

KAJIAN DAMPAK LINGKUNGAN PRODUK TEPUNG AGAR MENGGUNAKAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

STUDY OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT ON AGAR FLOUR PRODUCT USING LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) METHOD

Siti Aminatu Zuhria*, Nastiti Siswi Indrasti, dan Mohamad Yani

Program Studi Teknik Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor Kampus
IPB Darmaga PO Box 220, Bogor 16680, West Java, Indonesia

*Email korespondensi: aminazuhria@apps.ipb.ac.id

Makalah: Diterima 3 Agustus 2021; Diperbaiki 8 November 2021; Disetujui 20 November 2021

ABSTRACT

Gracilaria sp is one type of red algae seaweed that has been developed in Indonesia. *Gracilaria sp* is used as raw material for agar flour. Currently, agar flour is widely used to meet the needs of both food and non-food industries. Therefore, agar flour must be developed to obtain the best quality, adequate quantity, and eco-friendly. This study aimed to identify the inputs, outputs, and environmental impacts of the agar flour product's life cycle, determine the source of the impact (hotspot), and recommend improvement scenarios. The method used to analyze the environmental impact caused by a product was life cycle assessment (LCA). The scope of the LCA study was cradle to gate, namely cultivation of *Gracilaria sp*, transportation of raw material to industry, and production process in the industry. The environmental impact study was global warming with CO₂eq unit, acidification with SO₂eq unit, and eutrophication with PO₄eq unit. Based on the research, the impacts of global warming, acidification, and eutrophication on the life cycle of agar flour were 26.28 kg-CO₂eq/kg agar flour, 0.18 kg-SO₂eq/kg agar flour, and 0.03 kg-PO₄eq/kg, respectively. The production process unit was hotspot for the impact of global warming, acidification, and eutrophication on the life cycle of agar flour. The improvement scenarios to reduce the environmental impacts included replacing urea with NPK fertilizer, finding suppliers of raw materials closer to the industry, and replacing coal with Compressed Natural Gas (CNG).

Keywords: agar flour, environmental impact, global warming, life cycle assessment

ABSTRAK

Gracilaria sp merupakan salah satu jenis rumput laut alga merah yang telah dikembangkan di Indonesia. *Gracilaria sp* dimanfaatkan sebagai bahan baku tepung agar. Saat ini, tepung agar banyak dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan industri baik pangan maupun non pangan. Oleh karena itu, tepung agar harus dikembangkan untuk mendapatkan kualitas terbaik, kuantitas yang cukup, dan menjadi produk ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi input, output dan dampak lingkungan dari daur hidup produk tepung agar, menentukan sumber dampak potensial (hotspot) dan merekomendasikan skenario perbaikan. Metode yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh suatu produk adalah *life cycle assessment* (LCA). Ruang lingkup kajian LCA yang dilakukan adalah *cradle to gate* meliputi budidaya rumput laut *Gracilaria sp*, pengangkutan bahan baku ke industri, dan proses produksi produk di industri. Dampak lingkungan yang dikaji meliputi pemanasan global dengan satuan CO₂eq, asidifikasi dengan satuan SO₂eq, dan eutrofikasi dengan satuan PO₄eq. Berdasarkan hasil penelitian, nilai dampak pemanasan global, asidifikasi, dan eutrofikasi pada daur hidup tepung agar masing-masing sebesar 26,28 kg-CO₂eq/kg tepung agar; 0,18kg-SO₂eq/kg tepung agar dan 0,03kg-PO₄eq/kg tepung agar. Unit proses produksi merupakan *hotspot* untuk dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi pada daur hidup tepung agar. Skenario perbaikan untuk menurunkan dampak lingkungan antara lain mengganti pupuk urea dengan pupuk NPK, mencari pemasok bahan baku yang lebih dekat dengan industri, dan mengganti penggunaan batu bara dengan *Compressed Natural Gas* (CNG).

Kata kunci: dampak lingkungan, pemanasan global, penilaian daur hidup, tepung agar

PENDAHULUAN

Rumput laut atau *seaweed* adalah salah satu jenis biota perairan yang menjadi komoditas unggulan di perairan Indonesia. Rumput laut merupakan makro *algae* dan termasuk dalam divisi *thallophyta*, yaitu tumbuhan yang mempunyai

struktur kerangka tubuh yang terdiri dari batang/thalus dan tidak memiliki daun serta akar (Sudarwati *et al.*, 2020). Indonesia merupakan negara kepulauan yang potensial untuk pengembangan budidaya rumput laut (Erlania dan Radiarta, 2017). Potensi areal budidaya rumput laut yang tercatat pada tahun 2018 mencapai 1,1 juta ha atau 9% dari seluruh

luas kawasan potensial laut yang sebesar 12.123.383 ha. Adapun tingkat pemanfaatannya diperkirakan baru mencapai 25% (KKP, 2019).

Potensi rumput laut memiliki peranan penting dalam meningkatkan pendapatan masyarakat daerah, khususnya masyarakat pesisir di Indonesia (Mariño *et al.*, 2019). Rumput laut memiliki nilai ekonomi pasar yang kompetitif baik di pasar domestik maupun ekspor (Tombolotutu *et al.*, 2019). Rumput laut Indonesia menguasai lebih dari separuh rumput laut dunia. Salah satu jenis rumput laut yang cukup potensial dan banyak dijumpai di perairan Indonesia yaitu *Gracilaria* sp (Susilowati *et al.*, 2019). *Gracilaria* sp termasuk jenis rumput laut merah (*Rhodophyceae*) yang menjadi sumber bahan baku produk olahan rumput laut berupa tepung agar (Ashila *et al.*, 2021). Tepung agar diperoleh dengan cara ekstraksi rumput laut, dan dikomersialkan dalam berbagai merek dan bentuk seperti tepung, lembaran dan batangan. Produk olahan agar dapat meningkatkan nilai tambah hingga 9 kali lipat dari bahan baku (KKP, 2018).

Tepung agar banyak dimanfaatkan diberbagai industri makanan dan minuman, farmasi, kosmetik, pakan ternak dan lainnya. Sekitar 90% tepung agar dimanfaatkan di industri makanan dan minuman sebagai penstabil, pengental dan pembentuk gel, sedangkan 10% lainnya dimanfaatkan sebagai media bakteriologi, elektroforesis gel, kromatografi, imunologi dan imobilisasi enzim (Surender *et al.*, 2018). Olahan rumput laut banyak dimanfaatkan untuk memenuhi berbagai kebutuhan industri baik pangan maupun non pangan, sehingga memacu pengembangan industri rumput laut di Indonesia.

Berdasarkan peta panduan (*Roadmap*) pengembangan Industri Rumput laut Nasional Tahun 2018-2021, menurut Kementerian Perindustrian terdapat 14 perusahaan industri agar dengan kemampuan produksi 7.658 ton/tahun (Perpres No.3 Tahun 2019). Industri agar menyerap rumput laut sebesar 18% dan mengalami pertumbuhan rata-rata pertahun sebesar 3,41% (Sudarwati *et al.*, 2020). Kegiatan pengolahan rumput laut di industri tidak hanya menciptakan suatu produk baru yang memiliki nilai tambah lebih tinggi dari sekedar bahan mentah, tetapi juga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi tepung agar berasal dari penggunaan bahan, energi, limbah (limbah padat dan limbah cair) dan emisi (air, tanah dan udara). Limbah cair dihasilkan dari proses produksi dan proses pencucian bahan, alat dan mesin. Limbah cair dari produk olahan rumput laut memiliki karakteristik berwarna coklat kehitaman dengan pH sangat tinggi sekitar 12-13 dan mengandung kadar kalium tinggi sekitar 1-7% (Ariani *et al.*, 2015). Limbah padat berasal dari pemisahan ekstrak rumput laut dari padatnya,

sedangkan emisi udara berasal dari beberapa proses produksi seperti proses pembakaran pada *boiler*.

Salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui dampak lingkungan dari suatu produk adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA adalah metode yang dapat digunakan untuk menganalisis potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh suatu aktivitas baik produk atau jasa dengan mengetahui *input* yang digunakan, energi dan sumber daya alam (Finnveden dan Potting, 2014). Kajian LCA dapat digunakan untuk mengidentifikasi proses tertentu yang dapat ditingkatkan untuk meminimalkan dampak dan mengoptimalkan produksi. Hasil kajian LCA dapat menghasilkan produk yang berwawasan lingkungan, yang tidak hanya menguntungkan bagi industri tetapi juga melestarikan lingkungan. Menurut SNI ISO 14040 : 2016 penerapan LCA terdiri atas empat tahapan yaitu penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, analisis dampak dan interpretasi.

Kajian LCA dilakukan di PT XYZ yang memproduksi tepung agar dari rumput laut *Gracilaria* sp. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi *input* (sumber daya dan energi) yang digunakan dan *output* (produk, produk samping, limbah dan emisi) yang dihasilkan dari proses produksi tepung agar, menghitung besaran dampak yang ditimbulkan ke lingkungan dan mengetahui *hotspot*-nya, serta menyusun skenario perbaikan dampak lingkungan sebagai informasi dalam pengembangan produk hilirnya, sehingga mewujudkan industri olahan rumput laut yang bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan

METODE PENELITIAN

Tahapan Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang didapatkan dari hasil wawancara langsung dengan petani rumput laut, tenaga ahli dan karyawan di industri. Data sekunder didapatkan dari dokumentasi perusahaan berupa data penggunaan bahan baku, energi, mesin dan peralatan pada setiap tahapan proses produksi dan beberapa referensi hasil penelitian yang sudah dipublikasikan sebelumnya. Sumber dan jenis data yang diperlukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tahapan Penelitian

Pelaksanaan metode LCA ini mengacu pada pedoman pelaksanaan LCA menurut *Framework* SNI ISO 14040 : 2016 yang terdiri atas empat tahapan yaitu penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, analisis dampak lingkungan dan interpretasi hasil.

Tabel 1. Sumber dan jenis data penelitian

| Data | Jenis data | Sumber data |
|---|------------------------------|--|
| Budidaya rumput laut <i>Gracilaria</i> sp | Data Primer | Wawancara Observasi lapang |
| Transportasi bahan baku | Data Primer | Wawancara |
| Transportasi bahan tambahan dan kemasan | Data Primer | Wawancara |
| Aliran material dan energi pada proses produksi | Data Primer | Wawancara Observasi lapang |
| Hasil produk samping dan penanganannya | Data Primer | Wawancara Observasi lapang |
| Neraca massa dan neraca energi | Data Primer | Wawancara Observasi lapang |
| Inventori (data input-output) | Data Primer Data Sekunder | Wawancara Observasi lapang Studi pustaka |
| Dampak lingkungan | Data Primer Data Sekunder | Hasil analisis data inventori Studi pustaka |
| Skenario perbaikan | Data Primer Data Sekunder | Hasil analisis data dampak lingkungan Studi pustaka |

Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup

Penentuan tujuan dan ruang lingkup merupakan tahapan awal dalam melakukan analisis LCA. Tujuan dari kajian LCA ini yaitu menentukan dampak lingkungan yang dihasilkan dari produk tepung agar pada lingkup *cradle to gate*. Ruang lingkup *cradle to gate* yaitu dimulai dari proses budidaya rumput laut, transportasi rumput laut kering, dan proses produksi tepung agar di industri. Selain ruang lingkup, ditetapkan batasan sistem yang merupakan rangkaian kriteria untuk menentukan unit proses yang dikaji dari sistem produk. Ruang lingkup kajian LCA dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan batasan sistem dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah menentukan tujuan dan ruang lingkup, dilanjutkan dengan menentukan unit fungsi sebagai nilai kuantifikasi jasa yang diberikan oleh suatu produk. Unit fungsi yang digunakan yaitu 1 kg tepung agar.

Analisis Inventori

Tahap analisis inventori dilakukan untuk mengidentifikasi siklus hidup produk, pengumpulan data yang dibutuhkan serta pengkuantifikasian data untuk proses analisis dampak pada tahapan penelitian selanjutnya. Data dianalisis sesuai tujuan dan ruang lingkup yang sudah ditentukan pada tahapan sebelumnya. Pada tahapan analisis inventori dilakukan beberapa hal diantaranya pengumpulan data primer dan data sekunder, menggambarkan diagram alir proses produksi dan neraca massa untuk mendeskripsikan input, proses dan output dari produk, dan melakukan perhitungan dan olah data.

Analisis Dampak

Analisis dampak yaitu tahapan untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang dihasilkan berdasarkan hasil analisis inventori pada tahap sebelumnya. Pada metode LCA, analisis dampak lingkungan diperlukan untuk mengkuantifikasikan potensi dampak lingkungan berdasarkan hasil analisis

data inventori. Dampak lingkungan yang dikaji adalah pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi.

Interpretasi Hasil

Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan hasil akhir kajian berdasarkan hasil analisis inventori dan analisis dampak. Interpretasi hasil digunakan sebagai dasar untuk merekomendasikan skenario perbaikan untuk mengurangi dampak lingkungan sesuai dengan definisi tujuan dan ruang lingkup kajian yang telah ditentukan

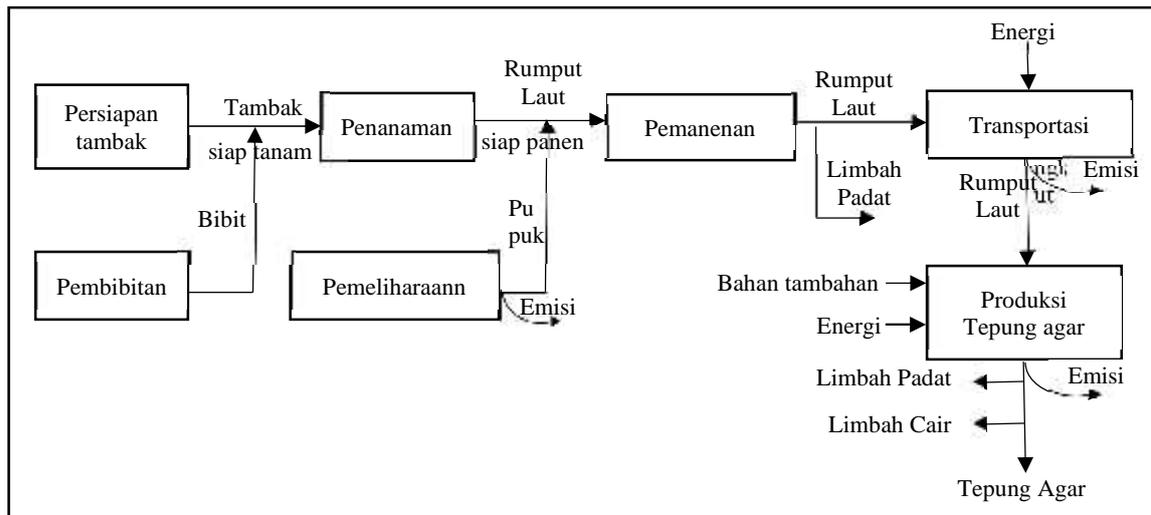
Tahapan Pengolahan dan Penyajian Data

Input data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*. Data yang diinput akan dijadikan data inventori untuk melihat hasil *input* dan *output* pada setiap unit proses. Data inventori bersumber dari neraca massa dan neraca energi pada setiap unit proses. Data inventori digunakan untuk mengetahui besaran dampak lingkungan dari sumber emisi pada daur hidup tepung agar. Proses pengolahan dan penyajian data inventori menggunakan bantuan perangkat lunak SimaPro versi 9.1.1.7 *Faculty* metode CML-IA *baseline V3.06*

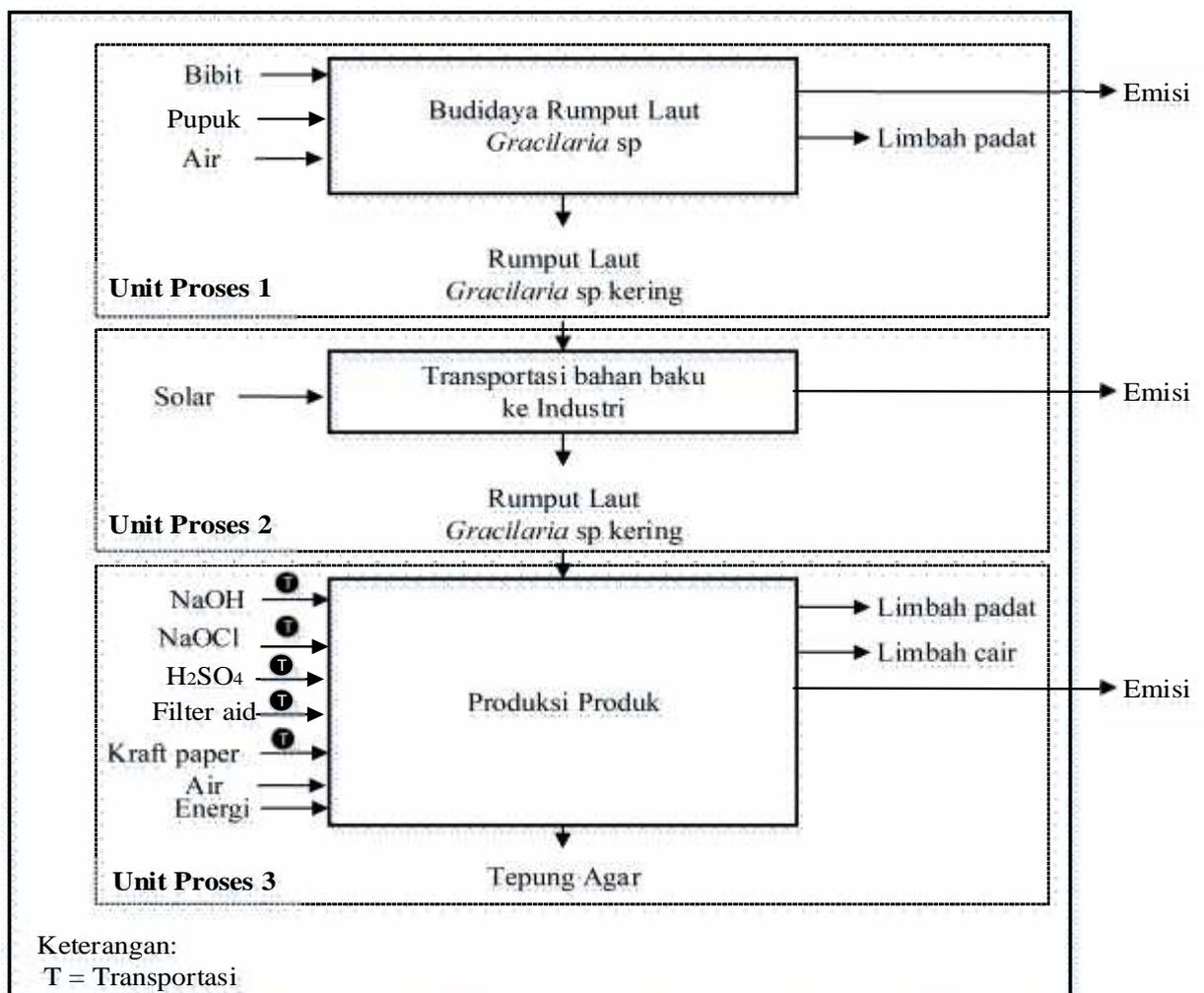
HASIL DAN PEMBAHASAN

Industri Rumput Laut PT XYZ

Proses produksi tepung agar di PT XYZ menggunakan bahan baku dari jenis rumput laut *Gracilaria* sp. Bahan baku diperoleh dari pembudidaya maupun penjual rumput laut di Pulokerto Kabupaten Pasuruan, dan distribusikan ke industri dalam keadaan rumput laut *Gracilaria* sp kering. Rumput laut kering memiliki daya simpan lebih lama serta mempermudah dalam pengangkutan bahan baku dibandingkan dengan rumput laut yang basah. PT XYZ membutuhkan sekitar 600 kg rumput laut *Gracilaria* sp untuk satu kali proses produksi yang dimasak dalam tangki proses.



Gambar 1. Ruang lingkup kajian LCA tepung agar



Gambar 2. Batasan sistem kajian LCA tepung agar

Tangki proses yang digunakan di PT XYZ memiliki diameter 2 meter, tinggi 6 meter dan volume 12.000 L. Produksi tepung agar selain membutuhkan

bahan baku juga membutuhkan bahan tambahan. Bahan tambahan yang digunakan pada proses produksi tepung agar diantaranya:

Natrium Hidroksida (NaOH)

NaOH merupakan reduktor kuat yang berperan sebagai alkali. Proses produksi agar di PT XYZ membutuhkan NaOH sebanyak 7% dari bahan baku. Penambahan NaOH bertujuan untuk memudahkan proses penarikan ekstrak agar ketika ada proses penambahan bahan kimia yang memiliki sifat asam, sehingga akan mempengaruhi rendemen yang dihasilkan (Santika *et al.*, 2014).

Asam Sulfat (H₂SO₄)

H₂SO₄ adalah cairan kimia yang memiliki sifat korosif, tidak berwarna, tidak berbau, sangat reaktif dan mampu melarutkan berbagai logam (Agustina, 2017). Asam sulfat dapat larut di dalam air dengan berbagai rasio dan perbandingan. Cairan kimia ini memiliki titik leleh sebesar 10,49° C dan titik didih berada pada temperature 340° C. Titik didih asam sulfat sangat bergantung pada cairan kimianya (Arita *et al.*, 2016). Asam Sulfat yang dibutuhkan untuk proses produksi agar di PT XYZ sebanyak 30 liter yang dilarutkan dalam 6000 L air dengan konsentrasi 98%. Proses ekstraksi dengan praperlakuan asam bertujuan untuk meningkatkan rendemen tepung agar yang dihasilkan dan untuk memperpendek waktu ekstraksi.

Natrium Hipoklorit (NaOCl)

Natrium hipoklorit merupakan salah satu senyawa kimia klor berupa kaporit yang digunakan sebagai zat pemutih (*bleaching agent*) dalam berbagai bidang industri (Rohmah dan Sulistyorini, 2017). Pada umumnya, NaOCl tersedia dalam bentuk bubuk putih, pellet atau pelat datar. PT XYZ menggunakan NaOCl bubuk untuk proses pemucatan yang bertujuan untuk melarutkan zat warna yang terkandung dalam larutan rumput laut sehingga dapat diperoleh larutan yang lebih jernih.

Filter Aid

Filter aid merupakan media penyaringan yang digunakan dalam proses filtrasi untuk memisahkan partikel halus dari cairan (Golmaei *et al.*, 2013). Filter aid ditambahkan pada rumput laut yang sudah menjadi bubur dan dilakukan penambahan air panas untuk memudahkan penyaringan. Proses penyaringan atau filtrasi pada produksi tepung agar menggunakan alat *filter press* dengan prinsip untuk menyaring bubur rumput laut dengan sistem press/tekanan cepat dalam keadaan panas, sehingga filtrate dalam bentuk cairan kental dapat terpisah dari residu atau ampas padat (Sinurat dan Marliani, 2017).

Bahan kemasan yang digunakan di PT XYZ yaitu kemasan kantong *kraft paper* berkapasitas 25 kg tepung agar/kantong kemasan, yang kemudian *disealer* dan produk siap dipasarkan.

Analisis Inventori

Analisis inventori berisi data *input* dan *output* dari siklus hidup tepung agar. Inventarisasi siklus hidup tepung agar adalah memasukkan data di bagian inventaris pada *software* SimaPro yang dimulai dari tahapan budidaya rumput laut *Gracilaria* sp, transportasi pengiriman bahan baku rumput laut kering dari *supplier* ke industri, dan proses produksi tepung agar di industri. Proses inventarisasi material *input* dan *output* pada data inventori SimaPro dengan memasukkan data material seperti bahan baku dan bahan tambahan, penggunaan energi, limbah dan emisi. Proses memasukkan data inventori SimaPro budi daya rumput laut *Gracilaria* sp, transportasi dan proses produksi tepung agar di industri diantaranya:

1. *Input* pada proses budidaya rumput laut *Gracilaria* sp dilakukan untuk satu kali proses panen dalam 1 tahun (Tabel 2).
2. Data inventori pada transportasi terdapat tiga jenis data berdasarkan bahan yaitu data inventori transportasi bahan baku, tambahan dan kemasan (Tabel 3). Transportasi yang digunakan yaitu truk sedang dengan bahan bakar solar. Konsumsi penggunaan solar pada truk sedang yaitu 9,6 km/liter. Jenis kendaraan yang digunakan yaitu *light commercial vehicle* (LCV). LCV merupakan jenis kendaran niaga ringan beroda empat yang banyak digunakan untuk mengangkut barang yang beratnya kurang dari 3,5 ton. Perhitungan data inventori dilakukan dengan *software* Simparo menggunakan satuan ton.km(tkm). Penentuan jarak dari *supplier* ke industri berdasarkan aplikasi *google maps* dan dihitung untuk sekali perjalanan.

Satu kali proses produksi tepung agar membutuhkan bahan baku rumput laut *Gracilaria* sp sebanyak 600 kg dan menghasilkan 66,43 kg tepung agar. Total kebutuhan listrik untuk satu kali proses produksi tepung agar yaitu 2,53 kwh/kg-tepung agar. Hasil analisis inventori data *input* produksi tepung agar di industri PT XYZ dalam 1 tahun (Tabel 4). Proses produksi tepung agar di PT XYZ mendominasi penggunaan energi listrik tertinggi pada proses *dewatering* dengan persentase 29,53%, hidroekstraksi 21,17% dan filtrasi 11,03% serta diikuti oleh tahapan-tahapan pengolahan lainnya. Persentase tingginya penggunaan listrik berdasarkan penggunaan peralatan yang memerlukan daya besar dan waktu proses yang cukup lama. Beberapa mesin produksi yang mengkonsumsi listrik dengan daya besar seperti motor agitator, pompa sirkulasi, pompa transfer, pompa hidrolis, pompa piston dan pompa air. Kebutuhan listrik pada setiap tahapan proses produksi tepung agar dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 2. Data inventori proses budidaya rumput laut *Gracilaria* sp

| Data | Inventori | Satuan | Jumlah |
|-----------------------------|------------------------|--------|-----------|
| Input | | | |
| Pembibitan | Bibit (basah) | kg | 160.000 |
| | Air | liter | 9.800 |
| Perawatan atau pemeliharaan | Pupuk | kg | 1.920 |
| Output | | | |
| Panen | Rumput laut basah | kg | 1.600.000 |
| | Rumput laut kering | kg | 240.000 |
| | Limbah padat (kotoran) | kg | 12.000 |

Tabel 3. Data inventori transportasi ke PT XYZ

| Transportasi ¹ | Jenis Kendaraan | Berat | Jarak (tkm) |
|--------------------------------|-----------------|-------|-------------|
| Bahan baku | | | |
| <i>Gracilaria</i> sp | LCV | 2000 | 3689 |
| Bahan tambahan | | | |
| NaOH | LCV | 1090 | 11957 |
| NaOCl | LCV | 1090 | 703,35 |
| H ₂ SO ₄ | LCV | 1090 | 859,65 |
| Filter aid | LCV | 1090 | 2891,55 |
| Bahan kemasan | | | |
| <i>Kraft paper</i> | LCV | 1090 | 263,50 |

Sumber data : ¹PT XYZ

Tabel 4. Data inventori proses produksi tepung agar di industri PT XYZ

| Data | Satuan | Jumlah/tahun |
|--------------------------------|--------|--------------|
| Input | | |
| <i>Gracilaria</i> sp | kg | 237.600 |
| NaOH | kg | 166.320 |
| H ₂ SO ₄ | kg | 11.880 |
| NaOCl | kg | 9.504 |
| Filter aid | kg | 39.600 |
| <i>Kraft paper</i> | pcs | 1.055 |
| Air | liter | 32.076.000 |
| Listrik | kwh | 66.429 |
| Batu bara | kg | 148.500 |
| Solar | liter | 118,8 |
| LPG | liter | 91,47 |
| Output | | |
| Produk tepung agar | kg | 26.366 |
| Limbah cair | liter | 29.169.360 |
| Limbah padat | kg | 2.652.241,22 |

Tabel 5. Kebutuhan listrik pada produksi tepung agar

| Tahapan proses | Total konsumsi listrik (Kwh/jam) | Persentase (%) |
|-------------------------|----------------------------------|----------------|
| <i>Alkali treatment</i> | 18,33 | 6,72 |
| Pencucian 1 | 11,00 | 4,03 |
| <i>Bleaching</i> | 18,33 | 6,72 |
| Pengasaman | 19,25 | 7,06 |
| Pencucian 2 | 11,00 | 4,03 |
| Hidroekstraksi | 57,75 | 21,17 |
| Filtrasi | 30,08 | 11,03 |
| Presipitasi | 3,00 | 1,10 |
| <i>Dewatering</i> | 80,55 | 29,53 |
| Pemotongan | 17,93 | 6,58 |
| Penepungan | 5,50 | 2,02 |

Analisis Dampak

Perhitungan nilai dampak dilakukan berdasarkan data *input* (bahan baku dan bahan

tambahan) serta *output* berupa produk, produk samping atau limbah (limbah padat, limbah cair dan emisi) dari setiap unit proses siklus hidup tepung

agar. Perhitungan nilai dampak dilakukan sepanjang daur hidup tepung agar berdasarkan unit proses dan sumber emisi sesuai ruang lingkup yang dikaji dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *SimaPro Versi 9.1.1.7 Faculty*. Perhitungan dampak dilakukan dengan unit fungsi 1 kg tepung agar pada setiap unit proses.

Analisis Dampak Berdasarkan Unit Proses

Satu daur hidup produksi tepung agar yang dikaji terbagi menjadi tiga unit proses yaitu proses budidaya rumput laut *Gracilaria* sp, transportasi bahan baku rumput laut *Gracilaria* sp kering ke industri, dan proses produksi tepung agar di industri. Karakteristik dampak lingkungan yang dikaji yaitu pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi.

Budidaya *Gracilaria* sp

Bahan baku yang digunakan untuk proses produksi tepung agar adalah jenis rumput laut *Gracilaria* sp. Jenis rumput laut ini memiliki kontribusi paling besar (>90%) untuk menyumbang bahan baku agar dibandingkan dengan genus *agarophytes* yang lainnya seperti *Gelidium*, *Pterocladia*, dan *Gelidiella* (WWF Indonesia, 2014). Ruang lingkup kajian tahapan budi daya rumput laut *Gracilaria* sp meliputi persiapan tambak, pembibitan, penanaman, perawatan atau pemeliharaan, panen dan pasca panen.

Pada penelitian ini, proses budi daya rumput laut *Gracilaria* sp dilakukan di tambak menggunakan metode tebar. Metode tebar merupakan metode yang relatif sederhana dan membutuhkan biaya yang lebih murah dan bisa dilakukan sistem polikultur dengan udang dan bandeng. Keuntungan budi daya rumput laut di tambak salah satunya berfungsi untuk menghasilkan oksigen dalam air dan sebagai filter. Selain itu, rumput *Gracilaria* sp sebagai tanaman hijau melakukan proses fotosintesis yang menghasilkan gas oksigen (O₂) dan mengikat gas karbondioksida (CO₂). Pengikatan gas karbondioksida berpotensi untuk membantu mengurangi terjadinya dampak pemanasan global (Duarte *et al.*, 2017). Akan tetapi, proses budi daya rumput laut *Gracilaria* sp berpotensi menghasilkan dampak lingkungan dari penggunaan pupuk yang menyebabkan dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi. Berdasarkan analisis neraca massa tepung agar, dapat diketahui untuk memproduksi 1 kg tepung agar dibutuhkan 9,03 kg rumput laut *Gracilaria* sp kering.

Hasil perhitungan dampak lingkungan pada unit budi daya rumput laut *Gracilaria* sp dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan nilai dampak terbesar dari penggunaan pupuk pada budi daya rumput laut *Gracilaria* sp adalah pemanasan global. Penggunaan pupuk berkontribusi menyumbang dampak pemanasan global dari jenis polutan N₂O yang dihasilkan dari proses denitrifikasi dari penggunaan pupuk. Daur hidup pupuk urea juga memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap kategori dampak pemanasan global yaitu 4,73 kgCO₂eq/50 kg-pupuk (Adiansyah *et al.*, 2019).

Transportasi

Proses transportasi bahan baku dari *supplier* ke industri menghasilkan dampak lingkungan dari penggunaan solar sebagai bahan bakar. Total nilai dampak lingkungan dari unit transportasi dihitung menggunakan *software* Simparo dengan satuan ton.km (tkm) dan dihitung untuk satu kali perjalanan. Besaran nilai karakteristik dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi dapat dilihat pada Tabel 7.

Produksi Tepung Agar

Proses produksi tepung agar membutuhkan *input* berupa bahan baku, bahan tambahan kimia, bahan kemasan, penggunaan energi dan menghasilkan *output* berupa produk, limbah dan emisi. Pada unit produksi, perhitungan dampak dari pengadaan bahan tambahan berupa bahan-bahan kimia dan bahan kemasan, termasuk transportasi pengadaan bahan ke industri dilakukan analisis dampak lingkungannya. Dampak lingkungan dihitung berdasarkan berat bahan sebagai muatan dan jarak yang ditempuh ke industri dengan satuan ton.km (tkm).

Energi yang digunakan pada produksi tepung agar di PT XYZ meliputi batu bara, listrik, solar dan LPG. Batu bara digunakan sebagai bahan bakar pada *boiler*, listrik digunakan untuk menggerakkan mesin dan penerangan, solar digunakan sebagai bahan bakar transportasi untuk mengangkut limbah padat dari hasil akhir produksi di kawasan area produksi ke tempat penampungan limbah padat yang berlokasi di belakang area industri, LPG digunakan sebagai bahan bakar kompor untuk memasak sampel tepung agar untuk uji *gel strength*. Besaran nilai karakteristik dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 6. Nilai karakteristik dampak lingkungan pada unit proses budidaya *Gracilaria* sp

| Dampak | Satuan | Nilai dampak/kg-rumput laut <i>Gracilaria</i> sp kering | Nilai dampak/kg-tepung agar |
|------------------|-----------------------|---|-----------------------------|
| Pemanasan global | kg-CO ₂ eq | 2,61E-02 | 2,35E-01 |
| Asidifikasi | kg-SO ₂ eq | 1,39E-04 | 1,26E-03 |
| Eutrofikasi | kg-PO ₄ eq | 2,94E-05 | 2,65E-04 |

Tabel 7. Nilai karakteristik dampak lingkungan pada unit transportasi bahan baku

| Dampak | Satuan | Nilai dampak/kg-rumput laut <i>Gracilaria</i> sp kering | Nilai dampak/kg-tepung agar |
|------------------|-----------------------|---|-----------------------------|
| Pemanasan Global | kg-CO ₂ eq | 3,84x10 ⁻² | 3,47x10 ⁻¹ |
| Asidifikasi | kg-SO ₂ eq | 1,78x10 ⁻⁴ | 1,61x10 ⁻³ |
| Eutrofikasi | kg-PO ₄ eq | 3,91x10 ⁻⁵ | 3,53x10 ⁻⁴ |

Tabel 8. Nilai karakteristik dampak lingkungan pada unit produksi produk

| Dampak | Satuan | Nilai dampak/kg-tepung agar |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Pemanasan Global | kg-CO ₂ eq | 2.60E+01 |
| Asidifikasi | kg-SO ₂ eq | 1.83E-01 |
| Eutrofikasi | kg-PO ₄ eq | 2.56E-02 |

Penilaian satu daur hidup produk tepung agar terbagi menjadi tiga unit proses yaitu unit proses budi daya rumput laut *Gracilaria* sp, transportasi dan proses produksi. Unit fungsi 1 kg tepung agar digunakan sebagai satuan acuan untuk menghitung nilai total emisi dari daur hidup tepung agar. Pada unit proses budidaya rumput laut *Gracilaria* sp dan transportasi menghasilkan rumput laut *Gracilaria* sp kering, sehingga perlu dihitung kebutuhan rumput laut *Gracilaria* sp kering untuk produksi tepung agar. Hal ini bertujuan untuk memudahkan perhitungan nilai total emisi dampak yang dihasilkan. Nilai total dampak lingkungan untuk 1 kg tepung agar merupakan penjumlahan dari nilai dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap unit proses. Nilai total dampak lingkungan pada satu siklus hidup tepung agar dapat dilihat pada Tabel 9.

Analisis Dampak Berdasarkan Sumber Emisi

Sumber emisi dapat diketahui dengan menganalisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari setiap unit proses. Setiap unit proses menghasilkan berbagai sumber emisi yang dapat menyebabkan dampak lingkungan berupa pemanasan global, asidifikasi, dan eutrofikasi. Perhitungan nilai karakteristik dampak lingkungan dilakukan berdasarkan sumber emisi yang menjadi *input* dan *output* sesuai data inventori yang digunakan pada setiap unit proses.

Pemanasan Global Atau Global Warming (GW)

Pemanasan global disebabkan oleh beberapa jenis gas yang menyebabkan peningkatan temperatur permukaan bumi atau *global warming*. Beberapa gas yang berperan menimbulkan pemanasan global antara lain karbondioksida (CO₂), metana (CH₄) dan dinitrooksida (N₂O) (Latake and Pawar, 2015). Besaran nilai dampak pemanasan global dari jenis polutan CO₂, CH₄ dan N₂O dari daur hidup tepung agar berdasarkan sumber emisi dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10 menunjukkan penggunaan batu bara sebagai bahan bakar *boiler* berkontribusi besar untuk jenis polutan CO₂ dan N₂O, sedangkan untuk

jenis polutan CH₄ berasal dari limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi tepung agar. *Boiler* dengan bahan bakar batu bara menghasilkan uap panas, sehingga memiliki polutan ke udara yang tinggi. Limbah cair dihasilkan dari proses produksi tepung agar yang membutuhkan air cukup banyak untuk setiap tahapan prosesnya, sehingga limbah cair yang dihasilkan melimpah dan meningkatkan dampak pemanasan global dengan nilai CH₄ yang cukup tinggi. *Hotspot* potensi dampak pemanasan global berdasarkan sumber emisi pada daur hidup tepung agar yang dikaji yaitu penggunaan batu bara. Pemanasan global memicu terjadinya sejumlah konsekuensi terhadap lingkungan maupun aspek kehidupan manusia. Konsekuensi langsung dari pemanasan global yaitu meningkatnya bencana alam, kekeringan dan gelombang panas. Konsekuensi tidak langsung diantaranya ancaman terhadap kesehatan manusia, pengurangan keanekaragaman hayati dan kesenjangan kondisi sosial ekonomi masyarakat (Watts *et al.*, 2019).

Asidifikasi

Asidifikasi merupakan salah satu dampak lingkungan yang terjadi akibat adanya proses pengasaman air. Hal ini terjadi ketika jenis polutan SO₂ dan NO_x mencapai atmosfer bereaksi dengan uap air dan mengalami oksidasi serta menghasilkan asam sulfat dan asam nitrat dalam awan yang kemudian jatuh ke tanah dalam hujan atau salju (*wet deposition*). Pengasaman meningkat karena nilai SO₂ dan NO_x yang meningkat (Norton *et al.* 2013). Beberapa jenis polutan yang menyebabkan dampak asidifikasi adalah SO₂, NO_x, SO₃, NO, dan NH₃. Besaran nilai dampak asidifikasi untuk masing-masing jenis polutan pada daur hidup tepung agar dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11 menunjukkan sumber emisi penyebab dampak asidifikasi terbesar pada daur hidup tepung agar yaitu penggunaan batu bara pada jenis polutan SO₂ dan NO_x. Jenis polutan SO₃, NO dan NH₃ memiliki nilai dampak asidifikasi yang relatif cukup rendah, sehingga tidak berpengaruh secara signifikan terhadap dampak asidifikasi.

Tabel 9. Total besaran nilai karakteristik dampak lingkungan per 1 kg tepung agar

| Kategori dampak | Unit proses | Nilai |
|--|--|-----------------|
| Pemanasan Global (kg-CO ₂ eq/kg-tepung agar) | Budi daya rumput laut <i>Gracilaria</i> sp | 2.35E-01 |
| | Transportasi bahan baku | 5.60E-02 |
| | Produksi | 2.60E+01 |
| | Total | 2.63E+01 |
| Asidifikasi (kg-SO ₂ eq/kg-tepung agar) | Budi daya rumput laut <i>Gracilaria</i> sp | 1.26E-03 |
| | Transportasi bahan baku | 2.45E-03 |
| | Produksi | 1.85E-01 |
| | Total | 1.88E-01 |
| Eutrofikasi (kg-PO ₄ eq /kg-tepung agar) | Budi daya rumput laut <i>Gracilaria</i> sp | 2.65E-04 |
| | Transportasi bahan baku | 5.94E-04 |
| | Produksi | 2.60E-02 |
| | Total | 2.69E-02 |

Tabel 10. Besaran nilai dampak pemanasan global berdasarkan sumber emisi pada daur hidup tepung agar

| Sumber emisi | Jenis polutan (kg-CO ₂ eq/tahun) | | |
|--------------------------------|---|-----------------|------------------|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
| Pupuk | 2.32E-02 | 4.50E-06 | 2.65E-01 |
| Solar ¹ | 1.02E+01 | 6.56E-07 | 8.52E-02 |
| <i>Gracilaria</i> sp | 8.77E+03 | 5.99E-04 | 5.42E+01 |
| NaOH | 6.51E+05 | 3.15E+04 | 4.26E+03 |
| NaOCl | 1.47E+04 | 4.98E-04 | 1.39E+02 |
| H ₂ SO ₄ | 1.13E+03 | 5.33E+01 | 1.03E+01 |
| Filter aid | 1.03E+04 | 3.54E-04 | 1.26E+02 |
| <i>Kraft paper</i> | 3.10E+02 | 1.17E-05 | 4.97E+00 |
| Limbah padat | 7.49E+04 | 2.72E-03 | 2.08E+04 |
| Limbah cair | - | 2.17E+05 | - |
| Listrik | 1.74E+05 | 5.60E-04 | 1.14E+03 |
| Batubara | 2.28E+06 | 9.67E+04 | 8.18E+04 |
| Solar ² | 1.33E+01 | 4.95E-07 | 1.41E-01 |
| LPG | 1.78E-01 | 2.74E-09 | 1.60E-03 |

¹ bahan bakar untuk transportasi bahan baku² bahan bakar untuk transportasi di industri

Tabel 11. Besaran nilai dampak asidifikasi berdasarkan sumber emisi pada daur hidup tepung agar

| | Jenis polutan (kg-SO ₂ eq/tahun) | | | | |
|--------------------------------|---|-----------------|-----------------|----------|-----------------|
| | SO ₂ | NO _x | SO ₃ | NO | NH ₃ |
| Pupuk | 1.43E-01 | 3.66E-02 | 8.21E-09 | 1.43E-08 | 8.72E-02 |
| Solar ¹ | 2.72E-02 | 1.59E-02 | 2.51E-09 | 3.32E-09 | 9.08E-03 |
| <i>Gracilaria</i> sp | 1.96E+01 | 1.50E+01 | 1.64E-06 | 2.31E-06 | 6.29E+00 |
| NaOH | 3.91E+03 | 3.11E+02 | 4.27E-05 | 1.06E-04 | 1.18E+01 |
| NaOCl | 5.09E+01 | 1.96E+01 | 6.73E-06 | 3.57E-05 | 8.88E-01 |
| H ₂ SO ₄ | 4.00E+00 | 3.81E-01 | 2.19E-07 | 3.55E-07 | 5.71E-02 |
| Filter aid | 3.06E+01 | 3.14E+01 | 4.13E-06 | 4.12E-06 | 1.67E+00 |
| <i>Kraft paper</i> | 8.85E-01 | 6.88E-01 | 6.02E-06 | 3.35E-07 | 3.43E-02 |
| Limbah padat | 2.07E+02 | 2.56E+02 | 1.73E-05 | 3.51E-05 | 1.15E+03 |
| Listrik | 5.41E+02 | 2.30E+02 | 8.68E-06 | 9.64E-06 | 1.55E+00 |
| Batubara | 1.69E+04 | 2.72E+03 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 5.30E-01 |
| Solar ² | 3.09E-02 | 2.95E-02 | 4.06E-09 | 4.54E-09 | 8.53E-04 |
| LPG | 1.63E-03 | 3.46E-04 | 8.25E-11 | 7.05E-11 | 5.97E-06 |

¹ bahan bakar untuk transportasi bahan baku² bahan bakar untuk transportasi di industri

Hotspot potensi dampak asidifikasi berdasarkan sumber emisi pada daur hidup tepung agar yaitu penggunaan batu bara. Dampak asidifikasi mengakibatkan pengasaman pada sungai dan tanah akibat polutan udara antropogenik seperti SO₂, NH₃ dan NO_x. Pengasaman meningkatkan mobilisasi dan perilaku perlindungan logam berat di tanah dan memberikan dampak yang merugikan pada perairan, hewan dan tumbuhan karena mengganggu jaringan makanan (Kim dan Chae, 2016).

Eutrofikasi

Eutrofikasi merupakan permasalahan lingkungan yang terjadi di ekosistem akuatik yang mengakibatkan penipisan oksigen yang dapat merusak ekosistem perairan, yang disebabkan oleh hilangnya fosfor (Liu dan Chen, 2018). Beberapa polutan yang menyebabkan dampak eutrofikasi adalah NO_x, PO₄, N₂O, N dan P. Besaran nilai dampak eutrofikasi untuk masing-masing jenis polutan pada daur hidup tepung agar dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12 menunjukkan sumber emisi penyebab eutrofikasi terbesar pada daur hidup produk tepung agar yaitu listrik dan limbah cair pada jenis polutan fosfat (PO₄). Hal ini menunjukkan daur hidup tepung agar mengeluarkan jenis polutan fosfat yang cukup tinggi dibanding jenis polutan lainnya dengan nilai dampak eutrofikasi cukup rendah. *Hotspot* potensi dampak eutrofikasi berdasarkan sumber emisi pada daur hidup tepung agar yang dikaji yaitu penggunaan listrik dan limbah cair. Secara umum, dampak eutrofikasi merupakan masalah yang banyak terjadi di perairan seperti danau, waduk, sungai muara dan habitat pesisir. Hal ini disebabkan oleh masukan nutrisi yang berlebihan ke badan air terutama nitrogen dan fosfor. Konsentrasi nutrisi yang tinggi menyebabkan pertumbuhan alga yang berbahaya,

hipoksia, kematian ikan dan produksi racun (Wilkinson, 2017).

Interpretasi Hasil

Interpretasi hasil pada kajian LCA tepung agar dilakukan sebagai upaya merekomendasikan perbaikan untuk mengurangi dampak lingkungan. Dampak pemanasan global merupakan dampak terbesar dari setiap unit proses pada daur hidup tepung agar (Gambar 3). Vijay *et al.* (2018) mengevaluasi dampak lingkungan pada proses pengolahan rumput laut *Gracilaria edulis* menjadi agar dengan perseptif *cradle-to-gate*. Hasil penelitian menunjukkan proses produksi agar dari hasil ekstraksi 1 kg rumput laut *Gracilaria edulis* pada tahap budi daya menghasilkan dampak sebesar 13,2 kg-CO₂eq/kg agar ; 1,67x10⁻³ kg-P₄eq/kg agar dan 0,0412 kg-SO₂eq/kg agar, tahap transportasi sebesar 5,08 kg-CO₂eq/kg agar ; 1x10⁻⁶ kg P₄eq/kg agar dan 7,43x10⁻³ kg-SO₂eq/kg agar dan tahap produksi sebesar 54,9 kg-CO₂eq/kg agar ; 0,01184 kg-P₄eq/kg agar, dan 4,03x10⁻³kg-SO₂eq/kg agar. Berdasarkan hasil penelitian dapat diketahui dampak lingkungan terbesar adalah pemanasan global dari tahapan proses produksi dengan total 73,1 kg-CO₂eq.

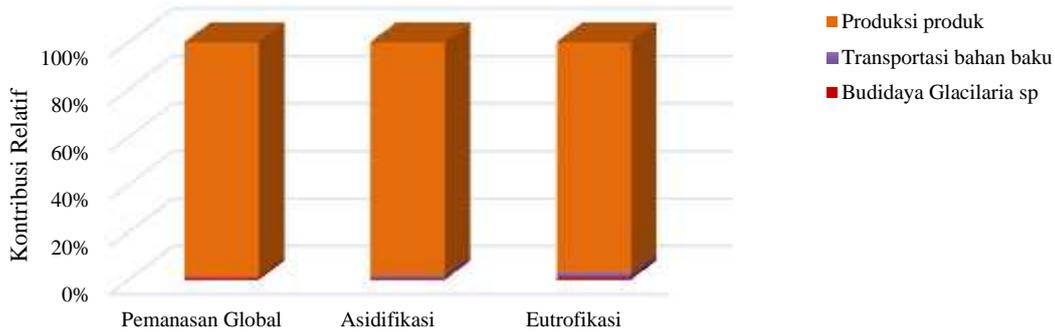
Daur hidup produk tepung agar menghasilkan dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi. *Hotspot* pada unit proses budidaya rumput laut memiliki sumber emisi terbesar dari dari penggunaan pupuk. Dampak lingkungan dari penggunaan pupuk yang berlebihan diantaranya mengakibatkan adanya pencemaran udara, air, tanah sehingga menyebabkan pemanasan global dan eutrofikasi (Chandini *et al.* 2019). Skenario perbaikan yang dapat dilakukan yaitu mengganti penggunaan pupuk urea dengan penggunaan pupuk NPK 15:15:15.

Tabel 12. Besaran nilai dampak eutrofikasi berdasarkan sumber emisi pada daur hidup tepung agar

| Sumber emisi | Jenis polutan (kg- PO ₄ eq/tahun) | | | | |
|--------------------------------|--|-----------------|------------------|----------|----------|
| | NO _x | PO ₄ | N ₂ O | N | P |
| Pupuk | 9.53E-03 | 2.25E-02 | 2.70E-04 | 5.66E-04 | 8.21E-05 |
| Solar ¹ | 4.15E-03 | 5.38E-03 | 8.68E-05 | 1.40E-04 | 2.22E-05 |
| <i>Gracilaria</i> sp | 3.89E+00 | 3.01E+00 | 5.52E-02 | 8.97E-02 | 1.24E-02 |
| NaOH | 8.07E+01 | 8.03E+01 | 4.34E+00 | 1.28E+00 | 2.36E-01 |
| NaOCl | 5.11E+00 | 2.25E+01 | 1.42E-01 | 8.04E-01 | 3.13E+01 |
| H ₂ SO ₄ | 4.15E-01 | 4.09E-01 | 1.05E-02 | 2.71E-03 | 1.21E-03 |
| Filter aid | 8.17E+00 | 5.91E+00 | 1.29E-01 | 1.72E-01 | 1.78E-02 |
| <i>Kraft paper</i> | 1.79E-01 | 2.87E-01 | 5.07E-03 | 1.15E-02 | 3.15E-02 |
| Limbah padat | 6.66E+01 | 7.43E+01 | 2.12E+01 | 2.95E+01 | 3.93E+00 |
| Limbah cair | - | 7.64E+02 | - | - | - |
| Listrik | 5.99E+01 | 8.56E+02 | 1.16E+00 | 2.58E+01 | 7.08E-02 |
| Batubara | 7.08E+02 | 0.00E+00 | 8.33E+01 | 2.57E-10 | 0.00E+00 |
| Solar ² | 7.68E-03 | 7.52E-03 | 1.44E-04 | 1.35E-04 | 2.25E-05 |
| LPG | 8.99E-05 | 3.61E-05 | 1.63E-06 | 1.24E-06 | 1.56E-06 |

¹ bahan bakar untuk transportasi bahan baku

² bahan bakar untuk transportasi di industry



Gambar 3. Kontribusi relatif dari setiap unit proses dengan kategori dampak

Tabel 13. Skenario perbaikan dari setiap unit proses pada siklus hidup tepung agar

| Unit proses | Skenario Perbaikan | Data | Pemanasan global (kg-CO ₂ eq/ kg-tepung agar) | Asidifikasi (kg-SO ₂ eq/ kg-tepung agar) | Eutrofikasi (kg-PO ₄ eq/ kg-tepung agar) |
|---|--|------------------|---|--|--|
| Budidaya rumput laut <i>Gracilaria</i> sp | Mengganti pupuk urea dengan pupuk NPK 15:15:15 | Realisasi | 2.35E-01 | 1.26E-03 | 2.65E-04 |
| | | Interpretasi | 6.89E-02 | 3.52E-04 | 1.00E-04 |
| | | Perubahan dampak | 1.66E-01 | 9.04E-04 | 1.65E-04 |
| | | Persentase (%) | 70,73 | 71,98 | 62,19 |
| Transportasi bahan baku | Mencari <i>supplier</i> yang lebih dekat dengan industri | Realisasi | 5.06E-01 | 2.45E-03 | 5.94E-04 |
| | | Interpretasi | 2.84E-01 | 1.49E-03 | 3.23E-04 |
| | | Perubahan dampak | 2.21E-01 | 9.65E-04 | 2.71E-04 |
| | | Persentase (%) | 43,74 | 39,31 | 45,61 |
| Proses produksi | Mengganti penggunaan batu bara dengan penggunaan CNG | Realisasi | 2.60E+01 | 1.85E-01 | 2.60E-02 |
| | | Interpretasi | 9.47E+00 | 5.22E-02 | 1.90E-02 |
| | | Perubahan dampak | 1.65E+01 | 1.32E-01 | 7.02E-03 |
| | | Persentase (%) | 63.57 | 71.71 | 26.97 |

Salah satu parameter polusi air dari penggunaan pupuk yaitu berasal dari nitrat yang merupakan komponen dasar pupuk. Pupuk NPK merupakan jenis pupuk multinutrisi atau pupuk kompleks yang memiliki kandungan tiga makronutrient seperti nitrogen (N), fosfat (P) dan kalium (K). Nitrogen dapat membantu pertumbuhan tanaman, fosfat dapat membantu proses vital tanaman dan kalium dapat membantu pergerakan air pada tanaman dan membuat *thalus* menjadi kuat. Pupuk NPK memiliki kandungan nutrient yang lebih lengkap dari pupuk urea. Penggunaan jenis pupuk NPK 15:15:15 menjadi skenario perbaikan yang dapat dilakukan. Kandungan nitrogen jenis pupuk NPK 15:15:15 yang lebih kecil dari kandungan nitrogen pada pupuk urea, diasumsikan memberikan dampak lingkungan yang lebih kecil dan kebutuhan nutrisi untuk tanaman tetap tercukupi. Persentase perbaikan dari penggunaan pupuk NPK 15:15:15 dapat menurunkan dampak pemanasan global,

asidifikasi dan eutrofikasi secara berurutan sebesar 70,73 ; 71,98 dan 62,19% (Tabel 13).

Hotspot pada unit proses transportasi bahan baku rumput laut kering dari *supplier* ke industri yaitu penggunaan solar sebagai bahan bakar transportasi. Skenario perbaikan yang dapat dilakukan yaitu mencari *supplier* bahan baku yang lebih dekat dengan industri. Persentase perbaikan dengan pemilihan *supplier* terdekat dari industri dapat menurunkan dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi secara berurutan sebesar 43,74 ; 39,31 dan 45,61% (Tabel 13).

Hotspot pada unit proses produksi berdasarkan sumber emisi yaitu penggunaan batu bara sebagai bahan bakar *boiler*. Skenario perbaikan yang dapat dilakukan yaitu mengganti penggunaan batu bara dengan CNG (*Compressed Natural Gas*). Persentase perbaikan dengan penggunaan CNG dapat menurunkan dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi secara berurutan sebesar 63,57 ; 71,71 dan 26,97% (Tabel 13).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kajian LCA tepung agar dengan ruang lingkup *cradle to gate* dimulai dari proses budidaya rumput laut *Gracilaria* sp, transportasi bahan baku rumput laut kering ke industri dan proses produksi tepung agar di industri. *Input* yang digunakan yaitu bahan baku rumput laut *Gracilaria* sp, bahan kimia tambahan dan sumber energi. *Output* yang dihasilkan berupa produk tepung agar, limbah padat, limbah cair serta emisi ke air, tanah dan udara. Daur hidup tepung agar dalam ruang lingkup *cradle to gate* memberikan dampak pemanasan global, asidifikasi dan eutrofikasi masing-masing sebesar 26,28 kg-CO₂eq/kg tepung agar ; 0,18 kg-SO₂eq/kg tepung agar, dan 0,03 kg-PO₄eq/kg tepung agar.

Hotspot penyebab dampak pemanasan global dan asidifikasi tertinggi yaitu pada unit produksi dari sumber emisi penggunaan batu bara. *Hotspot* penyebab dampak eutrofikasi tertinggi yaitu pada unit produksi dari sumber emisi penggunaan listrik dan limbah cair yang dihasilkan. Skenario perbaikan yang dapat dilakukan pada daur hidup tepung agar diantaranya pada unit budidaya rumput laut *Gracilaria* sp yaitu mengganti pupuk urea dengan pupuk NPK 15:15:15, pada unit transportasi yaitu mencari *supplier* yang lebih dekat dengan industri, dan pada unit proses produksi tepung agar yaitu mengganti penggunaan batubara dengan *Compressed Natural Gas* (CNG).

Saran

Penentuan ruang lingkup kajian LCA dilakukan dengan batasan sistem *cradle to grave* dari pengadaan bahan baku sampai tahap konsumsi akhir produk, sehingga dampak lingkungan yang ditimbulkan dapat teridentifikasi secara menyeluruh. Perlu mempertimbangkan adanya perbaikan teknologi atau proses produksi yang lebih baik untuk meningkatkan produktivitas sistem produksi. Hasil kajian LCA ini dapat dijadikan dasar untuk kajian LCA produk olahan tepung agar yang dikelompokkan menjadi 5P yaitu pangan, pakan, pupuk, produk kosmetik dan produk farmasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia yang telah membiayai penelitian ini dan memberikan beasiswa LPDP selama studi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Adiansyah JS, Ningrum NP, Pratiwi D, Hadiyanto H. 2019. Kajian daur hidup (*life cycle assessment*) dalam produksi pupuk urea: studi

kasus PT Pupuk Kujang. *J Ilmu Lingkung.* 17(3):522. doi:10.14710/jil.17.3.522-527.

- Agustina E. 2017. Uji aktivitas senyawa antioksidan dari ekstrak daun tiin (*ficus carica linn*) dengan pelarut air, metanol dan campuran metanol-air. *Klorofil.* 1(1):38-47. <http://jurnal.uinsu.ac.id/index.php/klorofil/article/view/1240/997>
- Ariani MN, Cahyono HB, dan Yuliasuti R. 2015. Pemanfaatan limbah alkali industri rumput laut dan limbah *pickling* industri pelepasan logam sebagai pupuk anorganik. *Jurnal Riset Industri.* 9(1): 39-48. <http://ejournal.kemenperin.go.id/jri/article/view/160>.
- Arita S, Widiyanto H D, dan Sucitro A. 2016. Pengaruh jumlah katalis dan waktu reaksi pada proses esterifikasi limbah padat pabrik CPO. *J Teknik Kimia.* 1(22). <http://ejournal.ft.unsri.ac.id/index.php/JTK/article/view/533>.
- Ashila Y, Rahmatunnisa S, F GZ. 2021. Application of agar-agar as food additives. *Asian Journal Fisheries and Aquatic Research* 12(5):13-24. doi:10.9734/AJFAR/2021/v12i530244.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2016. SNI ISO 14040 : 2016. Manajemen lingkungan - penilaian daur hidup - prinsip dan kerangka kerja. Badan Standardisasi Nasional.
- Chandini, Kumar R, Kumar R, Prakash O. 2019. The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem. *Research Trends in Environmental Sciences* (pp.69-86) Edition: 2nd Chapter: 5.
- Duarte CM, Wu J, Xiao X, Bruhn A, Krause-Jensen D. 2017. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?. *Frontiers in Marine Scienc.* doi:10.3389/fmars.2017.00100.
- Erlania E dan Radiarta IN. 2017. Observation of wild seaweed species in Labuhanbua waters, Indonesia: a preliminary assessment for aquaculture development. *Omni-Akuatika.* 13(1). doi:10.20884/1.oa.2017.13.1.172.
- Finnveden G dan Potting J. 2014. Life cycle assessment. *Encyclopedia Toxicology* (3) doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00627-8
- Golmaei M, Kinnarinen T, dan Häkkinen A. 2013. Use of filter aids for improving the filterability of biomass suspensions. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 52 : 14955-14964) .doi.org/10.1021/ie4021057
- [KKP] Kementerian Kelautan dan Perikanan. 2018. Laporan tahunan 2018. Jakarta : Sekretariat Jenderal Kementerian Kelautan dan Perikanan.
- [KKP] Kementerian Kelautan dan Perikanan. 2019. Peluang usaha dan investasi rumput laut. Jakarta : Direktorat Usaha dan Investasi Kementerian Kelautan dan Perikanan.
- Kim TH dan Chae CU. 2016. Environmental impact

- analysis of acidification and eutrophication due to emissions from the production of concrete. *Sustain.* 8(6):1–20. doi:10.3390/su8060578.
- Latake PT dan Pawar P. 2015 . The greenhouse effect and its impacts on environment. *International Journal Innov Research and Creative Technology* . www.ijirct.org. 1(3).
- Liu Y dan Chen J. 2018. Phosphorus cycle. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* .doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09043
- Mariño M, Breckwoldt A, Teichberg M, Kase A, Reuter H. 2019. Livelihood aspects of seaweed farming in Rote Island, Indonesia. *Mar Policy*. 107 June:103600. doi:10.1016/j.marpol.2019.103600.
- Norton SA, Kopá ek J, dan Fernandez IJ. 2013. Acid rain - acidification and recovery. *Treatise on Geochemistry 2nd Edition*. doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00910-4
- [Perpres] Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2019 Tentang Peta Panduan (Road Map) Pengembangan Industri Rumput Laut Nasional Tahun 2018-2021. 2018.
- Rohmah S dan Sulistyorini L. 2017. Gambaran konsumsi udang berklorin terhadap keluhan kesehatan gastrointestinal pekerja sub kontrak Perusahaan X. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 9(1):57–65.
- Santika LG, Ma'ruf FD, dan Romadhon. 2014. Karakteristik agar rumput laut *glacilaria verrucosa* budi daya tambak dengan perlakuan konsentrasi alkali pada umur panen yang berbeda. *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi Hasil Perikanan* 3(3): 75-81.
- Sinurat E dan Marliani R. 2017. Karakteristik Na-Alginat dari rumput laut cokelat sargassum crassifolium dengan perbedaan alat penyaring. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*. 20(2): 351–361.
- Sudarwati W, Hardjomidjojo H, Machfud, Setyaningsih D. 2020. Literature review: potential and opportunities for the development of seaweed agro-industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 472(1). doi:10.1088/1755-1315/472/1/012063.
- Surender RK, Abraham A, Afewerki B, Tsegay B, Ghebremedhin H, Teklehaimanot B. 2018. Extraction of agar and alginate from marine seaweeds in red sea region. *Internatiol Journal Marine Biology Research*. 3(2):1–8. doi:10.15226/24754706/3/2/00126.
- Susilowati T, Nadlir A, Haditomo AHC, Windarto S, Harwanto D, Adi K. 2019. Production performance of *gracilaria verrucosa* using verticulture method with various wide planting area in Karimunjawa. *Omni-Akuatika*. 15(1):47. doi:10.20884/1.oa.2019.15.1.671.
- Tombolotutu AD, Khaldun RI, Palampanga AM, Djirimu MA, Tenge E. 2019. Trade liberalization and export competitiveness: a case study on Indonesian seaweed in the global market. *IOP C Conference Series: Earth and Environmental Science*. 270(1). doi:10.1088/1755-1315/270/1/012056.
- Vijay Anand KG, Eswaran K, dan Ghosh A. 2018. Life cycle impact assessment of a seaweed product obtained from *gracilaria edulis* – a potent plant biostimulant. *Journal Cleaner Production*. 170:1621–1627.
- Watts N, Amann M, Arnell N, Ayeb-Karlsson S, Belesova K, Boykoff M, Byass P, Cai W, Campbell-Lendrum D, Capstick S, et al. 2019. The 2019 report of the lancet countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. *Lancet*. 394:1836–1878. doi:10.1016/S0140-6736(19)32596-6.
- Wilkinson GM. 2017. Eutrophication of freshwater and coastal ecosystems. *Encyclopedia Sustainable Technologies*. (4) .doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10160-5.
- WWF-Indonesia TP. 2004. Teknik budidaya rumput laut. Edisi 1. ISBN 978-979-1461-37-5. http://awsassets.wwf.or.id/downloads/bmp_budidaya_rumput_laut_gracilaria.pdf.