjadi gasifikasi, pirolisa dan *liquefaction*. Gambar 1 menunjukkan proses konversi energi dari mikroalga. Biomassa dapat juga dikonversi menjadi 3 produk utama, dua hubungannya dengan energi dan satu sebagai *feedstock* kimia⁵).

Diketahui bahwa mikroalga mengandung air dalam jumlah yang banyak (80-90%)¹⁶); oleh karena itu tidak semua metoda proses konversi energi dari biomassa dapat dipakai terhadap bahan ini. Sebagai contoh, pembakaran langsung hanya bagus dilakukan jika kandungan air dibawah 50%. Kandungan air yang tinggi hanya cocok untuk konversi secara biologis⁵).

3. PRODUKSI MIKROALGAE

3.1 Budidaya

Ganggang dapat dibudidayakan dalam berbagai sistem²⁰). Untuk skala kecil atau skala laboratorium, budidaya menggunakan fermentor atau foto-bioreaktor^{11,21}) atau tanki air berbentuk kotak¹¹). Fermentor menggunakan lampu fluorezen sebagai pengganti sumber sinar matahari, dengan derajat iradiasi sekitar 10,000 lx atau 20,000 lx¹¹) atau menggunakan distributor sinar lainnya²¹).



Gambar 1. Konversi Energi Mikroalga

Keuntungan penggunaan fotobioreaktor adalah dapat menyerap panas matahari dan mengurangi kontaminasi²¹. Untuk yang berskala besar, mikroalga dapat ditumbuhkan pada sistem kolam terbuka atau tertutup^{21, 22}. Yang termasuk kolam terbuka alami adalah danau, situ, parit dan kolam terbuka buatan misalnya kolam atau kontainer. Yang sering digunakan adalah *shallow big ponds*, tanki, kolam melingkar (*circular ponds*) dan kolam pacu (*raceway ponds*)^{21, 22}.

Tubular photobioreactor adalah tipe yang cocok dipasang diluar rumah. *Tubular photobioreactors* biasanya terbuat dari gelas atau plastik transparan dan airnya disirkulasi dengan pompa atau sistem hembusan udara (*air lift system*)²¹. *Tubular photobioreactors* mempunyai keuntungan yaitu dapat didirikan pada tempat terbuka, dapat dioperasikan dengan konsentrasi biomassa yang tinggi dan terjaga dari kontaminan dari udara lingkungan²³ dan dapat memproduksi biomassa ganggang dalam skala industri¹⁶. Tabung *solar collector* biasanya berdiameter sekitar 0.1 m atau kurang. Diameter tabung dibatasi karena sinar tidak dapat menembus terlalu dalam pada ganggang yang tebal dan

produktivitas photobioreaktor yang tinggi¹⁷. Tabung gelas atau plastik yang dipasang berdiri dapat diganti dengan selang plastik yang dililitkan pada rangka dan membentuk *helical coil tubular photobioreactor*¹⁷.

3.2 Panen dan prosesing

Ganggang dapat dipanen menggunakan *microscreens*, sentrifugasi, atau dengan cara penggumpalan (*flocculation*). *Alum* dan *ferric chloride* adalah bahan kimia untuk penggumpalan ganggang saat panen²⁴. Bahan penggumpal lain adalah *chitosin*^{24,25}. Panen dengan bahan penggumpal dianggap metoda yang mahal pada skala industri. Cara yang lebih murah adalah dengan menghentikan asupan CO₂ sehingga mikroalga akan menggumpal sendiri. Hal ini disebut dengan *auto-flocculation*²⁴. Ganggang yang akan diproses dengan cara *liquefaction* dapat dipanen dengan separator sentrifugal⁷.

Minyak dari ganggang dapat diekstrak dengan beberapa cara^{24,26}:

- 1). Ganggang dikeringkan dan di-press.
- 2). Minyak dapat diekstrak dengan bahan kimia seperti benzene, ether atau heksan. Metoda ini dapat

dikombinasikan dengan press dingin. Kombinasi proses tersebut dapat mengeluarkan lebih dari 95% total minyak yang ada dalam ganggang.

- 3). Ekstrak dengan enzim.
- 4). *Osmotic shock* adalah mengurangi tekanan osmotik dengan tiba-tiba; dimana hal ini dapat menyebabkan rusaknya sel.
- 5). Pada metoda superkritikal, CO₂ dicairkan dengan tekanan dan pemanasan sampai titik dimana material bersifat cair dan gas. Fluida yang dicairkan kemudian bertindak sebagai pelarut dalam mengekstrak minyak.
- 6). Minyak dari ganggang dapat juga di ekstrak dengan metoda lain²⁷⁾. Ganggang di hancurkan dengan alat menjadi bubuk dan dikeringkan selama 20 menit pada 80°C dalam inkubator untuk menghilangkan air. Heksan dan pelarut ether lainnya dicampur dengan bubuk ganggang dan diekstrak menjadi minyak, kemudian dicampur selama 24 jam untuk pengendapan.

4. KONVERSI ENERGI

4.1 Konversi Thermokimiawi

4.1.1 Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses yang berlangsung pada temperatur tinggi (800-900°C) dan oksigen yang terbatas, namun ada juga yang beroperasi pada suhu rendah²⁸⁾. Peneliti Elliot mengem-bangkan metoda gasifikasi katalitik temperatur rendah dengan kandungan air yang sangat tinggi²⁹⁾. Biomassa dengan kandungan air yang sangat tinggi dapat digasifikasi secara langsung menjadi gas metan tanpa pengeringan lebih dulu. Jika ditambah dengan nitrogen maka akan menjadi amonia selama terjadi reaksi²⁸⁾.

4.1.2 Liquefaction

Mikroalgae hasil panen dengan sentrifugasi akan mempunyai kandungan air yang tinggi sehingga cocok untuk bahan baku proses *liquefaction*^{11,16)}. Gambar 2 adalah skematis proses *liquefaction*^{7,11,30,-33)}. *Liquefaction* terjadi pada temperatur 300°C dan tekanan 10 MPa tanpa pengurangan gas hidrogen dan atau karbon monoksida⁷⁾.

Liquefaction dilakukan di dalam *autoclave stainless steel* yang dilengkapi dengan pengaduk. Ganggang dimasukkan ke reaktor kemudian diikuti dengan gas nitrogen dan dipanaskan pada temperatur tertentu. Suhu dijaga konstan selama 5 sampai 60 menit dan diikuti dengan proses pendinginan. Hasil reaksi diekstrak dengan *dichloromethane* untuk memisahkan fraksi minyak. Hasil ekstraksi dipisahkan dan diuapkan pada suhu 35°C dibawah pengaruh tekanan rendah dan menghasilkan material lunak berwarna coklat gelap lunak (*dark-brown viscous*). Hasil ekstrak tersebut kemudian difiltrasi^{7,11)}.

4.1.3 Prolisa

Pirolisa adalah proses merubah biomassa menjadi bahan bakar dengan cara pembakaran pada kondisi sangat minim udara dengan suhu sekitar 500°C^{5,34)} dan diberi katalisator³⁵⁾, mempunyai laju pemanasan yang tinggi (10³ -10⁴ K/s) dan waktu tinggal gas yang sangat pendek untuk merusak rantai molekul sehingga menjadi pendek dan kemudian didinginkan dengan cepat³⁶⁾.

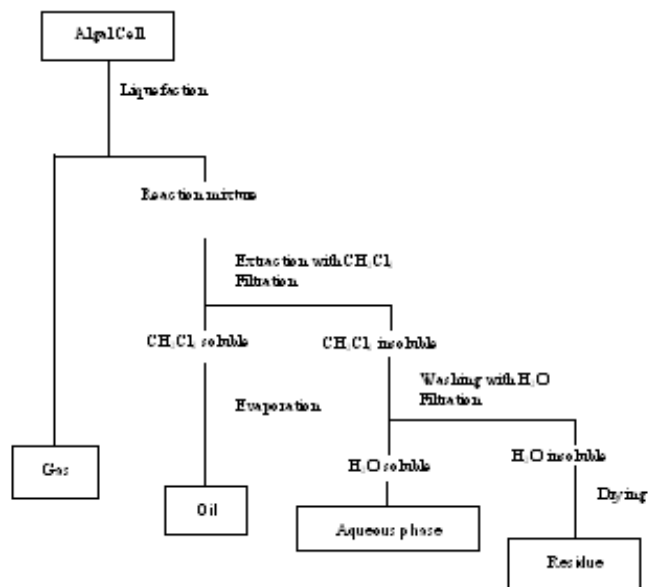
Proses pirolisa ada yang berjalan lambat dan ada pula yang berjalan cepat. Keuntungan proses yang berjalan cepat adalah diperoleh bahan bakar cair secara langsung³⁷⁾ dan efisiensi konversi sampai 80%. Prinsip dari pirolisa cepat *fluidized bed* dapat dilihat pada gambar 3³⁷⁾.

4.1.4. Hidrogenasi

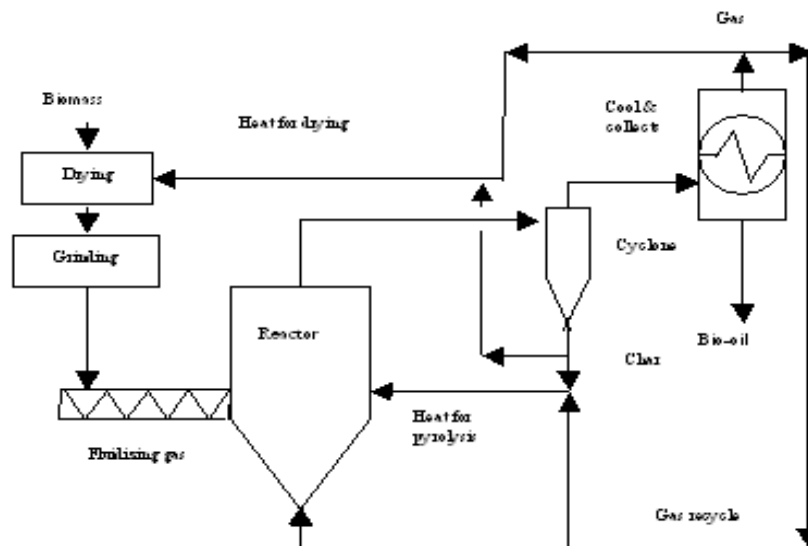
Hidrogenasi adalah reaksi kimia yang terjadi dengan penambahan hidrogen (H₂)

dan menggunakan kata-lisator³⁸⁾. Proses hidrogenasi ganggang dapat dilakukan dengan suhu dan tekanan tinggi. Pada

proses ini ada tiga fase bahan yaitu fase gas (hidrokarbon dan hidrogen), fase cair (campuran pelarut dan produk cair), fase padat (ganggang dan katalis)¹¹⁾.



Gambar 2. Skematis Separasi Ganggang Secara *Liquefaction*



Gambar 3. Prinsip Proses Pirolisis Cepat

4.2 Konversi Biokimia

4.2.1 Fermentasi

Fermentasi ganggang dapat menghasilkan ethanol. Adapun tahapan prosesnya adalah budidaya mikroalga, pemanenan, *slurry preparation*, fermentasi, dan proses separasi ethanol⁹⁾.

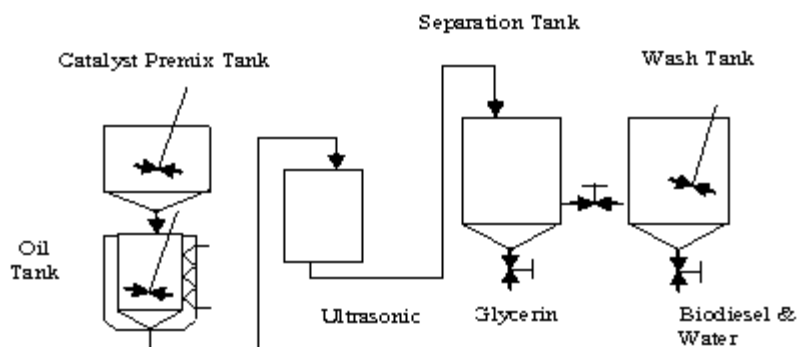
Peneliti lain³⁹⁾ memproduksi ethanol dengan fermentasi dalam kondisi gelap terhadap ganggang laut hijau *Chlorococcum littorale*. Pada kondisi gelap dan anaerobic, 27% *cellular starch* dikonsumsi selama 24 jam pada 25°C. *Cellular starch* didekomposisi lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi dan akan diperoleh ethanol, asetat, hidrogen dan karbon dioksida. Produktivitas maksimum ethanol adalah 450 g/mol/g-berat kering pada suhu 30°C.

4.2.2 Transesterifikasi

Transesterifikasi adalah reaksi lemak atau minyak dengan alkohol dan membentuk ester dan gliserol atau gliserin³⁵⁾. Untuk reaksi biasanya diberi katalisator asam atau basa³⁵⁾, homogen atau heterogen⁴⁰⁾. Hasil transesterifikasi adalah biodiesel. Agar supaya diperoleh

produksi yang tinggi, alkohol yang digunakan harus dalam jumlah yang berlebih (*excess*)⁴¹⁾.

Proses produksi biodiesel adalah relatif mudah. Beberapa situs mengajarkan cara pembuatannya, misalnya *journey to forever*⁴²⁾, *biodiesel techno-logies India*⁴³⁾, dan *dangerous labora-tories*⁴⁴⁾. Gambar 4 adalah skematis proses produksi biodiesel. Langkah pertama adalah pengurangan kadar air dari minyak dengan cara peningkatan temperatur minyak sampai 120°C selama beberapa menit. Setelah itu, minyak didinginkan. Bersamaan dengan itu, melakukan pencampuran sodium hidrok-sida dan methanol, dengan cara pengadukan sampai menjadi larutan sodium methoksida. Minyak dipanaskan kembali sampai sekitar 60°C dan kemudian larutan sodium methoksida dicampurkan ke minyak dan diaduk selama 30 menit. Setelah selesai pengadukan, biarkan larutan menjadi dingin dan memisah. Proses separasi berlangsung sekitar 15-60 menit. Methyl ester (ME) atau biodiesel akan berada di lapisan atas, gliserin akan berada di bagian bawah. Tahap terakhir adalah melakukan pencucian, pengeringan dan pengujian kualitas.



Gambar 4. Skematis proses produksi biodiesel

5. HASIL PROSES KONVERSI

5.1. Gasifikasi

Gasifikasi akan menghasilkan gas bakar seperti H₂, CH₄, CO₂, dan ammo-nia.

Gas tersebut mempunyai nilai kalor yang rendah (sekitar 4-6 MJ/N m³) dan dapat terbakar secara langsung atau dibakar sebagai bahan bakar turbin gas atau sebagai bahan baku gas sintetis pada industri kimia⁵⁾.

5.2 Liquefaction

Menurut FAO hasil *liquefaction* mikroalgae adalah minyak berat atau ter dengan produksi (*yield*) 35.6%¹¹⁾, atau dalam kisaran 31-44%⁷⁾ atau kisaran 30-40%¹⁹⁾. Minyak berat tersebut terdiri dari karbon (73%), hidrogen (9%), nitrogen (5%), dan oksigen (13%). Nilai kalor (*heating value*) minyak berat adalah 34.7 kJ/g, atau hampir sama dengan minyak berat tipe C. Minyak berat ganggang mempunyai kekentalan 860 cps, atau hampir sama dengan minyak jarak (*castor oil*). Minyak berat ini mempunyai kandungan nitrogen yang lebih tinggi dari minyak bumi, sehingga membutuhkan perlakuan khusus agar tidak terjadi pembentukan N_{ox} pada sistem gas buangnya.

Minowa⁷⁾ melaporkan bahwa produksi minyak dengan metoda *direct hydrothermal liquefaction* kira-kira 37% (*organic basis*) pada suhu 300°C dan 10 MPa dari

5.3 Pirolisa

Proses pirolisa akan menghasilkan bahan bakar yang dapat digunakan pada mesin dan turbin gas atau sebagai bahan baku industri⁵⁾ atau digunakan pada mesin diesel³⁵⁾. Minyak yang diperoleh mempunyai nilai kalor 17 MJ/kg atau lebih rendah dari bahan bakar konvensional yaitu sekitar 42-44 MJ/kg³⁷⁾. Menurut Miao³⁴⁾, nilai kalor minyak dari ganggang rata-rata adalah 29 MJ/kg, atau kira-kira 1,4 kali nilai kalor kayu.

5.4 Hidrogenasi

Ganggang dapat dirubah menjadi hidrokarbon cair pada suhu 400-430°C, dengan tekanan 7-14 MPa, dan katalisator *cobalt molybdate*. Produksi tertinggi diperoleh 46.7 wt %. Sebagai tambahan, sekitar 10 wt% produk cair dan 34 wt% gas kaya hidrokarbon. Pada umumnya, suhu tinggi dan lebih lama waktu reaksinya akan

Tabel 1. Produksi Methan dan Karbon Dioksida ini pada Proses *Liquefaction*³¹⁾

Holding time (min)	Na ₂ CO ₃ dosage (wt.%)	Reaction temp (°C)	Gas volume (l)	Concentration (ppm)	
				CH ₄	CO ₂
30	0	300	1.1	56	625
	0	340	1.1	376	1250
	5	300	1.4	31	625
	5	340	1.5	227	1300
60	0	300	1.7	65	250
	0	340	1.5	352	1300
	5	300	1.5	74	750
	5	340	1.8	283	650

mikroalgae jenis *Dunaliella tertiolecta* yang berkadar air 78.4 wt%. Minyak diperoleh pada suhu reaksi 340°C dan berlangsung selama 60 menit dan mempunyai kekentalan 150-330 mPass dan nilai kalor 36 kJ/g. Pada riset yang serupa, minyak yang diperoleh dari *Botryococcus braunii*, produksi maksimum 64% (dari berat kering) dengan suhu proses 300°C dan katalisator sodium karbonat^{16,45)}.

meningkatkan derajat konversinya dan mengurangi produksi ter. Produksi dan konversinya akan meningkat proporsional dengan tekanan hidrogen sampai maksimum 8.2 MPa¹¹⁾. Peneliti lain menggunakan temperatur dan tekanan sangat tinggi akan menghasilkan produksi sampai mendekati 50%¹⁹⁾.

Tabel 2. Perbandingan Sifat Minyak Bumi dan Bio-oil dari Proses Pirolisa Cepat Kayu dan Mikroalga³⁴⁾

Properties	Typical value		
	Bio-oils		Fossil oil
	Wood	Microalgae	
C	56.4%	61.52%	83.0-87.0%
H	6.2%	8.50%	10.0-14.0%
O	37.3%	20.19%	0.05-1.5%
N	0.1%	9.79%	0.01-0.7%
S	n.d. ^a	n.d.	0.05-5.0%
Density	1.2 kg l ⁻¹	1.16 kg l ⁻¹	0.75-1.0 kg l ⁻¹
Viscosity (Pas)	0.04-0.20 (at 40°C)	0.10 (at 40°C)	2-1000 (depends on temperature, density and its contents etc.)
Heating value	21 MJ kg ⁻¹	29 MJ kg ⁻¹	42 MJ kg ⁻¹
Stability	Not as stable as fossil fuels	Not as stable as fossil fuels, but more stable than the bio-oil from wood	

^a n.d. : not determined

5.5. Fermentasi

Dari proses fermentasi mikroalga akan diperoleh ethanol. Ethanol dapat digunakan sebagai bahan bakar (100%) atau sebagai gasohol atau campuran gasolin dan ethanol. Sebagai contoh mesin *Flex-Fuel* di Brazilia dapat berkerja dengan baik dengan 100% ethanol, 100% gasoline atau campuran keduanya, sedang di Amerika *US Flex-Fuel Vehicle* dapat berkerja pada 0% sampai 85% ethanol (15% gasolin)⁴⁶⁾.

Energi dari ethanol adalah 31.1 MJ/kg dan bilangan oktannya 129, sementara itu energi dari gasolin adalah 44.4 MJ/kg dan bilangan oktan minimum 91 dan gasohol (90% gasolin dan 10% ethanol) adalah 33.7 MJ/liter dan bilangan oktan 93/94⁴⁶⁾. Ethanol dapat juga digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik *direct-ethanol fuel cell*^{46,47)}. Ethanol ada juga yang digunakan sebagai bahan bakar roket⁴⁶⁾.

5.6 Transesterifikasi

Konversi *triglycerides* atau minyak menjadi biodiesel sekitar 98%⁴⁸⁾ atau lebih tinggi⁴⁹⁾ dan digunakan sebagai bahan bakar

alternatif mesin diesel. Spesifikasi standar biodiesel B100 (100%) adalah ASTM D6751^{44,50,51)}. Sifat fisik dari biodiesel dibanding dengan solar adalah seperti terlihat dalam Tabel 3.

Produk sampingan dari proses transesterifikasi adalah pembentukan sabun dan gliserin. Untuk mengurangi pembentukan sabun, peneliti menggunakan metoda superkritikal tanpa katalisator⁵³⁾. Banyaknya gliserin yang terbentuk, menurut aturan (*rule of thumb*)^{54,42)} adalah sebesar 79 ml per liter minyak yang digunakan, tetapi kenyataan perolehannya berkisar 80-120 ml per liter minyak.

6. KESIMPULAN

Ganggang adalah sumber energi terbarukan yang sangat potensial dalam penyerapan CO₂. Ganggang dapat dibudidayakan dalam photobioreaktor atau ditempat terbuka (*open ponds*).

Produksi mikroalga per tahun (*yield*) minyak tertinggi dibanding dengan hasil

perkebunan lainnya seperti kelapa, sawit, jarak dan bunga matahari. Kadar minyak ganggang 15-40% berat kering, tetapi ada juga yang sampai 80%. Kandungan minyaknya dapat diperkirakan sekitar 64.4% dari komponen *lipid* total. Untuk mengekstrak minyak, dapat dilakukan dengan berbagai metoda.

3. Sawayama S, T. Minowa, S.Y. Yokoyama, 1999; Possibility of renewable energy production and CO₂ mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae. J Biom Bioen 17: 33-39.

Tabel 3. Perbandingan Sifat-sifat Biodiesel, Diesel Fuel dan Standar ASTM ⁵²⁾

Properties	Biodiesel from microalgae oil	Diesel fuel ^a	ASTM biodiesel standard
Density (kg L ⁻¹)	0.864	0.838	0.86-0.90
Viscosity (mm ² s ⁻¹ , cSt at 40°C)	5.2	1.9-4.1	3.5-5.0
Flash point (°C)	115	75	Min 100
Solidifying point (°C)	-12	- 50-10	-
Cold filter plugging point (°C)	-11	-3.0 (max -6.7)	Summer max 0 Winter max ≤ - 15
Acid value (mg KOH g ⁻¹)	0.374	Max 0.5	Max 0.5
Heating value (MJ kg ⁻¹)	41	40-45	-
H/C ratio	1.81	1.81	-

^a The data about diesel fuel was taken from published literature as indicated in the text.

Proses gasifikasi menghasilkan gas seperti H₂, CH₄, CO₂, dan ammonia, sedang dari proses pirolisa akan dihasilkan biofuel. *Biofuel* dapat digunakan pada turbin gas atau sebagai bahan baku industri *refineries*. Produk fermentasi akan menghasilkan ethanol. Ethanol dapat digunakan sebagai bahan bakar (100% alkohol) atau gasohol. Dengan proses transesterifikasi, ganggang dapat dikonversi menjadi biodiesel.

DAFTAR PUSTAKA

1. Watanabe Y, DO. Hall. 1996; Photosynthetic CO₂ conversion technologies using a photobioreactor incorporating microalgae-energy and material balances. J. En Conv Mgmt 37, 6-8: 1321-26.
2. Benemann JR. 1997, CO₂ mitigation with microalgae systems. J En Conv Mgmt; 38: S475-79.
3. Sawayama S, T. Minowa, S.Y. Yokoyama, 1999; Possibility of renewable energy production and CO₂ mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae. J Biom Bioen 17: 33-39.
4. Tsukahara K, S. Sawayama. 2005; Liquid fuel production using microalgae. J Jpn Petro Inst 48, 5: 251-59.
5. McKendry P., 2003; Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. Biores tech 83: 47-54.
6. Minowa T, M. Murakami, Y. Dote, T. Ogi, S. Yokoyama, 1995; Oil production from garbage by thermochemical liquefaction. J Biom Bioen 8, 2: 117-20.
7. Minowa T, S. Yokoyama, M. Kishimoto, T. Okakurat, 1995; Oil production from algal cells of *Dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction. J Fuel 74, 12: 1735-38.
8. Tsukahara K, T. Kimura, T. Minowa, S. Sawayama, T. Yagishita, S. Inoue, T. Hanaoka, Y. Usui, T. Ogi, 2001; Microalgal cultivation in a solution recovered from the low temperature catalytic gasification of the microalga. J Biosci & Bioengin 91, 3: 311-13.

9. Hirayama S, R. Ueda, Y. Ogushi, A. Hirano, Y. Samejima, KH. Nami, S. Kunito, 1998; Ethanol production from carbon dioxide by fermentative microalgae. In: Inui T, Anpo M, Izui K, Yanagida S, Yamaguchi T, editors. *Advances in Chemical Conversions for Mitigating Carbon Dioxide, Studies in Surface Science and Catalysis* 114, Elsevier Science BV: 657-60.
10. Hirano A, R. Ueda, S. Hirayama, 1997; CO₂ fixation and ethanol production with microalgal photo-synthesis and intracellular anaerobic fermentation. *Energy* 22, 2/3:137-42.
11. FAO, Oil production, FAO Corp Doc Repository. Retrived on 05/02/2007 from www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm.
12. Yang YF, CP. Feng, Y. Inamori, T. Maekawa, 2004; Analysis of energy conversion characteristics in liquefaction of algae. *Res Cons Recycl*43: 21-33.
13. Vonshak A, 1990; Recent advances in microalgal biotechnology. *Biotech. Adv.* 8: 709-27.
14. Oilgae. Algal oil yields. Retrived on 07/18/2008 from <http://www.oilgae.com/algae/oil/yield/yield.html>.
15. Sheechan J, T. Dunahay, J. Benemann, P. Roessler, 1998, A look back at the U.S. Depart of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae NREL/TP-580-24190.
16. Patil V, KQ. Tran, HR. Giselrod, 2008; Toward sustainable production of biofuels from microalgae. *Int J Mol Scie* 9: 1188-95.
17. Christi Y, 2007; Biodiesel from microalgae. *Biotech Adv* 25: 294-06.
18. Hill AM, DA. Feinberg, 1984, Fuel from microalgae lipid products, to be presented at the Energy from Biomass: Building on a Generic Technology Base. Second Tech Rev Meeting 23-25 April, Portland-Oregon.
19. Satin M. Microalgae. Retrieved on 06/16/2008 from <http://www.fao.org/ag/ags/Agsi/MICROALG.htm>.
20. Scragg AH, AM. Ilman, A. Carden, SW. Shales, 2002; Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor. *Biom Bioene* 23: 67-73.
21. Ugwu CU, H. Aoyagi, H. Uchiyama, 2008, Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Biores Tech*; 99: 4021-28.
22. Borowitzka MA, 1999; Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes, and fermenters. *J Biotech* 70: 313-12.
23. Torzillo G, B. Pushparaj, F. Bocci, W. Balloni, R. Materassi, G. Florenzano. 1986; Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors. *Biomass* 1: 61-74.
24. Wikipedia. Algaculture. Retrieved on 02/27/2007 from <http://en.wikipedia.org/wiki/Algaculture>.
25. Morales J, J. Noûe, G. Picard, 1985; Harvesting marine microalgae species by chitosan flocculation. *Aquacull Engin* 4: 257-70.
26. Oilgae. Algae oil extraction. Retrieved on 02/27/2007 from <http://www.oilgae.com/algae/oil/extract/extract.html>.
27. Hossain ABMS, A. Salleh, 2008; Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *Am J Bioche Biotech* 4 (3): 250-54.
28. Minowa T, S. Sawayama, 1999; A novel microalgal system for energy production with nitrogen cCycling. *Fuel* 78: 1213-15.
29. Elliot DC, LJ. Sealock, 1999; Chemical processing in high-pressure aqueous environments: low temperature

- catalytic gasification. Trans. IChemE 74: 563-66.
30. Minowa T, T. Kondo, ST. Sudirjo, 1998; Thermochemical liquefaction of Indonesian biomass residues. Biom Bioen 14, 5/6: 517-24.
 31. Yang Y.F, CP. Feng, Y. Inamori, T. Maekawa, 2004; Analysis of energy conversion characteristics in liquefaction of algae. Res Cons Recycl 43: 21-33.
 32. Murakami M, S. Yokoyama, T.Ogi, K. Koguchi, 1990; Direct liquefaction of activated sludge from aerobic treatment of effluents from the cornstarch industry. Biom 23: 215-28.
 33. Itoh S, A. Suzuki, T. Nakamura, S. Yokoyama, 1994; Production of heavy oil from sewage sludge by direct thermochemical liquefaction. Desal 98: 127-33.
 34. Miao X, Q Wu, C Yang, 2004; Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels. J. Anal. Appl. Pyrolysis 71: 855-63.
 35. Agarwal AK. 2007, Biofuel (alcohol and biodiesel) applications as fuel for internal combustion engine. Prog Ener Comb Scie; 33: 233-71.
 36. Qi Z, C. Jie, W. Tiejun, X Ying, 2007; Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. En Conv Mngt 48: 87-92.
 37. Bridgwater AV, GVC Peacocke, 2000; Fast pyrolysis processes for biomass. Renew Sust Energy Rev 4: 1 – 73.
 38. Wikipedia. Hydrogenation, Retrieved on 07/02/200 from <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogenation>.
 39. Ueno Y, N. Kurano, S. Miyachi, 1998; Ethanol production by dark fermentation in the marine green alga, *Chlorococcum littorale*. J Ferm Bioengi 86 No.1: 38-43.
 40. Pintoa AC, LLN. Guarieiroa, GMJC. Rezendea, NM Ribeiroa, EA Torresb, WA. Lopesc, PAP Pereirac, JB Andrade, 2005; Biodiesel: an overview. J Braz Chem Soc 15, 5B: 1313-30.
 41. Schuchardt U, R. Sercheli, RM. Vargas, 1998; Transesterification of vegetable oils a review. J Braz Chem Soc 9, 1: 199-210.
 42. Journey to forever. Make your own biodiesel. Retrieved on 02/02/2006 from <http://journeytoforever.org/>.
 43. Anonymous. Biodiesel technology. Retrieved 07/12/2005 from <http://biodieseltchnologiesindia.com/production.html>.
 44. Anonymous. Biodiesel. Retrieved 05/08/2006 from <http://www.dangerouslaboratories.org/biodiesel.html>.
 45. Sawayama S, S. Inoue, Y. Dote, S. Yokoyama, 1995; CO₂ fixation and oil production through microalga. En Convers Mgmt 36, 6-9: 729-731.
 46. Wikipedia, Ethanol, Retrieved on 06/13/2008 from <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethanol>,
 47. Bently J, R. Derby, Ethanol & fuel cells: converging paths of opportunity. Renewable Fuels Association. Retrieved on 07/24/2008 from http://www.ethanolrfa.org/objects/documents/129/rfa_fuel_cell_white_paper.pdf,
 48. Nouredini H, D. Harkey, V.A. Medikonduru, 1998; Continuous process for the conversion of vegetable oils into methyl esters of fatty acids. JAOCS 75, 12: 1775-83.
 49. Anderson D, D. Masterson, B. McDonald, L. Sullivan, 2003; Industrial biodiesel plant design and engineering: practical experience. Presented at the Chemistry and Technology Conference. International Palm Oil Conference (PIPOC), 24-28 August, Putrajaya Mariot Hotel, Malaysia. Retrieved on 06/

- 07/2007 from <http://www.crowniron.com/userImages/Biodiesel.pdf>.
50. He BB, AP. Singh, JC. Thomson; A Novel continuous-flow reactor using reactive distillation technique for biodiesel production. Retrieved on 11/01/2007 from <http://www.webpages.uidaho.edu/~bhe/RD/RD.htm>
 51. Gerpen JV, Biodiesel production and fuel quality. Retrieved on 08/23/2007 from <http://www.uidaho.edu/bioenergy/biodieselED/publication/01.pdf>
 52. Xu H, X Miao, Q Wu, 2006; High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. J Biotech 126: 499-507.
 53. Kusdiana D, S. Saka, Biodiesel fuel for fuel substitute prepared by a catalyst-free supercritical methanol. Retrieved on 01/11/2007 from <http://bioproducts-bioenergy.gov>.
 54. Svlele. Transesterification biodiesel process. Retrieved on 12/12/2006 from www.svlele.com/biodiesel-process.htm.