
PENGEMBANGAN PERIKANAN, KELAUTAN, DAN MARITIM UNTUK KESEJAHTERAAN RAKYAT

Kumpulan Tulisan Pemikiran Guru Besar IPB

Editor:

Tridoyo Kusumastanto | Evy Damayanthi | Sri Lestari Angka
Mulia Purba | MF Rahardjo | Suprihatin | Euis Sunarti





Dewan Guru Besar
Institut Pertanian Bogor

PENGEMBANGAN PERIKANAN, KELAUTAN, DAN MARITIM UNTUK KESEJAHTERAAN RAKYAT

Kumpulan Tulisan Pemikiran Guru Besar IPB



Editor:

Tridoyo Kusumastanto | Evy Damayanthi | Sri Lestari Angka
Mulia Purba | MF Rahardjo | Suprihatin | Euis Sunarti



Penerbit IPB Press

IPB Science Techno Park,
Kota Bogor - Indonesia

C.01/12.2016

Judul Buku:

Pengembangan Perikanan, Kelautan dan Maritim untuk Kesejahteraan Rakyat Volume 1

Penyusun:

Penanggung jawab: Prof. Dr. Muh Yusram Massijaya
Tim Pengarah : Prof. Dr. Evy Damayanthi
 Prof. Dr. Hadi Susilo Arifin
 Prof. Dr. Rina Oktaviani
Ketua : Prof. Dr. Tridoyo Kusumastanto
Sekretaris : Prof. Dr. Evy Damayanthi
Anggota : Prof. Dr. Sri Lestari Angka
 Prof. Dr. Mulia Purba
 Prof. Dr. MF Rahardjo
 Prof. Dr. Suprihatin
 Prof. Dr. Euis Sunarti
Staf Pendukung : Muhammad Ridha Alfarabi Istiqlal, SP, M.Si
 Lukmanul Hakim Zaini, S.Hut., M.Sc
 Toyibatun, SE
 Tri Wahyu
 Wahyu Hidayat
 Sopar Jamil

Editor:

Prof. Dr. Tridoyo Kusumastanto
Prof. Dr. Evy Damayanthi
Prof. (Em.) Dr. Sri Lestari Angka
Prof. Dr. Mulia Purba
Prof. Dr. MF Rahardjo
Prof. Dr. Suprihatin
Prof. Dr. Euis Sunarti

Penyunting Tipografi:

Atika Mayang Sari, S.P

Desain Sampul:

Prof. Dr. Tridoyo Kusumastanto dan Agus Soleh

Penata Isi:

Ahmad Syahrul Fakhri, S.Ikom

Sumber foto sampul:

Dokumentasi PKSPL-IPB

Jumlah Halaman:

404 + 14 halaman romawi

Edisi/Cetakan:

Cetakan 1, Desember 2016

PT Penerbit IPB Press

Anggota IKAPI
IPB Science Techno Park
Jl. Taman Kencana No. 3, Bogor 16128
Telp. 0251 - 8355 158 E-mail: ipbpress@ymail.com

ISBN: 978-602-440-074-3

Dicetak oleh Percetakan IPB, Bogor - Indonesia

Isi di Luar Tanggung Jawab Percetakan

© 2016, HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit

SAMBUTAN REKTOR INSTITUT PERTANIAN BOGOR

Pertama saya sampaikan penghargaan setinggi-tingginya kepada Pimpinan dan Anggota Dewan Guru Besar (DGB) Institut Pertanian Bogor (IPB) yang selalu aktif dalam berbagai kegiatan, khususnya dalam mendiseminasikan gagasan dan pemikiran strategisnya. Buku adalah salah satu media yang ampuh untuk menyampaikan pesan melalui tulisan. Saya menyambut dengan harapan tinggi Buku "Pengembangan Perikanan, Kelautan dan Maritim untuk Kesejahteraan Rakyat" Volume 1. Buku ini sangat diperlukan oleh semua lapisan terutama bagi pemerintah yang sedang membangkitkan kembali kejayaan laut dan maritim di bumi Nusantara.

Pemikiran strategis Guru Besar IPB bertajuk perikanan, kelautan dan maritim ini sangat penting, kontekstual dan aktual. Pembangunan dengan basis perairan sangat prospektif bagi masyarakat Indonesia di waktu sekarang dan akan datang. Topik-topik tulisan yang dipublikasikan melalui buku ini merupakan hasil gagasan bernas dari para Guru Besar IPB.

Sudah sepantasnya pemerintah dan para pengambil keputusan mengacu pada gagasan dan pemikiran ini dalam pembangunan dan pengembangan perikanan, kelautan dan maritim. IPB sebagai perguruan tinggi tertua dan terkemuka di bidang perikanan dan kelautan di Indonesia memiliki hasil penelitian dan pengalaman ilmiah yang bisa dituangkan dalam karya buku. Dengan demikian, pengetahuan tersebut dapat diamalkan dan dikontribusikan pada pembangunan Negara dan Bangsa.

Semoga Dewan Guru Besar IPB tetap berperan dalam mewadahi gagasan dan pemikiran strategis para anggotanya. Buku-buku berikutnya tetap ditunggu oleh pembaca, tidak hanya oleh sivitas akademika di dalam kampus IPB, tetapi oleh seluruh masyarakat Indonesia. Jayalah IPB kita.

Bogor, Desember 2016

Rektor IPB,
Prof. Dr. Herry Suhardiyanto

SAMBUTAN KETUA DEWAN GURU BESAR INSTITUT PERTANIAN BOGOR

Perikanan, kelautan dan maritim merupakan topik yang sangat penting untuk diangkat pada tataran nasional karena negara kita didominasi oleh wilayah perairan. Dengan demikian, perikanan, kelautan dan maritim dalam bentuk sumberdaya maupun fungsi seyogianya dimanfaatkan sebaik-baiknya untuk meningkatkan kesejahteraan rakyat Indonesia.

Buku "Pengembangan Perikanan, Kelautan dan Maritim untuk Kesejahteraan Rakyat" merupakan hasil pemikiran dan gagasan dari para Guru Besar Institut Pertanian Bogor. Terdapat 39 artikel hasil penelitian, pemikiran dan pengalaman ilmiah yang terkumpul. Oleh karena itu, buku ini diterbitkan menjadi dua volume. Volume 1 memuat pemikiran dan gagasan yang mencakup: Arah pengembangan perikanan, kelautan dan maritim; Karakteristik ekosistem pesisir dan laut; Aspek sosial, ekonomi dan kelembagaan masyarakat pesisir; serta Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) kelautan. Tulisan-tulisan Guru Besar IPB pada buku ini diharapkan dapat menjadi sumbang karya pemikiran bagi para pembaca, khususnya pemerintah dan pengambil keputusan serta pihak terkait yang bertanggung jawab mengelola kebaharian nusantara.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pimpinan Komisi B "Pengembangan Keilmuan dan Pemikiran Strategis", Prof. Dr. Hadi Susilo Arifin dan Prof. Dr. Evy Damayanthi yang telah menggagas penulisan dan penerbitan buku ini. Gagasan tersebut diinisiasi sejak tahun 2014 pada masa DGB IPB dipimpin oleh Prof. Dr. Roedhy Poerwanto. Oleh karena itu, ucapan khusus terimakasih disampaikan kepada beliau. Apresiasi yang tinggi disampaikan kepada segenap Panitia *Ad Hoc* penulisan buku ini yang telah bekerja sangat keras, yang diketuai oleh Prof. Dr. Tridoyo Kusumastanto. Penghargaan juga disampaikan kepada eksekutif IPB, khususnya Prof. Dr. Herry Suhardiyanto, Rektor IPB yang telah mendukung penuh program diseminasi pemikiran strategis guru besar melalui penerbitan buku ini.

Terakhir dan tidak kalah penting, kami sampaikan tiada gading yang tak retak. Oleh karena itu, kami mohon maaf jika ada kekurangan dalam penyajian buku ini. Semoga dapat bermanfaat dalam memberikan kontribusi pemikiran bagi pembangunan.

Bogor, Desember 2016

Ketua Dewan Guru Besar IPB
Prof. Dr. Muh. Yusram Massijaya

PENGANTAR EDITOR

Indonesia diberkahi Tuhan YME dengan karunia wilayah pesisir, laut dan lautan yang memiliki potensi ekosistem, ekonomi dan sosial yang sangat besar untuk digunakan bagi kemakmuran dan kesejahteraan segenap rakyat, Bangsa dan Negara. Selain potensi sumberdaya pulih (*renewable*) dan tidak dapat pulih (*non renewable*), bangsa Indonesia juga memiliki wilayah yang strategis dalam percaturan ekonomi dan politik dunia karena berada di antara dua samudra, yakni Pasifik dan Hindia yang merupakan kawasan lintas aktivitas ekonomi dunia. Pengelolaan sumberdaya pulih (*renewable*) sangat ditentukan oleh ekosistem yang dikelola dengan baik dan didukung dengan teknologi yang ramah lingkungan maka akan menjamin keberlanjutan aktivitas perikanan. Pengelolaan perikanan akan dipengaruhi oleh aktivitas lainnya di antaranya wisata bahari, energi dan sumberdaya mineral (*non renewable*), industri maritim, perhubungan laut, bangunan laut (pelabuhan), jasa kelautan yang merupakan bidang kelautan sehingga diperlukan keterpaduan dari perencanaan sampai pemanfaatan yang optimal dan lestari di bidang kelautan serta perikanan merupakan penentu keberlanjutan laut karena sumberdaya pulih yang merupakan penciri khusus keberlanjutan laut. Dalam rangka membangun keterpaduan pembangunan tersebut diperlukan pemahaman yang komprehensif tentang maritim yang memayungi prinsip kedaulatan wilayah, persaingan global dan keberlanjutan negara dalam mengembangkan kelautan untuk kesejahteraan rakyat Indonesia.

Pengelolaan aktivitas perikanan, kelautan dan maritim tersebut memerlukan ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus menerus dikembangkan melalui pendidikan, penelitian dan pengabdian masyarakat. Institut Pertanian Bogor sebagai lembaga pendidikan tinggi yang terkemuka di bidang *OCEAN AND MARITIME* telah dan secara terus-menerus mengembangkan keilmuan tersebut dengan mencetak sumberdaya insani, mengembangkan penelitian untuk menghasilkan IPTEK maupun kebijakan serta pengabdian kepada masyarakat,

terpanggil untuk memberikan kontribusi yang lebih besar dalam pemikiran bagi pengembangan perikanan, kelautan dan maritim. Buku dengan judul "Pengembangan Perikanan, Kelautan dan Maritim untuk Kesejahteraan Rakyat" Volume 1 merupakan kumpulan tulisan pemikiran para Guru Besar IPB sebagai bunga rampai tulisan baik yang sudah maupun belum dipublikasikan sehingga dapat disusun menjadi suatu kesatuan pemikiran guna menuangkan gagasan bagi pengembangan wilayah pesisir, laut dan lautan secara terpadu dan lestari.

Disampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada Para penulis dan Tim editor yang terdiri dari Prof. Dr. Evy Damayanthi, Prof. (Em.) Dr. Sri Lestari Angka, Prof. Dr. Mulia Purba, Prof. Dr. M.F. Rahardjo, Prof. Dr. Suprihatin, Prof. Dr. Euis Sunarti. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada narasumber, yaitu Prof. Dr. Akhmad Fauzi, Prof. Dr. Didin S. Damanhuri, Prof. Dr. Indra Jaya, Prof. Dr. Roedhy Poerwanto, Prof. Dr. Hadi Susilo Arifin, dan Prof. Dr. Rina Oktaviani.

Semoga buku ini bermanfaat dalam meningkatkan pemahaman tentang IPTEK perikanan, kelautan dan maritim sehingga mampu mendorong terwujudnya kebijakan, pengelolaan, pemanfaatan dan pengembangan dalam pembangunan Negara Maritim berbasis sains (*scientific based development*) bagi kesejahteraan rakyat Indonesia. Selamat Membaca.

Bogor, Desember 2016

Ketua Tim Editor

Prof. Dr. Tridoyo Kusumastanto

DAFTAR ISI VOLUME I

Sambutan Rektor Institut Pertanian Bogor.....	v
Sambutan Ketua Dewan Guru Besar Institut Pertanian Bogor	vii
Pengantar Editor	ix
1. Pendahuluan	
<i>Tridoyo Kusumastanto</i>	1
2. Arah Pengembangan Perikanan, Kelautan dan Maritim	5
2.1. Membangun Negara Maritim	
<i>Tridoyo Kusumastanto</i>	9
2.2. Peran Bidang Perikanan Kelautan dan Maritim dalam Pembangunan Nasional	
<i>Akhmad Fauzi</i>	15
3. Karakteristik Ekosistem Pesisir dan Laut.....	27
3.1. Dinamika Pesisir dan Laut	
<i>Mulia Purba</i>	33
3.2. Keanekaragaman Hayati Ikan di Ekosistem Perairan Pantai	
<i>M. Fadjar Rahardjo</i>	47
3.3. Hutan Mangrove di Indonesia	
<i>Cecep Kusmana</i>	57
3.4. Urgensi Kawasan Konservasi Berbasis Ekosistem di Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil dalam Mendukung Keberlanjutan Pendayagunaan Sumberdaya Kelautan	
<i>Dietrich G. Bengen</i>	89

3.5. Peranan Penting Ekosistem Laguner terhadap Kelestarian Sumberdaya Perikanan di Kepulauan Seribu <i>Dedi Soedharma</i>	109	5.4. Pengelolaan Teknologi Trawl di Indonesia: Telaah Teknis untuk Menjelaskan Fenomena Jaring Cantrang dan Alat Tangkap Lain Sejenisnya <i>Ari Purbayanto</i>	339
3.6. Perlindungan Alur Ruaya Benih Sidat (Glass eel) di Kawasan Pantai <i>Ridwan Affandi</i>	123	5.5. Perkembangan Rumpon di Indonesia: dari Metode Konvensional ke Rumpon Non-Konvensional <i>Roza Yusfiandayani dan Indra Jaya</i>	359
3.7. Urgensi Perumusan dan Penilaian Indeks Kesehatan Laut Indonesia bagi Penguatan dan Pengembangan Poros Maritim Dunia <i>Indra Jaya dan Mujizat Kawaroe</i>	135	5.6. Peluang dan Pemanfaatan Air Mineral Laut Dalam untuk Mengurangi Krisis Air Minum <i>Bonar P. Pasaribu, Djisman Manurung, Suharno, dan Jonson Lumban Gaol</i>	371
4. Aspek Sosial, Ekonomi, dan Kelembagaan Masyarakat Pesisir	145		
4.1. Karakteristik Sosial-Ekonomi Masyarakat Pesisir <i>Tridoyo Kusumastanto</i>	151		
4.2. Konflik Sosial dan Kelembagaan Masyarakat Pesisir <i>Sumardjo dan Rilus A. Kinseng</i>	171		
4.3. Keterkaitan Sistem Sosio-Ekologi dalam Meningkatkan Nilai Ekonomi Ekosistem Lamun dan Sumberdaya Ikan <i>Luky Adrianto, Tridoyo Kusumastanto dan Yudi Wahyudin</i>	187		
4.4. Risiko Bencana di Wilayah Pesisir <i>Euis Sunarti</i>	207		
4.5. Pengembangan Sistem Penyuluhan Masyarakat Pesisir <i>Sumardjo dan Siti Amanah</i>	225		
4.6. Kemiskinan di Wilayah Pesisir <i>Euis Sunarti dan Ahmad Solihin</i>	253		
5. Pengembangan Iptek Kelautan	273		
5.1. Pengembangan Bioenergi Laut <i>Mujizat Kawaroe dan Suprihatin</i>	279		
5.2. Pengembangan Energi Berdasarkan Karakter dan Gerak Air Laut <i>Mulia Purba</i>	299		
5.3. Teknologi Alat Tangkap Berbasis Masyarakat: <i>Set Net</i> <i>Mulyono S. Baskoro dan Sulaeman Martasuganda</i>	317		

5.1 Pengembangan Bioenergi Laut

Mujizat Kawaroe¹ dan Suprihatin²

¹Dosen Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan
Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB

²Guru Besar pada Departemen Teknologi Industri Pertanian
Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

email: mujizatk@gmail.com; ssuprihati@yahoo.com

Pendahuluan

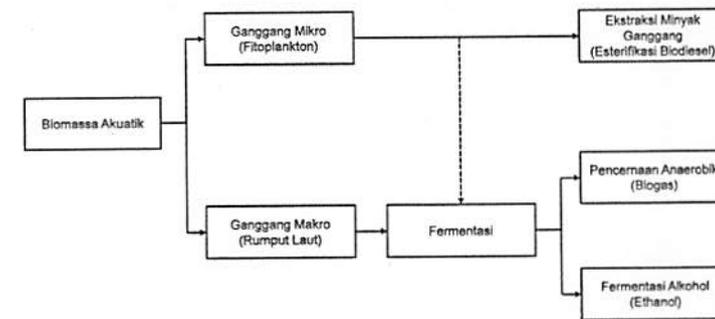
Ketergantungan terhadap sumber energi fosil hingga saat ini masih sangat tinggi. Situasi persediaan energi fosil yang semakin berkurang ditambah dengan isu pemanasan global yang dikaitkan dengan penggunaan energi fosil telah mendorong pengembangan energi terbarukan dari bahan pangan (kelapa sawit, kelapa, tebu, kedelai, dan singkong). Konversi bahan pangan menjadi bahan energi dapat menyebabkan kerawanan pangan sehingga diperlukan langkah strategis untuk mengembangkan dan mengoptimalkan peranan pertanian dan perikanan sebagai pemasok energi (Bahan Bakar Nabati/BBN) tanpa mengorbankan pangan dan keseimbangan ekologi. Kendala utama pertanian darat dalam menyediakan bahan pangan dan bahan energi terbarukan adalah semakin terbatasnya lahan yang tersedia dan semakin rendahnya kesuburan tanah. Oleh karena itu, permasalahan pertanian di masa depan hanya dapat diatasi kalau makin banyak kegiatan pertanian yang dilaksanakan bebas dari ketersediaan lahan subur. Teknologi yang dapat memanfaatkan energi surya sebagai sumber fotosintesis secara lebih efisien merupakan faktor penting yang harus dikuasai.

Menurut Permen ESDM No. 32 Tahun 2008, pada tahun 2025 pemanfaatan terhadap biodiesel meningkat menjadi 20% dan bioetanol sebanyak 15%. Hal ini memicu pemerintah untuk mengembangkan berbagai sumber energi alternatif,

antara lain yang berasal dari laut. Indonesia sebagai salah satu negara kepulauan yang besar dan berada di daerah tropis merupakan salah satu latar belakang pengembangan bioenergi laut. Akan tetapi, dalam upaya pengembangannya terdapat berbagai permasalahan dari hulu hingga hilir. Selain itu juga, dipaparkan beberapa usulan solusi untuk mengatasi permasalahan yang ada dalam pengembangan bioenergi laut.

Salah satu alternatif untuk memanfaatkan energi surya melalui proses fotosintesis adalah dengan memanfaatkan alga laut. Alga laut pada dasarnya adalah tanaman yang memanen energi melalui proses fotosintesis. Alga mengikat CO₂ dan mengubahnya menjadi biomassa yang dapat dikonversi menjadi bioenergi. Seperti sumberdaya biomassa pertanian darat, alga laut secara teoritis merupakan sumber energi terbarukan (netral karbon). Alga merupakan sumber energi potensial untuk produksi biofuel di masa yang akan datang, seperti biodiesel, etanol, dan butanol (Heubeck and Craggs 2007; Bruton *et al.* 2009). Gambar 1 menunjukkan prinsip proses konversi biomassa laut menjadi bioenergi. Alga laut mendapat perhatian khusus dalam penelitian dan pengembangan energi terbarukan karena tingginya efisiensi proses fotosintesis dan kemampuannya dalam memproduksi karbohidrat dan lipid yang merupakan bahan dasar bioenergi.

Pengembangan bioenergi dari biomassa laut menjadi menarik disebabkan adanya kompetisi tanaman darat penghasil bahan bakar terbarukan dengan penggunaan lahan untuk tanaman pangan (ketahanan energi vs ketahanan pangan). Oleh karena itu, biomassa laut dinilai oleh banyak pihak untuk dikembangkan sebagai sumber bahan bakar di masa depan. Biomassa laut dapat dipanen atau dibudidayakan pada skala komersial di berbagai tempat. Dengan menggunakan teknologi yang ada saat ini, rumput laut dapat dikonversi menjadi bioenergi (bioetanol, biodiesel, atau biogas). Bioenergi yang diproduksi kemudian dapat dikonversi menjadi energi panas atau listrik (Hermannsson 2014).



Gambar 1 Prinsip proses konversi biomassa akuatik menjadi energi (Bruton *et al.* 2009)

Bioenergi laut yang dapat dikembangkan ada bermacam-macam, yaitu biodiesel sebagai pengganti solar, bioetanol sebagai pengganti bensin/gasohol, biogas sebagai pengganti gas alam, serta biomassa sebagai pengganti minyak tanah. Pengembangan bioenergi laut tersebut saat ini masih menghadapi berbagai kendala dan permasalahan, antara lain biaya produksi yang masih tinggi yang menyebabkan harga jual masih mahal dibandingkan dengan bahan bakar fosil dan adanya persaingan antara sumber makanan dan sumber bioenergi. Terkait dengan permasalahan tersebut, salah satu solusi yang ditawarkan untuk pengembangan energi terbarukan dan mempercepat pengembangan bioenergi adalah dengan memanfaatkan sumber-sumber bahan baku dari laut.

Bioenergi yang berasal dari laut dikenal dalam bentuk biodiesel, bioetanol, dan biogas. Biodiesel adalah salah satu jenis bahan bakar yang dapat digunakan sebagai penyubstitusi bahan bakar diesel dari minyak bumi. Biodiesel berasal dari bahan mentah terbarukan (*renewable*) seperti minyak-minyak tumbuhan, antara lain minyak alga, minyak sawit (*palm oil*), minyak kelapa, minyak jarak pagar, minyak biji kapuk randu, dan lain sebagainya. Bioetanol adalah salah satu bahan bakar yang dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar fosil (*fossil fuel*). Etanol yang sering juga disebut etil alkohol rumus kimianya adalah C₂H₅OH, bersifat cair pada temperatur kamar. Pencampuran etanol dengan bahan bakar minyak (BBM), seperti Premium dan Pertamina dengan kadar 10% etanol dan 90% BBM dapat digunakan pada kendaraan tanpa perlu memodifikasi mesin. Berikut diuraikan potensi sumberdaya (biomassa laut), perkembangan riset dan teknologi bioenergi laut, serta analisis strategi dan rekomendasi pengembangan ke depan.

Potensi Bahan Baku Sumber Bioenergi Laut

Bahan baku bioenergi laut dapat diperoleh dari tumbuhan yang hidup di habitat laut, seperti makroalga, mikroalga, dan lamun. Mikroalga laut dapat diproses menjadi biodiesel karena kandungan lipidnya yang tinggi dibandingkan karbohidrat dan protein. Makroalga laut berpotensi sebagai bahan baku bioethanol dan biogas karena kandungan air dan karbohidratnya cukup tinggi, serta rendahnya kandungan lignin di dalam tubuhnya. Lamun memiliki potensi sebagai bahan baku bioethanol, tetapi masih diperlukan penelitian yang mendalam mengenai kandungan lignin dan serat pada lamun lebih tinggi dibandingkan dengan makroalga. Selain itu, lamun adalah ekosistem di mana di dalamnya banyak hidup organisme yang menggantungkan kehidupannya di habitat lamun. Hal lain yang juga penting adalah lamun belum dibudidayakan sehingga sangat riskan dijadikan sumber bahan baku untuk bioenergi karena dapat merusak lingkungan dan atau menghilangkan lamun dan fungsi ekologisnya bagi organisme lain.

Mikroalga merupakan jenis alga yang dapat dijadikan sebagai sumber biodiesel. Proses pembuatan biodiesel yaitu dengan cara mengonversi minyak mentah menjadi biodiesel melalui proses transesterifikasi. Jenis mikroalga yang potensial digunakan sebagai bibit unggul harus memiliki kandungan lipid yang sangat tinggi. Mikroalga dapat diisolasi dari perairan tawar dan laut. Hasil dari isolasi mikroalga diperoleh banyak jenis mikroalga dengan karakteristik yang berbeda, khususnya komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Mikroalga yang dapat dijadikan bibit unggul harus memiliki kandungan lipid yang tinggi. Kandungan lipid tersebut sangat bergantung pada kondisi lingkungan dari mikroalga tersebut hidup, seperti salinitas, suhu, pH, CO₂ dan sinar matahari.

Terdapat 13 spesies mikroalga laut dari perairan Indonesia yang sudah diuji di Pusat Penelitian Surfaktan dan Bioenergi (SBRC) LPPM, IPB yang potensial sebagai bahan baku biodiesel. Empat spesies utama yang sangat bagus untuk dikembangkan karena persentase kandungan lipidnya tinggi, yaitu *Nannochloropsis oculata*, *Scenedesmus* sp. (22%), *Chlorella* sp. (20%), dan *Dunaliella salina* (15%) (Kawaroe *et al.* 2010). Selain kandungan lipidnya, mikroalga yang dijadikan bibit unggul harus memiliki pertumbuhan cepat, dan tahan terhadap perubahan kondisi lingkungan dengan biomassa yang dihasilkan berkisar antara 15–25 g/m²/hari kultur (Kawaroe *et al.* 2010). Pada umumnya, mikroalga dapat dipanen setelah dikultivasi selama 7–10 hari. Namun, ada beberapa jenis mikroalga yang memiliki pertumbuhan yang lambat hingga mencapai 14 hari. Kecepatan

pertumbuhan mikroalga tersebut sangat tergantung konsentrasi CO₂, nutrien, dan cahaya matahari yang diberikan selama proses kultivasi. Kecepatan pertumbuhan mikroalga ini merupakan salah satu faktor yang memengaruhi produktivitas pembuatan biofuel dari alga. Apabila mikroalga memiliki laju pertumbuhan yang cepat, biomassa alga yang dihasilkan lebih cepat pula sehingga ketersediaan bahan baku untuk pembuatan biofuel dari alga terjamin. Jika ketersediaan bahan baku mikroalga ada, produktivitas proses pembuatan biofuel dari alga tinggi. Kriteria lain untuk mikroalga yang dijadikan bibit unggul adalah tahan terhadap perubahan kondisi lingkungan. Mikroalga memiliki karakteristik spesifik dalam pertumbuhan. Setiap jenis mikroalga memiliki kisaran kondisi pertumbuhan yang berbeda-beda, seperti kisaran pH, suhu, dan cahaya. Hal ini menyebabkan perlu setiap jenis mikroalga memiliki tingkat adaptasi yang berbeda terhadap perubahan lingkungan.

Makroalga berpotensi sebagai bahan baku pembuatan bioenergi laut melalui kemampuannya melakukan fotosintesis dan menghasilkan karbohidrat. Ketersediaannya sangat melimpah di seluruh perairan nusantara, baik dari hasil budidaya laut maupun yang dipelihara di tambak. Di beberapa perairan di Indonesia Timur, makroalga yang hidup liar di perairan pada musim-musim tertentu setiap tahun terdampar di pantai sampai membusuk. Kondisi ini tidak mengherankan karena ditemukan sekitar 782 jenis makroalga di Indonesia Timur yang terdiri atas makroalga hijau, cokelat, dan merah masing-masing 179 jenis, 134 jenis, dan 352 jenis (Nontji 1987). Di perairan Kepulauan Seribu DKI Jakarta, pada tahun 2004 masih ditemukan 101 jenis makroalga dari berbagai kelas (Kadi 2004). Dengan kondisi seperti ini, ketersediaan bahan baku makroalga untuk diproses menjadi bioenergi tidak mengalami kendala. Salah satunya adalah makroalga dapat diproses menjadi bioethanol yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan. Bioethanol merupakan produk hidrolisis dan fermentasi yang dapat dibuat dari substrat yang mengandung karbohidrat (gula, pati, atau selulosa).

Berbeda dengan tumbuhan terestrial yang sebagian besar hasil fotosintesisnya berupa pati, karbohidrat pada makroalga tersimpan dalam bentuk polisakarida sulfat. Makroalga juga dikenal dengan biofuel generasi ketiga dengan berbagai keunggulan, yaitu 1) tidak bersaing dengan bahan baku pangan utama, 2) memiliki kandungan gula yang tinggi, 3) memiliki kandungan lignin yang rendah, dan 4) memiliki produktivitas yang tinggi (John *et al.* 2011; Park *et al.* 2012). Seperti halnya mikroalga, makroalga juga mampu menyerap kandungan CO₂, menambah O₂ di lingkungan laut, dan mampu mengabsorpsi logam berat pada beberapa spesies.

Proses untuk menghasilkan bioetanol dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan cara hidrolisis dan fermentasi. Hidrolisis atau juga dikenal sebagai sakarifikasi merupakan proses pemecahan polisakarida menjadi monosakarida (Kim *et al.* 2010). Hidrolisis pada umumnya dibagi menjadi dua, yaitu hidrolisis asam dan hidrolisis enzim. Proses hidrolisis dengan menggunakan asam biasanya dengan H_2SO_4 . Hidrolisis enzim merupakan teknologi bioproses yang lebih ramah lingkungan untuk memecahkan bahan baku menjadi gula sederhana dengan memanfaatkan enzim. Fermentasi merupakan proses pemecahan senyawa organik (khususnya gula dan lemak) oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob untuk menghasilkan produk-produk organik yang lebih sederhana. Enzim yang digunakan untuk menghidrolisis makroalga dapat diperoleh dari bakteri dan kapang laut yang diisolasi dari lingkungan sekitar habitat makroalga, yaitu sedimen dan kolom air. Beberapa bakteri yang hidup pada rumput laut diduga dapat menghasilkan enzim untuk mengurai sumber isolat rumput laut agarase menjadi sumber nutrisi pertumbuhannya. Enzim yang dihasilkan oleh bakteri tersebut dapat menghidrolisis dan mendegradasi agar menjadi agaro-oligosakarida dan galaktosa dari enzim agarase yang selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan untuk bioetanol. Selain bakteri, kapang juga menghasilkan enzim yang dapat digunakan untuk menghidrolisis karbohidrat pada makroalga.

Selain untuk produksi bioetanol, makroalga juga dapat diolah menjadi biogas. Proses pembuatan biogas dari makroalga dapat melalui jalur yang singkat, yakni melalui pencernaan anaerobik (*anaerobic digestion*) sehingga menghasilkan metana. Metana dapat digunakan untuk menghasilkan panas dan listrik atau dikompresi untuk digunakan sebagai bahan bakar untuk transportasi. Dibandingkan dengan tanaman terestrial, kandungan lignin pada makroalga rendah dan aksesnya terhadap air menjadikannya dapat terhidrolisis atau terpecah secara sempurna.

Potensi bioenergi laut sebagai sumber energi sebagaimana diuraikan sebelumnya memiliki banyak kelebihan, antara lain bukan merupakan tanaman pangan utama, cocok dikembangkan di daerah tropis, produksinya melimpah, budidayanya relatif mudah, serta dapat digunakan sebagai bahan baku produksi biodiesel, bioetanol, gas hidrogen, dan gas metana. Dengan karakteristik sumber bioenergi laut yang dapat digunakan untuk memproduksi berbagai jenis produk, menyebabkan bioenergi laut memiliki potensi yang tinggi dalam mendukung percepatan pengembangan bioenergi secara keseluruhan di Indonesia.

Perkembangan Riset dan Teknologi

Bioetanol dari Biomassa Laut

Bioetanol merupakan salah satu jenis bahan bakar berbasis alkohol. Selain dari biomassa pertanian darat (Suprihatin dan Romli 2012), bioetanol dapat diproduksi dari biomassa laut. Proses produksi bioetanol dari biomassa ini terdiri atas beberapa tahap, yaitu tahap prapenanganan (hidrolisis), fermentasi, dan pemurnian. Keunggulan biomassa rumput laut sebagai sumber bioetanol, selain produksinya yang melimpah juga kandungan hemiselulosa yang rendah dibandingkan dengan biomassa pertanian lainnya sehingga proses prapenanganan dan biokonversinya menjadi lebih sederhana. Pemanfaatan biomassa alga untuk produksi bioetanol dinilai menjanjikan sebagai pendekatan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (John *et al.* 2011). Mikroalga sebagai bahan bioetanol diperhatikan sama pentingnya seperti mikroalga sebagai bahan baku biodiesel. *Strain* mikroalga laut dimungkinkan untuk dibudidayakan sebagai bahan baku dalam produksi bioetanol. Rekayasa genetika *strain* terpilih dapat meningkatkan ketahanan hidup alga dalam berbagai kondisi lingkungan. Penelitian Eshaq *et al.* (2010) juga menyimpulkan bahwa biomassa alga lebih menguntungkan dibanding dengan bahan baku dari hasil pertanian untuk produksi bioetanol karena biomassa ini tersedia berlimpah baik di ekosistem air tawar maupun ekosistem laut. Selain itu, biomassa ini tidak memerlukan praperlakuan yang intensif dengan bahan kimia. Sebagai contoh, *Spirogyra* memiliki dinding sel yang terdiri atas selulosa murni dan pati sederhana sehingga dapat langsung digunakan sebagai bahan baku dalam produksi bioetanol. Hal ini membuka peluang bagi penerapan metode konversi biomassa ini menjadi bioetanol secara lebih sederhana dibandingkan dengan konversi biomassa pertanian darat yang pada umumnya kandungan hemiselulosa relatif tinggi. Penyederhanaan atau eliminasi tahapan praperlakuan dalam proses produksi bioetanol ini dapat mengurangi secara signifikan biaya produksi bioetanol secara keseluruhan.

Hasil penelitian Schultz-Jensen *et al.* (2013) pada proses konversi *Chaetomorpha linum* menjadi etanol dengan metode sakarifikasi dan fermentasi simultan (SSF) menunjukkan bahwa kombinasi prapenanganan makroalga laut dapat menghasilkan glukukan dan etanol lebih tinggi. Prapenanganan dengan oksidasi basah (*wet oxidation*) dan penggilingan makroalga *Chaetomorpha linum* menunjukkan hasil etanol sekitar 44 g etanol/100 g glukukan yang mendekati nilai perolehan etanol teoritis 57 g etanol/100 g glukukan. Dengan praperlakukan

kombinasi oksidasi basah dan penggilingan dibandingkan dengan *Chaetomorpha linum* menghasilkan etnail 64% lebih tinggi dibanding dengan hasil tanpa prapenanganan. Gosh dan Gosh (1992) menyebutkan bahwa kapang laut memiliki aktivitas enzim yang baik dalam proses degradasi suatu senyawa. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Kawaroe *et al.* (2014a) menunjukkan bahwa fermentasi oleh enzim agarase dari bakteri laut memiliki hasil bioetanol dua kali lebih tinggi dari pada asam H_2SO_4 dengan kadar 1% dan 1,5 kali lebih tinggi jika menggunakan kapang laut. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan enzim agarase baik yang berasal dari bakteri maupun kapang laut dalam menghidrolisis *Gelidium* sp. untuk produksi bioetanol lebih efektif dibandingkan menggunakan asam H_2SO_4 .

Biodiesel dari Biomassa Laut

Biomassa alga mengandung bahan-bahan bernilai tinggi, seperti protein, minyak/lemak, vitamin, mineral, pigmen, β -karoten, bahan aktif, dan serat yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan (Pedroni dan Banemann 2003). Sumberdaya ini dapat memberikan solusi komprehensif karena alga mampu memanen energi surya secara lebih efisien dibanding dengan jenis tanaman lain. Kondisi iklim dan geografis, seperti intensitas sinar matahari sepanjang tahun, temperatur udara relatif tinggi, dan ketersediaan lautan juga mendukung pemanfaatan sumberdaya ini.

Alga tergolong jenis tanaman dan mampu membentuk TAGs (triacylglycerols) dari karbon dioksida dan air melalui fotosintesis menggunakan energi matahari. Bahan yang terbentuk ini dapat digunakan untuk menghasilkan berbagai bahan kimia, seperti FAMES (*fatty acid methyl ester*) yang dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan biodiesel (Schenk *et al.* 2009). Tergantung jenis dan medium pertumbuhan, alga mengandung minyak/lemak (trigliserida) sebesar 7,2–23% (FAO 1996), dan melalui modifikasi komposisi nutrisi kandungan trigliserida dapat ditingkatkan hingga mencapai sekitar 60%, bahkan kadar minyak/lemak biomassa mikroalga dapat melebihi 80% berat kering. Kadar minyak berbagai jenis mikroalga umumnya mencapai 20–50% (Chisti 2007).

Biomassa jenis alga laut tertentu mengandung minyak/lemak dalam kadar yang tinggi dan dapat menjadi sumber energi berupa biodiesel. Biodiesel merupakan terminologi umum untuk rantai panjang alkil ester, yaitu bioenergi yang dapat terbarukan, *biodegradable*, dan tidak toksik. Biodiesel dihasilkan dari proses

transesterifikasi mono-, di- dan trigliserida (TAGs) dan esterifikasi asam lemak bebas (*free fatty acids*/FFAs) yang terdapat secara alamiah di dalam minyak/lemak biologis, seperti minyak hewan atau minyak nabati. Biodiesel merupakan bahan bakar netral karbon atau tidak berkontribusi terhadap penambahan karbon dioksida ke atmosfer (*carbon neutral fuel*) karena bahan bakar ini dibuat dari bahan tanaman yang diproduksi melalui fiksasi karbon fotosintetik. Dibandingkan dengan diesel petroleum, pembakaran biodiesel mengeluarkan polutan lingkungan, seperti senyawa organik menguap (*volatile organics*), bahan berbentuk partikel, dan senyawa sulfur dalam jumlah relatif lebih sedikit.

Tahapan proses utama dalam produksi biodiesel adalah transesterifikasi minyak menjadi metil ester asam lemak (*fatty acid methyl esters*/FAME). Dalam proses pembuatan biodiesel, ditambahkan alkohol (umumnya metanol) untuk melangsungkan proses esterifikasi untuk menghasilkan metil ester sebagai produk utama dan gliserol sebagai produk samping.

Biodiesel dari alga berkompetisi langsung dengan bahan bakar petroleum yang saat ini merupakan bahan bakar yang paling murah untuk kegiatan transportasi. Tingkat kompetisi biodiesel dari alga terhadap diesel dari petroleum sangat bergantung pada biaya produksi biodiesel dari alga dan pada harga diesel petroleum pada waktu yang bersangkutan. Salah satu pendekatan untuk menganalisis tingkat daya saing ini adalah pendekatan Chisti (2007), yaitu dengan mengestimasi harga maksimum yang dapat dibayar secara rasional untuk biomassa alga dengan kandungan minyak tertentu, jika bahan bakar petroleum kasar sebagai sumber energi dapat dibeli dengan tingkat harga tertentu. Harga estimasi ini kemudian dibandingkan dengan harga produksi biomassa alga untuk mengetahui tingkat kelayakan produksi biodiesel dari alga laut.

Biogas dari Biomassa Laut

Tidak semua alga mengandung lipid dalam jumlah memadai untuk dikonversi menjadi biodiesel. Jenis alga ini lebih diperhatikan sebagai bioenergi jenis biogas atau bahan bakar berbasis alkohol (bioetanol) karena kandungan gula dan karbohidrat lainnya. Kelebihan biomassa laut dibandingkan dengan biomassa pertanian lain adalah rendahnya kandungan hemiselulosa. Hal ini mengindikasikan bahwa biomassa laut relatif mudah dikonversi menjadi gula penyusunnya. Hasil hidrolisis tersebut selanjutnya dapat difermentasi menjadi etanol atau metana (gas penyusun utama biogas). Namun, karena fermentasi

biomassa untuk menghasilkan bioetanol relatif lebih kompleks maka penggunaan biomassa laut sebagai sumber biogas (metana) dapat dinilai sebagai pilihan yang lebih strategis (Hughes *et al.* 2012; Vanegas dan Bartlett 2013).

Dewasa ini ada kecenderungan yang menunjukkan adanya perhatian yang semakin meningkat pada penggunaan bahan organik untuk produksi biogas sebagai energi terbarukan (Geissen 2008). Hal ini disebabkan bahan bakar fosil semakin langka dan menyebabkan pencemaran lingkungan. Penelitian dan praktik produksi biogas selama ini lebih banyak dilakukan dengan menggunakan bahan organik terlarut (bahan cair), misalnya dalam limbah cair industri minyak sawit, industri pati, atau industri peternakan. Penelitian dan penerapan teknologi konversi limbah organik padat masih terbatas, walaupun telah ada indikasi potensi tinggi untuk mengonversi bahan organik menjadi biogas dengan fermentasi media padat (*dry fermentation*) (Macias-Corral *et al.* 2008). Arati (2009) melaporkan tingkat perolehan (*yield*) biogas dari biomassa dapat mencapai 180–940 L per kg bahan kering (TS) bergantung jenis substratnya.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Kawaroe *et al.* (2014b) terhadap makroalga jenis *Ulva* sp., *Gracilaria* sp., dan *Eucheuma cottonii* menunjukkan bahwa dua spesies makroalga berpotensi untuk menjadi biogas kecuali *Ulva* sp. karena mengandung Sulfur yang sangat tinggi mencapai 2000 ppm sehingga dikhawatirkan dapat menjadikan peralatan menjadi korosif. Selanjutnya untuk produksi rata-rata gas metan yang dihasilkan dari makroalga jenis *Gracillaria* sp. berdasarkan penelitian Kawaroe *et al.* (2014b), yaitu sebesar 5,97 L/hari dan biogas 9,94 L/hari yang dihasilkan dari reaktor *digester anaerobic* sebesar 21.305 L membutuhkan makroalga jenis *Gracilaria* sp. sebanyak 95 gram/hari.

Biomassa laut dianggap sebagai bahan baku penting untuk pencernaan anaerobik untuk menghasilkan energi (Santos *et al.* 2014; Gurung *et al.* 2012). Namun, pemanfaatannya sebagai sumber energi masih sedikit di seluruh dunia. Gurung *et al.* (2012) meneliti metana potensial sebagai sumber energi dari rumput laut, alga cokelat, alga hijau, dan jeroan ikan sebagai substrat untuk produksi metana. Hasil CH_4 kumulatif dari 256 ± 28 dan 179 ± 35 mL $\text{CH}_4/\text{g VS}$ dapat diperoleh dari penggunaan alga hijau dan cokelat, masing-masing setelah 60 hari proses fermentasi. Kadar CH_4 dalam biogas adalah sekitar 70% untuk kedua substrat tersebut. Hasil CH_4 127 ± 20 dan 102 ± 25 mL $\text{CH}_4/\text{g VS}$ diperoleh dengan menggunakan jeroan ikan dan rumput laut sebagai substrat. Mengingat bahwa

hanya $44 \pm 15\%$ dari TCOD yang diubah menjadi CH_4 maka waktu adaptasi lebih lama atau pra-penanganan biomassa laut diperlukan untuk mengubah TCOD sepenuhnya untuk CH_4 .

Permasalahan Pengembangan Bioenergi Laut

Beberapa hambatan teknis dalam pengembangan bioenergi laut di Indonesia, antara lain permasalahan pada proses produksi; hasil inovasi teknologi pengembangan bioenergi laut masih terbatas; kebanyakan hasil penelitian masih pada tahap skala laboratorium (belum dalam bentuk produk industri komersial); belum ada kelompok kerja keahlian dalam bidang bioenergi laut; serta prasarana dan sarana untuk pengembangannya masih terbatas.

Proses Produksi

Pengembangan dan pemanfaatan tumbuhan laut sebagai bahan baku bioenergi dapat dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu kultivasi, pemanenan, dan teknologi proses. Setiap tahapan proses produksi memiliki kendala secara teknis.

Kultivasi

Pada tahapan kultivasi, kendala dan permasalahan yang ditemukan adalah ketersediaan bibit, pupuk dan sistem kultivasi yang digunakan untuk pemeliharaan yaitu apakah sistem tertutup atau terbuka untuk mikroalga atau tambak dan laut untuk makroalga. Ada dua jenis sistem kultivasi untuk mikroalga, yaitu sistem tertutup (fotobioreaktor) dan sistem terbuka (*open ponds*/kolam terbuka). Penggunaan kedua jenis sistem kultivasi mikroalga tersebut memiliki keuntungan dan kerugian/permasalahan tersendiri sehingga penggunaannya harus disesuaikan dengan tujuan kultivasi. Kedua sistem tersebut dapat dilakukan di ruang tertutup (*indoor*) atau di ruang terbuka (*outdoor*), di mana kondisi tersebut memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing.

Fotobioreaktor merupakan suatu sistem kultivasi mikroalga secara tertutup. Sistem ini masih memiliki kendala dalam operasionalnya, seperti sulitnya membersihkan tubular fotobioreaktor sehingga mengakibatkan masih ada kontaminan dan bakteri biofilm yang tertinggal di dalam tubular tersebut. Oleh karena itu, perlu ada perawatan khusus dalam penggunaan fotobioreaktor. *Open ponds*

kolam terbuka merupakan salah satu sistem kultivasi mikroalga secara terbuka. Penggunaan sistem kultivasi ini dapat terkendala jika proses budidaya mikroalga dilakukan pada musim hujan. Air hujan yang masuk ke dalam kolam terbuka dapat memengaruhi kualitas air sehingga dapat memengaruhi pertumbuhan mikroalga. Selain itu, permasalahan yang timbul jika menggunakan sistem kultivasi terbuka adalah mikroalga yang dikultivasi dapat terkontaminasi sehingga tidak monokultur lagi. Keuntungan kultivasi mikroalga di dalam ruangan tertutup (*indoor*) adalah faktor-faktor lingkungan yang menentukan kualitas kultivasi dapat dikontrol, namun memerlukan biaya yang mahal. Kultivasi mikroalga di ruangan terbuka (*outdoor*) memiliki keuntungan, yaitu murah karena tidak perlu membentuk bangunan sebagai tempat kultivasi. Akan tetapi, kondisi kultivasi ini memiliki kelemahan, yakni faktor-faktor lingkungan yang menentukan kualitas kultivasi sulit di kontrol.

Penyediaan Bibit Unggul

Bibit unggul merupakan suatu faktor penting dalam mengembangkan pemanfaatan bioenergi laut. Bibit unggul mikroalga kini masih dalam upaya pencarian *strain* yang dapat menghasilkan biofuel alga yang optimum. Pencarian mengenai *strain* alga yang memiliki hasil yang optimal untuk dijadikan bioenergi tersebut dilakukan oleh IPB dan beberapa pihak terkait, seperti para peneliti dari Balitbang Kementerian Kelautan dan Perikanan (BRKP) serta Lembaga Ilmu dan Pengetahuan Indonesia (LIPI). Untuk makroalga, kendala dalam proses produksi adalah keberadaan hama jika kultivasi dilakukan di tambak dan musim jika dilakukan di laut.

Proses Pemanenan

Pemanenan mikroalga dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu flokulasi dan filtrasi, serta dengan sentrifugasi. Metode pemanenan tersebut masing-masing memiliki kendala dan permasalahan. Pemanenan secara umum masih dilakukan dengan menggunakan bahan kimia koagulan seperti tawas yang umum digunakan untuk memisahkan air dengan kotorannya. Hal ini menimbulkan masalah dengan biaya pemanenan serta tidak ramah lingkungan. Pemanenan

dengan sentrifugasi merupakan teknik pemanenan menggunakan teknologi canggih yang paling efektif untuk mendapatkan hasil biomassa yang maksimal. Akan tetapi, penggunaan sentrifugasi dalam proses pemanenan memerlukan energi tinggi sehingga menyebabkan biaya produksi yang dikeluarkan menjadi besar. Pemanenan makroalga tidak mengalami kendala berarti. Permasalahan pada makroalga terjadi pada proses pengeringan di musim hujan. Sampai saat ini, petani makroalga masih mengandalkan sinar matahari dalam proses pengeringan makroalga sehingga dibutuhkan teknologi untuk membantu mereka di saat terjadinya musim hujan. Beberapa teknologi pengeringan sudah dilakukan walaupun belum sempurna terkait dengan kesetimbangan energi.

Ekstraksi Minyak

Ekstraksi alga untuk mendapatkan minyak mentah masih dilakukan dengan menggunakan bahan kimia yang tentu saja membutuhkan biaya mahal dan tidak ramah lingkungan. Untuk kapasitas besar, cara ekstraksi minyak mentah tersebut akan sangat menghambat dalam proses produksi. Selain dari segi biaya, waktu yang digunakan untuk ekstraksi dengan menggunakan bahan kimia juga termasuk lama. Untuk menghasilkan minyak dari alga dengan menggunakan bahan kimia, dibutuhkan waktu sekitar enam jam. Dalam pengembangan skala besar, waktu serta biaya ekstraksi dengan menggunakan bahan kimia akan sangat menghambat produksi biofuel.

Pengadaan Skala

Alga diketahui berpotensi sebagai bahan baku biofuel, mengingat memiliki kandungan lipid yang tinggi (mikroalga) dan kandungan karbohidrat yang tinggi (makroalga). Kandungan mikroalga yang kaya akan lipid dapat dikonversi menjadi biodiesel, sedangkan kandungan makroalga yang kaya akan karbohidrat dapat dikonversi menjadi bioetanol. Akan tetapi, penelitian dan pengembangan biofuel dari alga tersebut masih dalam skala laboratorium. Oleh karena itu, pengembangan biofuel alga masih dalam skala laboratorium, produk yang dihasilkan pun masih sedikit. Hal ini menyebabkan masih terbatasnya informasi mengenai biofuel alga, terutama performa dan kualitas biofuel dari alga apabila diaplikasikan di lapangan. Di Indonesia, anggaran dana untuk melakukan pengembangan biofuel dari alga masih terbatas. Pemberian dana dari instansi pemerintah masih diperuntukkan untuk penelitian pada skala laboratorium.

Hal ini menyebabkan keberlangsungan pengembangan biofuel dari alga menuju skala komersial tidak bergerak cepat. Keterbatasan anggaran dana ini merupakan suatu masalah yang paling utama dalam mempercepat pengembangan biofuel dari alga.

Prasana dan Sarana

Permasalahan lain dalam pengembangan biofuel dari alga adalah prasarana dan sarana. Lokasi lahan merupakan suatu prasarana penting untuk mengembangkan mikroalga agar mencapai komersialisasi. Kebutuhan akan biomassa alga dalam proses komersialisasi yang tinggi menyebabkan sangat diperlukannya lokasi yang baik untuk kultivasi. Lokasi yang ditunjukkan untuk mengembangkan alga ini harus memiliki kondisi geografis yang sesuai dengan kondisi kultivasi/budidaya alga yang optimal, seperti luasan lahan dan topografi lokasi tersebut. Selain itu, penentuan lokasi pengembangan alga juga harus memiliki kesesuaian dengan fasilitas/sarana penunjang untuk pengembangan alga, seperti sumber air untuk kultivasi dan akses transportasi.

Sinergisitas Kepakaran

Dalam upaya pengembangan biofuel dari alga mencapai skala industri komersial, dibutuhkan tenaga-tenaga ahli yang andal dalam bidang biofuel alga. Tenaga ahli yang dibutuhkan dalam pengembangan biofuel alga ini adalah tenaga ahli yang andal pada tahapan hulu hingga hilir. Tenaga ahli dari berbagai bidang perlu bergabung dalam suatu kelompok kerja (*working group*) kepakaran sehingga dapat saling bahu-membahu mengembangkan biofuel dari alga hingga skala komersial. Hal ini sangat dibutuhkan mengingat bahwa pengembangan alga ke arah energi terbarukan di Indonesia secara fokus baru dilakukan pada beberapa tahun belakang ini.

Strategi dan Arah Pengembangan

Dalam konteks penelitian dan pengembangan, bioenergi laut dapat digolongkan sebagai produk potensial dilihat dari aspek ketersediaan bahan baku, potensi nilai tambah, kecenderungan global, dan permintaan pasar. Kendala utama yang masih dihadapi adalah ketersediaan teknologi proses produksi untuk mengonversi biomassa laut tersebut menjadi bioenergi. Oleh karena itu, pengembangan ke depan perlu difokuskan pada penelitian dan pengembangan teknologi proses yang

disesuaikan dengan karakteristik biomassa laut. Dalam konteks pembangunan masyarakat pesisir, pengembangan industri bionergi laut perlu diarahkan sebagai wahana pengenalan, penguasaan, dan pemanfaatan teknologi teknologi tersebut secara efisien.

Berbagai telaah telah meyakinkan bahwa biomassa alga laut untuk produksi bioetanol dapat menjadi pendekatan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. John *et al.* (2011) menyatakan bahwa dalam perspektif isu bioenergi, alga mendapat perhatian luas sebagai sumber biomassa potensial untuk produksi bioetanol. Setelah diekstrak minyaknya, biomassa alga masih mengandung menghasilkan pati atau selulosa dalam jumlah besar yang dapat dihidrolisis menjadi gula. Hidrolisat ini selanjutnya dapat digunakan sebagai substrat untuk produksi bioetanol. Saat ini, penelitian tentang masalah ini masih terbatas dan penelitian yang intensif masih diperlukan di masa depan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan biomassa alga untuk memproduksi bioetanol, misalnya melalui pengembangan bioreaktor baru yang dapat secara efektif digunakan untuk produksi etanol.

Kendala utama dalam penggunaan biomassa laut menjadi bioetanol adalah kelayakan ekonominya. Oleh karena itu, untuk menjadi lebih kompetitif dan mendapat penerimaan secara ekonomis, biaya biokonversi dari biomassa laut menjadi bioetanol harus dapat diturunkan hingga lebih rendah dari harga bensin saat ini (kompetitor utama). Hal ini dimungkinkan melalui penelitian yang mengarah pada peningkatan efisiensi proses. Biaya bahan baku dan enzim merupakan komponen utama biaya produksi bioetanol. Biomassa laut dapat menjadi pilihan yang menarik secara ekonomis karena karakteristik dan ketersediaannya yang melimpah dan berkelanjutan. Penelitian biokonversi biomassa laut menjadi bioetanol masih diperlukan untuk menghasilkan teknologi dengan biaya yang paling rendah serta tingkat laju konversi dan tingkat hasil memadai. Pengembangan teknologi dan optimasi proses akan memainkan peranan penting, terutama untuk optimalisasi empat unit operasi utama dalam proses produksi bioetanol: praperlakuan, hidrolisis, fermentasi dan pemisahan produk (distilasi). Praperlakuan (konversi selulosa menjadi gula) dan fermentasi (konversi gula menjadi etanol) merupakan tantangan utama dalam penelitian dan pengembangan teknologi biomassa laut menjadi etanol. Pemilihan praperlakuan dan teknologi proses yang paling sesuai bergantung pada karakteristik biomassa, sifat kinetika mikroorganisme dan jenis hidrolisat, selain penelitian aspek ekonomi proses tersebut (Hsu *et al.* 2011; Talebnia *et al.* 2010; Chandel *et al.* 2007).

Penelitian dan pengembangan saat ini sebagian besar ditujukan kepada proses optimasi produksi etanol dari komoditas pertanian darat, seperti gula, jagung, singkong, dan molase. Saat ini juga masih kekurangan informasi tentang kriteria untuk merancang dan optimasi sistem bioreaktor untuk produksi bioetanol dari biomassa laut. Dukungan dalam bentuk kegiatan riset dan pengembangan bioetanol dari biomassa laut serta proyek percontohan akan sangat mendukung dalam pengembangan industri bioetanol dari biomassa laut. Kemajuan dalam teknik prapenanganan bahan baku, pengembangan teknologi proses biokonversi, dan rekayasa genetika mikroorganisme merupakan faktor kunci untuk membuat program pengembangan bioetanol berhasil pada skala komersial.

Meskipun manfaatnya telah dilaporkan dalam literatur, penelitian secara khusus yang menfokuskan pada pemanfaatan biomassa laut menjadi biodiesel masih terbatas. Penelitian yang masih diperlukan antara lain untuk mengembangkan teknik yang efektif untuk memanen alga laut, mengembangkan proses ekstraksi minyak dari biomassa laut dan proses konversi minyak menjadi biodiesel dengan perhatian secara khusus pada kondisi proses optimum, serta perolehan dan karakteristik minyak, serta biodiesel yang dihasilkan. Produksi biodiesel dari biomassa laut skala besar saat ini masih dalam fase pengembangan. Biaya produksi biodiesel berbasis alga laut masih memerlukan penurunan secara signifikan agar dapat kompetitif sumber diesel lainnya. Seperti yang ditunjukkan Chisti (2007), biodiesel berpotensi dapat menjadi sumber energi terbarukan yang berpotensi menggantikan bahan bakar cair dari minyak bumi. Kelayakan ekonomi produksi biodiesel dari mikroalga perlu ditingkatkan secara substansial untuk membuatnya lebih kompetitif dibandingkan petrodiesel.

Dalam hal produksi biogas dari biomassa laut, beberapa kebutuhan penelitian masih diperlukan, mencakup perancangan reaktor dan optimasi proses konversi biomassa laut menjadi biogas dan pupuk organik beserta evaluasi kinerjanya, karakterisasi produk-produk yang dihasilkan (biogas, digestat, dan lindi), serta analisis biaya dan manfaat sistem produksi tersebut secara kualitatif dan kuantitatif.

Rekomendasi

Kelimpahan ragam hayati laut Indonesia merupakan potensi sumber bahan baku untuk produksi bioenergi berbasis biomassa laut. Dalam rangka mencapai manfaat maksimal dari usaha ini, konsep arah pengembangan telah diuraikan

sebagaimana telah disebutkan sebelumnya. Dalam konsep tersebut, biomassa laut dikonversi menjadi bioenergi (bioetanol, biodiesel, dan biogas). Dengan konsep pengembangan tersebut, agroindustri bioenergi laut diharapkan dapat memberikan strategi pemanfaatan biomassa laut menjadi bioenergi menjadi layak secara teknis, ekonomis, dan ramah lingkungan. Beberapa solusi dapat usulkan untuk mengatasi permasalahan pengembangan bioenergi laut meliputi solusi masalah teknis dan solusi permasalahan produksi. Solusi permasalahan teknis meliputi penelitian dan pengembangan yang menitikberatkan pada bidang teknologi, penggandaan skala (skala laboratorium → skala *pilot plant* → skala teknis) dengan dukungan pemerintah (sarana, prasarana, finansial, kebijakan), dan pembentukan kelompok kerja keahlian (*working group*) di bidang bioenergi laut. Solusi permasalahan produksi yang dapat diusulkan meliputi pengembangan setiap tahapan proses produksi bioenergi. Tahap kultivasi mencakup seleksi bibit unggul dan perbanyak jenis-jenis mikroalga dan makroalga potensial yang mampu dikultivasi di alam, serta yang tahan terhadap perubahan lingkungan dan memiliki laju pertumbuhan tinggi juga kandungan minyak tinggi yang berasal dari perairan lokal, serta pengembangan teknis kultivasi mikroalga dan makroalga. Tahap pemanenan mencakup pengembangan teknik pemanenan yang ramah lingkungan, misalnya dengan bioflokulasi dan memadukan teknik pemanenan secara biologi dan mekanik untuk mempersingkat waktu proses dan meminimumkan dampak lingkungan. Tahapan produksi minyak mentah, meliputi optimalisasi produksi biofuel alga, pengembangan pabrik percontohan produksi biofuel alga, memadukan teknik ekstraksi secara kimia dan mekanik untuk mempersingkat waktu, serta penggandaan skala besar.

Terlepas dari kemajuan yang telah dicapai oleh penelitian di bidang ini, pemanfaatan secara efektif biomassa laut sebagai sumber energi terbarukan masih memerlukan beberapa program penelitian dan pengembangan yang strategis. Sebagaimana pada konversi biomassa pertanian lainnya (Suprihatin dan Romli 2012), kebutuhan penelitian tersebut mencakup i) identifikasi dan pemetaan secara sistematis kelimpahan dan karakterisasi biomassa laut, ii) pengembangan sistem bioreaktor untuk fermentasi biomassa laut menjadi bioetanol, iii) pengembangan teknologi proses produksi biodiesel dari biomassa laut, terutama biomassa yang mengandung minyak/lemak dalam jumlah cukup tinggi, iv) pengembangan teknologi produksi biogas dari biomassa laut, dan v) desain dan penilaian pilot proyek sistem produksi bioenergi (bioetanol, biodiesel, biogas) dari biomassa laut. Dengan fasilitas tersebut dimungkinkan untuk menstimulasikan kinerja

sistem konversi biomassa laut menjadi bioenergi pada berbagai skenario untuk menentukan desain terbaik, dan menilai kelayakan teknis, sosial-ekonomi, dan lingkungan sistem tersebut. Metode LCA (*Life-Cycle Assessment*) dapat digunakan untuk menentukan sistem yang terbaik dalam hal kinerja lingkungan secara keseluruhan. Fasilitas *pilot project* tersebut juga dapat menunjukkan kinerja dan efektivitas sistem konversi biomassa laut menjadi bioenergi.

Daftar Pustaka

- Arati JM. 2009. Evaluating the economic feasibility of anaerobic digestion of kawangware market waste [BS Thesis]. Kansas (US): Kansas State University.
- Bruton T, Lyons H, Lerat Y, Stanley M, Rasmussen MB. 2009. A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland (http://www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications_/Bioenergy/Algaereport.pdf, diakses tanggal 25 Mei 2014)
- Chandel AK, Chan ES, Rudravaram R, Narasu ML, Rao LV Ravindra P. 2007. Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol and Molec Biol Rev.* 2 (1): 014–032
- Chisti Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechn Advan* 25: 294–306
- Eshaq FS, Ali MN, Mohd MK. 2010. Spirogyra biomass a renewable source for biofuel (bioethanol) Production. *Intern J Eng Sci and Technol* 2(12): 7045–7054
- FAO. 1996. Manual on The Production and Use of Live Food for Aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper. <http://www.fao.org>. [11 Februari 2009].
- Geissen SU. 2008. Wertstoffgewinnung aus Abwasser. Department of Environmental Process Engineering, TU Berlin
- Gosh BK, Gosh A. 1992. Degradation of Cellulose by Fungal Cellulase. In *Microbial Degradation of Natural Products*, ed. G. Winkelman. VCH Publishers, Inc., New York, pp.84–126.
- Gurung A, Van Ginkel SW, Kang WC, Qambrani NA, Oh SU. 2012. Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: A lab-scale study. *Energy*, 43(1): 396–401
- Hermannsson K. 2014. Biogas from seaweed as a local energy source Case of anaerobic digestion for electricity in the Western Isles, Scotland. University of Strathclyde, Scotland, UK. (<http://www.regionalstudies.org/uploads/conferences/presentations/open-days-2012/kristinn-hermannsson.pdf>, diakses tanggal 25 Mei 2014)
- Heubeck S, Craggs R. 2007. *Resource Assessment of Algae Biomass for Potential Bio-Energy Production in New Zealand*. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd., Hamilton, New Zealand
- Hsu CL, Chang KS, Lai MZ, Chang TC, Chang HY, Jang HD. 2011. Pretreatment and hydrolysis of cellulosic agricultural wastes with a cellulase-producing *Streptomyces* for bioethanol production. *Biom Bioene.* 35: 1878–1884
- Hughes AD, Kelly MS, Black KD, Stanley MS. 2012. Biogas from Macroalgae: is it time to revisit the idea?. *Biotechnology for Biofuels* 2012 5: 86. (<http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/5/1/86>, diakses tanggal 25 Mei 2014)
- John RP, Anisha GS, Nampoothiri KN, Pandey A. 2011. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. *Biores Techn.* 102: 186–193
- Kadi A. 2004. *Rumput Laut Ekonomis dan Budidayanya*. Jakarta (ID): Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI
- Kawaroe M, Prartono T, Sunuddin A, Wulansari D, Augustine D. 2010. *Mikroalga Potensi dan Pemanfaatannya untuk Produksi Bio Bahan Bakar*. Bogor (ID): IPB Press
- Kawaroe M, Rusmana I, Nurafni. 2014. Production of bioethanol from macroalgae *Gelidium* sp. using agarase enzymes of marine bacteria. 2014a. *Internat J Envir Bioen.* 9(3): 243–251
- Kawaroe M, Setyaningsih D, Santoso J, Hasanudin U, Bayu A. 2014b. Pengembangan Teknologi Bioedegradasi Anaerobik Makroalga di Pulau-pulau Kecil di Indonesia. Laporan Hasil Penelitian RISPRO-LPDP Batch I
- Kim GS, Shin MK, Kim YJ, Oh KK, Kim JS, Ryu H, Kim KH. 2010. Method of producing biofuel using sea algae. WO 2008/105618 A1. World Intellectual Property Organization.

- Macias-Corral M, Samani Z, Hanson A, Smith G, Funk P, Yu H., Longworth J. 2008. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. *Biores Techn.* 99: 8288–8293
- Nontji A. 1987. *Laut Nusantara*. Jakarta (ID): Djambatan.
- Park JH, Hong JY, Jang HC, Oh SG, Kim SH, Yoon JY, Kim YJ. 2012. Use of *Gelidium amansii* as promising resource for bioethanol: A practical approach for countinuous dilute-acid hydrolysis and fermentation. *Biores Techn.* 108: 83–88
- Pedroni P, Banemann J. 2003. Microalgae for greenhouse gas abatement: An international R & D opportunity. *Ambiente TPoint* 1: 24–28
- Santos NO, Oliveira SM, Alves MC, Cammarota MC. 2014. Methane production from marine microalgae. *Ischr Galbana Bior Techn.* 157: 60–67
- Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, Marx UC, Mussnug JH, Posten C, Kruse O, Hankamer B. 2008. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioen Res.* 1: 20–43
- Schultz-Jensen N, Thygesen A, Leipold F, Thomsen ST, Roslander C, Lilholt H, Bjerre AB. 2013. Pretreatment of the macroalgae *Chaetomorpha linum* for the production of bioethanol – Comparison of five pretreatment technologies. *Bior Techn.* 140: 36–42
- Suprihatin, Romli M. 2012. Conceptual Model of an Integrated Agricultural Residues Management. Proceeding of the 2nd Korea - Indonesia Workshop & International Symposium on Bioenergy from Biomass DRN Building, Puspiptek, Serpong-BSD City, Indonesia, 13 – 15 June 2012, p. 18-15
- Talebnia F, Karakashev F, Angelidaki I. 2010. Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bior Techn.* 101: 4744–4753
- Vanegas CH, Bartlett J. 2013. Green energy from marine algae: biogas production and composition from the anaerobic digestion of Irish seaweed species. *Env Technol.*, 34(15): 2277–2283