

# PELUANG DAN TANTANGAN PRODUKSI MIKROALGA SEBAGAI *BIOFUEL*

Jamal Basmal<sup>\*)</sup>

## ABSTRAK

*Biofuel* yang berasal dari tanaman darat atau laut seperti mikroalga sudah mulai diupayakan untuk menjadi energi alternatif pengganti minyak bumi. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa minimal 14 spesies mikroalga berpotensi untuk menghasilkan *biofuel* dengan kandungan minyak antara 15–77% dari bobot kering mikroalga. Untuk menghasilkan 1 kg (bk) *biomassa* diperlukan media tumbuh air laut sebanyak 1m<sup>3</sup>. Di samping kandungan minyaknya dapat diekstrak, limbah padatnya juga dapat dipergunakan untuk pakan ternak atau bahan baku fermentasi untuk menghasilkan *biomethane*. Tantangan yang dihadapi dalam meningkatkan produksi *biomassa* mikroalga adalah ketersediaan karbon dioksida. Selain itu, dalam proses ekstraksi juga diperlukan suatu alat yang dapat memecah dinding sel mikroalga sehingga kandungan minyaknya dapat diekstrak semaksimal mungkin.

**KATA KUNCI:** *mikroalga, biofuel*

## PENDAHULUAN

Penggunaan energi fosil seperti minyak bumi untuk keperluan industri dan otomotif telah menghasilkan gas karbon dioksida, sulfur dioksida, asap, dan zat-zat lain yang menjadi penyebab terjadinya *global warming* dan *climate change*. Di samping itu, ketersediaan minyak bumi sebagai energi tak terbarukan di perut bumi semakin berkurang dan telah berdampak pada krisis ekonomi. Untuk mengatasi hal tersebut, banyak pakar di bidang energi mencari sumber energi alternatif terbarukan sebagai pengganti minyak bumi.

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan intensitas cahaya matahari yang cukup tinggi, mempunyai prospek potensial untuk mengembangkan energi terbarukan. Telah diketahui bahwa alam perairan Indonesia kaya akan mikrolaga yang mampu memproduksi *bioenergy* seperti *biodiesel*, *bioethanol*, *biomethane*, dan *biohydrogen*. Hasil penelitian para pakar telah menemukan bahwa minimal 14 spesies mikroalga potensial untuk menghasilkan *biodiesel* dengan kandungan minyak di dalamnya berkisar antara 15–77% bobot kering (Chisti, 2007). Kelebihan mikroalga sebagai sumber *bioenergy* adalah sistem budidayanya yang sederhana dan tidak memerlukan teknologi tinggi. Syarat yang terpenting adalah di lokasi pembudidayaan tersedia intensitas cahaya matahari dan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroalga. Di samping itu, sistem pemanenan dapat dilakukan secara berkelanjutan (setiap hari). Perkiraan *biomassa* yang dihasilkan untuk 1 m<sup>3</sup> media tanam adalah 1 kg *biomassa* berat kering. Berdasarkan estimasi tersebut, maka lahan

1ha yang setara dengan 10.000 m<sup>2</sup> akan menghasilkan 10.000 kg *biomassa* dan apabila dilakukan ekstraksi, akan diperoleh *biodiesel* antara 1.500 s/d 7.700 L (Chisti, 2007). Oleh karena itu, jika ditinjau dari kemampuan menghasilkan *biodiesel*, maka dimasa depan mikroalga mempunyai prospek yang layak untuk dikembangkan sebagai substitusi minyak bumi yang keberadaannya semakin berkurang. *Biofuel* yang diproduksi dari mikroalga termasuk ramah lingkungan. Selain itu, mikroalga dalam masa pertumbuhannya dapat memanfaatkan kelebihan karbon dioksida di udara sehingga mempunyai dampak positif menurunkan efek rumah kaca akibat *global warming* dan *climate change* (Chisti, 2007).

## POTENSI MIKROALGA SEBAGAI SUMBER *BIOFUEL*

Anon. (2001) menerangkan bahwa tanpa menghitung kebutuhan minyak diesel, maka kebutuhan bahan bakar bensin/premium Indonesia adalah sebanyak 16.103.453 kilo liter (kl), sedangkan produksi Pertamina hanya sebesar 12.000.000 kl. Oleh sebab itu, Amhar (2007) menyatakan bahwa saat ini pemerintah menggalakkan tanaman jarak pagar (*Jatropha* sp.) untuk *biofuel*. Kandungan minyak dalam *Jatropha* sp. adalah sekitar 1.400 liter/hektar/tahun. Kandungan ini hanya seperempat dari minyak dalam kelapa sawit (6.000 liter/hektar/tahun). Jika energi nabati (jarak/sawit) diharapkan dapat menggantikan kebutuhan minyak bumi yakni sekitar 1,2 juta barrel/hari atau 69 milyar liter/tahun, maka diperlukan lahan seluas 49 juta hektar. Namun dari 107 juta ha lahan pertanian Indonesia, lahan kritis

<sup>\*)</sup> Peneliti pada Balai Besar Riset Pengolahan Produk dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan

yang tersedia hanyalah seluas 21,9 juta ha (BPS 2003). Oleh karena itu, tak heran jika sebagian masyarakat keberatan untuk menanam jarak pagar. Kalaupun ada lahan kritis yang dianggap berpeluang, maka umumnya terdapat masalah teknis di lapangan yaitu ketika seorang petani ingin mengolah lahan yang luas dan sulit diakses. Di samping itu, terkadang masih ada persoalan hukum tentang kepemilikan tanah tersebut, sekalipun termasuk kategori lahan kritis. Kalaupun akhirnya dapat menanam, proses pascapanen dan penjualan minyak jarak juga masih tanda tanya. Substitusi minyak bumi dengan minyak nabati seperti minyak kelapa sawit, jagung, kedelai, jarak, limbah penggorengan, *canola oil*, dan minyak hewan tidak hanya dilakukan di Indonesia tetapi juga telah dilakukan di Amerika Serikat (Felizardo *et al.*, 2006, Kulkarni & Dalai, 2006, Barnwal & Sharma, 2005). Namun, oleh karena kebutuhan energi semakin meningkat, maka substitusi dengan minyak yang telah disebutkan di atas belum mencukupi. Selain itu, untuk mendapatkan minyak nabati dari jagung, kedelai, jarak, dan sawit dibutuhkan waktu yang cukup lama, yaitu berkisar antara 3 bulan–5 tahun, agar tanaman tersebut produktif menghasilkan minyak.

Pohon jarak sebagai penghasil minyak jarak sudah mulai dibudidayakan di Indonesia. Namun, masih banyak kendala yang ditemui di lapangan, seperti tingkat kematangan buah jarak dalam satu pohon tidak seragam. Di samping itu, pendirian pabrik penyulingan minyak jarak membutuhkan minimal lahan seluas 10.000 ha yang akan menghasilkan minyak sebanyak 1.892.000 liter (Chisti, 2007). Proses pemanenan biji jarak harus dilakukan secara selektif karena tingkat

kematangan biji jarak dalam satu pohon tidak sama. Sebaliknya, mikroalga dapat menghasilkan minyak dalam kisaran antara 1.500–7.700 liter/hektar/panen, sedangkan umur panen untuk satu siklus panen antara 5–7 hari. Hal ini menunjukkan bahwa menggantungkan substitusi minyak dari buah jarak secara ekonomis kurang menguntungkan. Sementara itu, menggantungkan substitusi minyak dari minyak jagung, kedelai, dan minyak kelapa sawit akan berbenturan dengan kepentingan konsumsi pangan manusia dan apabila minyak tersebut tetap diproduksi untuk mensubstitusi minyak bumi harganya tidak kompetitif. Sebaliknya, persaingan minyak yang diproduksi dari mikroalga hampir tidak ada. Pada Tabel 1 dapat dilihat luas lahan yang dibutuhkan untuk menghasilkan *biodiesel* sebanyak 16.103.453 kl/tahun yang merupakan kebutuhan Indonesia (Anon., 2001) sebagai pengganti minyak bumi yang digunakan untuk otomotif.

Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa untuk menghasilkan minyak dari mikroalga sebesar 16.103.453 kl/tahun hanya dibutuhkan lahan seluas 274 ha, jika estimasi produksi minyak dari mikroalga adalah sebesar 587.000 l (asumsi 30% minyak di dalam *biomassa* berat kering). Oleh karena itu, pengembangan mikroalga sebagai sumber bahan baku minyak pengganti minyak bumi mempunyai prospek yang dapat diandalkan. Pada Tabel 2 dapat dilihat persentase kandungan minyak di dalam mikroalga dalam bobot kering. Pertumbuhan mikroalga cenderung mengikuti pertumbuhan eksponensial dan umumnya dalam waktu yang relatif singkat, yakni selama 3,5 jam telah meningkat 2 kali

Tabel 1. Perbandingan persentase kandungan minyak dari berbagai sumber dan estimasi kebutuhan lahan untuk memproduksi sebanyak 16.103.453 kl minyak

No	Jenis tanaman	Rendemen minyak (l/Ha)*	Kebutuhan lahan produksi ** (Ha)
1	Jagung	172	93.625.000
2	<i>Canola</i>	446	36.106.000
3	Kedele	1.190	13.532.000
4	Jarak	1.892	8.511.000
5	Kelapa	2.689	5.989.000
6	Sawit	5.950	2.706.000
7	Mikroalga <sup>a</sup>	136.900	118.000
8	Mikroalga <sup>b</sup>	587.000	274.000

Sumber: \*) Chisti, 2007. <sup>a</sup>) Asumsi 70% minyak dalam *biomassa* berat kering, <sup>b</sup>) Asumsi 30% minyak dalam *biomassa* berat kering

\*\*\*) Anon, 2001. Prediksi kebutuhan untuk memproduksi minyak sebanyak 16.103.543 kl per tahun

Tabel 2. Beberapa mikroalga yang potensial menghasilkan minyak

No	Jenis mikroalga	Kandungan minyak (% bk*)
1	<i>Botryococcus braunii</i>	25–75
2	<i>Chlorella</i> sp.	28–32
3	<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
4	<i>Cylindrotheca</i> sp.	16–37
5	<i>Dunaliella primolecta</i>	23
6	<i>Isochrysis</i> sp.	25–33
7	<i>Monallanthus salina</i>	> 20
8	<i>Nannochloris</i> sp.	20–35
9	<i>Nannochloropsis</i> sp.	31–68
10	<i>Neochloris oleoabundans</i>	35–54
11	<i>Nitzschia</i> sp.	45–47
12	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20–30
13	<i>Schizochytrium</i> sp.	50–77
14	<i>Tetraselmis sueica</i>	15–23

Sumber: Chisti, 2007

dari jumlah *biomassa* awal (Metting, 1996 dan Spolaore *et al.*, 2006). Pada spesies tertentu, kandungan minyak mikroalga dapat mencapai 80% dari bobot kering (Metting, 1996; Spolaore *et al.*, 2006). Akan tetapi, dalam kondisi normal kandungan minyak mikroalga berkisar antara 20–50%. Kelebihan lain dari budidaya mikroalga adalah dapat dipanen setiap hari.

Optimalisasi ekstraksi kandungan minyak tidak hanya didasarkan pada pemilihan spesies mikroalga yang potensial menghasilkan kandungan minyak tinggi. Akan tetapi juga perlu diperhatikan faktor-faktor seperti kualitas air (suhu, salinitas, dan tingkat kejernihan air), nutrisi yang diberikan, serta

keberadaan sinar matahari dalam proses fotosintesis. Menurut Banerjee *et al.* (2002), Metzger & Largeau, (2005), dan Guschina & Harwood, (2006), setiap mikroalga memproduksi hidrokarbon, minyak, dan minyak kompleks lainnya yang bervariasi baik jumlah dan kualitasnya, sehingga tidak semua minyak dari mikroalga cocok untuk biodiesel tetapi mungkin cocok untuk keperluan lainnya. Pada Gambar 1 dapat dilihat mikroalga yang cukup potensial menghasilkan minyak.

### PRODUKSI MASSAL MIKROALGA

Produksi massal mikroalga akan sangat mahal apabila unsur utama seperti karbon dioksida dan sinar



*Spirulina* sp.

*Nitzschia* sp.

*Nannochloropsis* sp.

Sumber: Anon., 2008

Gambar 1. Jenis mikroalga yang potensial menghasilkan minyak *biodiesel*.

matahari tidak tersedia. Oleh sebab itu, faktor utama untuk memproduksi massal mikroalga adalah ketersediaan karbon dioksida dan intensitas sinar matahari yang cukup. Adanya pemanasan bumi *global warming* dan *climate change* akibat aktivitas industri dan otomotif telah menyebabkan kelimpahan karbon dioksida di udara. Indonesia telah merasakan dampak dari penumpukan karbon dioksida di udara, oleh sebab itu produksi massal mikroalga merupakan hal yang positif untuk mengatasi penumpukan karbon dioksida. Produksi massal mikroalga di Indonesia dapat dilakukan sepanjang tahun, tidak seperti negara-negara subtropis yang dingin yang hanya dapat melakukan produksi pada waktu tertentu. Selain itu, nutrisi yang dibutuhkan untuk produksi massal mikroalga adalah nitrogen, fosfor, zat besi, dan dalam beberapa kasus budidaya juga diperlukan silikon. *Nutrient* seperti fosfor harus disuplai berlebih karena fosfor yang diberikan umumnya dalam bentuk kompleks. Oleh karena air laut kaya akan nitrat dan fosfor serta *mikronutrient* lainnya, maka penggunaannya untuk produksi massal sangat dianjurkan (Molina *et al.*, 1999). Pada Tabel 3 dapat dilihat kebutuhan *nutrient* untuk pertumbuhan mikroalga.

*Biomassa* dari mikroalga mengandung 50% karbon per bobot kering dan semua karbon di dalam mikroalga berasal dari karbon dioksida (Sanchez *et al.*, 2003).

Selanjutnya dinyatakan pula bahwa untuk memproduksi 100 ton *biomassa* dibutuhkan 183 ton karbon dioksida. Untuk menghasilkan *biomassa* secara komersial maka karbon dioksida harus disuplai secara terus menerus agar jumlah dan kualitas mikroalga yang dihasilkan tetap terjamin (Molina *et al.*, 1999). Pemberian pupuk pada malam hari harus dihentikan. Akan tetapi, pada saat itu *biomassa* tetap harus disirkulasi untuk menghindari terjadinya penumpukan *biomassa* di bagian permukaan air. Diperkirakan sebanyak 25% dari *biomassa* yang dihasilkan pada siang hari akan hilang pada waktu malam hari karena faktor respirasi. Oleh sebab itu, pada waktu malam hari area budidaya harus disuplai dengan sinar lampu dan suhu dijaga antara 20–30°C (Chisti, 2007). Ada beberapa metode produksi massal *biomassa* yang telah dilakukan, salah satunya adalah metode *raceway* (berbentuk saluran air yang memanjang dengan sistem tertutup) seperti terlihat pada Gambar 2.

### PASCAPANEN MIKROALGA

Para pakar *biomassa* berpendapat bahwa curah hujan yang sedikit, kisaran suhu antara 20–30°C, dan intensitas cahaya matahari yang stabil merupakan kondisi yang baik untuk pertumbuhan mikroalga

Tabel 3. Kebutuhan karbon, nitrogen, dan fosfor untuk memproduksi 1 ton *biomassa* bobot kering

No	Kebutuhan	Jumlah (kg/hari)
1	Karbon	786
2	Karbon dioksida	2881
3	Nitrogen	81
4	Fosfor	11

Sumber: Anon., 2008



Foto bioreaktor



Raceways

Sumber: Anon., 2008

Gambar 2. Sistem foto bioreaktor dan *raceway* untuk produksi massal *biomassa*.

(Chisti, 2007). Selain itu, lokasi yang ideal untuk produksi massal *biomassa* sebaiknya dekat dengan sumber karbon dioksida seperti di lokasi industri pengolahan, pengolahan limbah cair, dan pembangkit listrik “*power plant*”. *Biomassa* yang sedang dikembangkan harus dapat diatur sistem pemanenannya secara berkelanjutan. Mengingat ukuran *biomassa* sangat kecil (mikron), maka proses pemanenannya dilakukan menggunakan filter di bawah 1 mikron atau menggunakan sentrifugasi, flokulasi, dan sistem aerasi sehingga air membentuk busa kemudian alum (polialuminium klorida) dan feroklorida ( $\text{FeCl}_2$ ) ditambahkan pada saat pemisahan *biomassa*. Pemisahan *biomassa* juga dapat pula dilakukan dengan metode ultrasonikasi. *Biomassa* yang sudah dipanen selanjutnya dikeringkan terlebih dahulu sebelum melakukan proses ekstraksi.

Pemanfaatan minyak hasil pemisahan dari mikroalga sangat bervariasi, mulai untuk tujuan kesehatan sampai dengan biodiesel. Oleh sebab itu, teknik ekstraksi yang dilakukan juga berbeda tergantung dari tujuan penggunaannya. Metode yang paling sederhana adalah dengan cara penghancuran (*mechanical crushing*) kemudian dilakukan pengepresan dengan menggunakan *screw press*, *expeller press*, atau *piston press*, bahkan pemisahan juga dapat dilakukan dengan cara kombinasi pengepresan dan penambahan bahan kimia pengekstrak. Ada beberapa cara pemisahan kandungan minyak dari *biomassa* yakni:

- *Pemisahan secara kimia*

Proses ini umumnya menggunakan benzena, eter, dan heksana. Penggunaan benzena sebagai pelarut minyak mikroalga harus dilakukan secara hati-hati karena uap benzena yang terserap dapat menyebabkan keracunan. Benzena telah diklasifikasikan sebagai bahan karsinogenik (Anon., 2008). Limbah hasil ekstraksi (media pelarut) seperti heksana dan petroleum eter harus dapat di daur ulang agar biaya ekstraksi menjadi lebih murah.

- *Ekstraksi secara enzimatis*

Cara ini menggunakan enzim untuk memecahkan dinding sel mikroalga. Proses pemecahan ini dapat pula menggunakan bantuan air sebagai media pelarut enzim. Namun, ekstraksi menggunakan enzim membutuhkan biaya yang relatif lebih mahal daripada menggunakan heksana. Proses ekstraksi secara enzimatis dapat dikombinasikan dengan pemisahan secara ultrasonikasi. Kombinasi ini disebut *sonoenzymatic treatment*. Dengan cara ini, ekstraksi akan memperoleh rendemen minyak yang lebih tinggi dan lebih cepat.

- *Pemisahan secara fisik*

Proses ini dilakukan dengan cara mengeringkan mikroalga terlebih dahulu kemudian dilakukan pengepresan. Teknik pemisahan minyak dapat menggunakan *filter press*, *screw press*, atau *piston press* dengan tekanan tertentu. Untuk mempercepat proses pengeluaran minyak dari dinding sel mikroalga maka proses kombinasi antara bahan kimia dan *mechanical press* lebih disarankan.

- *Osmotic shock*

Cara ini menggunakan tekanan osmotik secara tiba-tiba/mendadak yang menyebabkan dinding sel mikroalga pecah.

- *Supercritical fluid*

Metode ini umumnya menggunakan  $\text{CO}_2$  cair di bawah tekanan dan suhu tertentu yang kemudian dialirkan ke massa mikroalga sehingga minyak di dalam sel mikroalga dapat diekstrak. Metode ini dapat mengekstrak minyak dari dalam mikroalga hingga 100% (Anon., 2008).

- *Pemisahan dengan teknik ultrasonikasi*

Cara ini menggunakan gelombang ultrasonik untuk memecahkan dinding sel mikroalga sehingga kandungan minyak di dalam sel mikroalga dapat ditarik keluar (Anon., 2008).

## TANTANGAN

Mikroalga merupakan sumber energi terbarukan yang dapat mensubstitusi sebagian energi fosil. Namun, *biomassa* dalam memperbanyak diri memerlukan pemupukan yang tepat dan karbon dioksida yang banyak terdapat pada sisa pembakaran. Diperlukan sebuah bioreaktor karbon dioksida untuk memperoleh karbon dioksida di udara atau pada sisa pembakaran seperti pembangkit listrik tenaga batubara.

Selain itu, oleh karena minyak di dalam *biomassa* berada di dalam dinding sel, maka diperlukan suatu alat khusus yang dapat memecah dinding sel untuk menarik minyak keluar.

## PENUTUP

Di samping diekstrak minyaknya untuk tujuan pangan maupun non pangan (produk kosmetik dan kesehatan), mikroalga juga telah digunakan untuk industri lain seperti pembangkit tenaga listrik “*bioenergy*”. Selain itu, limbah ekstraksi minyak masih dapat digunakan untuk memproduksi gas metana atau etanol melalui proses fermentasi. Limbah dari hasil

proses fermentasi tersebut juga dapat digunakan untuk pakan ternak.

Kemajuan teknologi yang telah mengkonsumsi begitu banyak energi fosil seperti minyak bumi, terproduksi karbon dioksida, sulfur dioksida, asap, dan zat-zat lain telah berdampak pada terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim dunia. Untuk menghindari hal-hal tersebut, maka telah dicoba mencari energi alternatif dari minyak nabati seperti, minyak kelapa sawit, jarak pagar, jagung, dan kedelai. Namun, penggunaan minyak kelapa, kedelai, sawit, dan biji-bijian menyebabkan terjadinya kompetisi antara kebutuhan energi dan pangan. Di sisi lain, untuk memproduksi minyak nabati dari bahan-bahan yang disebutkan di atas akan membutuhkan lahan yang cukup luas, sementara lahan kritis di Indonesia tidak mencukupi. Alternatif lain adalah memanfaatkan mikroalga yang dapat memproduksi *biofuel*, karena produksi minyak dari mikroalga lebih banyak dibandingkan minyak nabati. Hal ini sangat potensial mengingat pengembang biakan mikroalga tidak memerlukan teknologi yang tinggi karena hidup mikroalga sangat tergantung pada intensitas cahaya dan ketersediaan nutrisi. Selain itu, mikroalga juga dapat dipanen setiap hari.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amhar. 2007. Energi terbarukan. <http://famhar.multiply.com/journal/item/86>. Diakses tanggal 11 Februari 2008.
- Anonim. 2001. Portofolio bahan bakar cair. Program Studi Teknik Kimia. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 65 p. Diakses tanggal 12 Februari 2008. [http://www.pertamina.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=79&Itemid=406](http://www.pertamina.com/index.php?option=com_content&task=view&id=79&Itemid=406).
- Anonymous. 2008a. Algae FAQ. [www.algaelink.com](http://www.algaelink.com). Diakses tanggal 4 Januari 2008.
- Anonymous. 2008b. Biodiesel from algae-info, resources and links. [biodieselnow.com](http://www.algaculture/biodieselnow.com). Diakses tanggal 4 Januari 2008.
- Anonymous. 2008c. *Microalgae*. <http://images.google.co.id/images?hl=id&q=spirulina&um=i&ie=UTF-8&sa=N&tab=wi>. Diakses tanggal 4 Januari 2008.
- Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y., and Banerjee, UC. 2002. *Botryococcus braunii*: a renewable source of hydrocarbons and other chemicals. *Crit Rev Biotechnol*, 22 : 245–79.
- Barnwal, B.K. and Sharma, M.P. 2005. Prospects of biodiesel production from vegetables oils in India. *Renew Sustain Energy Rev*. 9 : 363–78.
- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from Microalgae. Institute of Technology and Engineering, Massey University. *Biotechnology Advances* 25 (2007) 294–306.
- Felizardo, P., Correia, M.J.N., Raposo, I., Mendes, J.F., Berkemeier, R., and Bordado, J.M. 2006. Production of biodiesel from waste frying oil. *Waste Manag*. 26 (5) : 487–94.
- Guschina, I.A. and Harwood. J.L. 2006. Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Prog Lipid Res* 2006. 45 : 160–86.
- Kulkarni, M.G. and Dalai, A.K. 2006. Waste cooking oil an economical source for biodiesel: A review. *Ind Eng Chem Res* 2006; 45 : 2901–13.
- Metting, F.B. 1996. Biodiversity and application of microalgae. *J. Ind Microbiol*. 17 : 477–89.
- Metzger, P. and Largeau, C. 2005. *Botryococcus braunii*: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids. *Appl Microbiol Biotechnol*. 66 : 486–96.
- Molina., Grima, E., Acién., Fernández, F.G., García Camacho, F., and Chisti, Y. 1999. Photobioreactors: light regime, mass transfer and scaleup. *J. Biotechnol*. 70 : 231–47.
- Sánchez, Mirón, A., Cerón., García, M-C., Contreras, Gómez, A., García., Camacho, F., Molina., Grima, E., and Chisti Y. 2003. Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricorutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. *Biochem Eng J*. 2003. 16 : 287–97.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran E, Isambert A. 2006. Commercial applications of microalgae. *J Biosci Bioeng*;101:87–96.