

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Industri Pengolahan Ikan

Keunggulan sumber daya perikanan adalah sifatnya yang dapat diperbaharui dan memiliki potensi penggerak ekonomi yang cukup besar. Rendahnya indeks ICOR (3,4) dan tingginya indeks ILOR (7-9) merupakan cermin dari tingginya efisiensi investasi di bidang perikanan (Pusat Studi Sumber Daya dan Teknologi Kelautan UGM, 2014). Lebih lanjut, Pusat Studi Sumber Daya dan Teknologi Kelautan UGM, 2014, menyatakan Industri pengolahan hasil perikanan mempunyai fungsi penting dalam:

1. menekan kerusakan dan kehilangan;
2. meningkatkan kualitas produk;
3. penyediaan pasok pangan dan gizi;
4. penghubung atau perantara pusat produsen;
5. mendorong perkembangan industri pangan dan nonpangan untuk memanfaatkan limbah hasil industri perikanan;
6. peningkatan manfaat dan nilai tambah;
7. meningkatkan daya saing;
8. peningkatan daerah dan pangsa pasar;
9. penyediaan lapangan kerja;
10. peningkatan pendapatan (pelaku, PAD, Devisa)

Komoditas hasil perikanan bersifat *perishable* namun memiliki keunggulan komparatif dari segi kualitas protein, potensi nilai tambah yang tinggi, pangsa pasar yang luas, dan memiliki daya saing yang cukup tinggi di pasar dunia serta memiliki efek ganda yang luas termasuk dalam penyerapan tenaga kerja (Pusat Studi Sumber Daya dan Teknologi Kelautan UGM, 2014). Proses pembusukan pada produk perikanan dimulai sejak ikan dipanen. Kehilangan pasca panen ikan terjadi secara kuantitatif dan kualitatif. Kehilangan kuantitatif yang dimaksud adalah kehilangan secara fisik, sedangkan kehilangan kualitatif meliputi penurunan sifat-sifat yang penting bagi pengguna akhir (Opara, dkk, 2007).

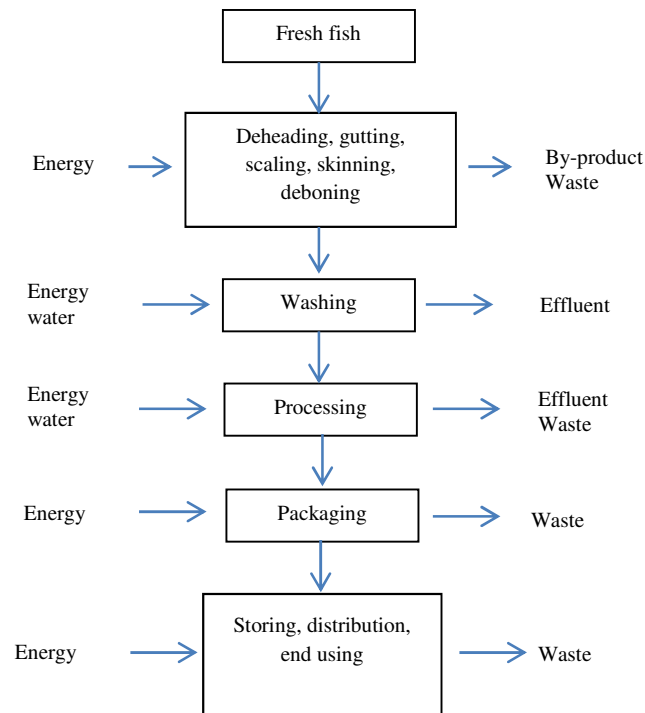
Teknik pengawetan dan pengolahan sangat diperlukan untuk mengatasi masalah produk yang mudah mengalami pembusukan dan oksidasi. Demikian pula dengan produk-produk tradisional, jika menggunakan teknologi baru memiliki peluang untuk menghasilkan produk dengan kualitas tinggi, lezat, tampilan menarik dan sehat (Sampels, 2015). Teknik pengawetan dan pengolahan meliputi perlakuan penyimpanan, teknologi rantai dingin, perlakuan kimiawi dan penggunaan biopreservasi, enzim inhibitor, teknologi pengemasan dan irradiasi (Opara dkk., 2007)

Hall dan Kose (2014) memaparkan empat masalah umum keberlanjutan pada teknologi pengolahan hasil perikanan, yaitu meliputi konsumsi energi, konsumsi air, pengendalian air limbah, pengembangan *by-product*, Alkaya dan Demirer (2016) menambahkannya dengan isu mengenai masalah aroma dan estetika.

1. Konsumsi energi yang intensif berkontribusi pada polusi udara dan perubahan iklim (Alkaya & Demirer, 2016). Energi digunakan untuk mengoperasikan mesin, memproduksi es, pemanasan, pendinginan dan pengeringan. Studi di sebuah kluster industri pengolahan udang di Vietnam menyebutkan bahwa pabrik pembekuan udang mengkonsumsi energi di hampir semua tahapan proses untuk mengoperasikan mesin, penerangan, mengatur tekanan udara dan fasilitas ruang pendingin dengan total listrik yang digunakan dalam proses pengolahan 556 kWh/ton udang (Anh, dkk., 2011). Fasilitas pembekuan ikan di Biobio, Chile, dengan menerapkan prinsip-prinsip produksi bersih, mengkonsumsi energi listrik sebesar 117 kWh/ton bahan mentah (Bezama, dkk., 2012).
2. Konsumsi air dalam jumlah besar. Air digunakan pada tahap pretreatment meliputi proses penanganan penyimpanan ikan segar, proses penyiangan dan membersihkan peralatan dan area kerja. Konsumsi air pada industri pengalengan ikan, moluska dan cephalopoda di Galicia, Spanyol, dapat mencapai 242.000 – 664.910 m³/tahun untuk industri berkapasitas 18.150 – 59.472 kg/tahun (Xunta de Galicia, 2009, dalam Bugallo dkk., 2013) atau berkisar 4,24 – 11,18 m³/ton bahan baku. Di Thailand, pabrik pengalengan

tuna (makanan hewan) mengkonsumsi air sebanyak 13,0 m³/ton bahan baku ikan, dan dengan metode konservasi air dapat mereduksi konsumsi air sebanyak 32% menjadi 8,8 m³/ton bahan baku ikan (Uttamangkabovorn, Prasertsan, & Kittikun, 2005).

3. Menghasilkan air limbah dengan beban organik yang tinggi. Penggunaan air dalam jumlah besar berimplikasi pada besarnya air limbah yang dihasilkan dengan kandungan bahan organik (lemak, protein dan padatan tersuspensi), fosfat dan nitrat yang tinggi (Alkaya & Demirer, 2016; Hall & Kose, 2014).
4. Menghasilkan *by-product* dan limbah padat seperti kepala, tulang dan sirip, isi perut dan kulit, yang mengandung asam lemak omega-3, protein berkualitas tinggi, mikronutrien dan mineral. *By-product* pengolahan ikan memiliki porsi cukup besar dan berpotensi untuk dikembangkan menjadi produk yang memiliki nilai tambah. Sebagai contoh industri filet ikan menghasilkan *by-product* sebanyak 50 – 70% dari bahan baku ikan, *by-product* pengalengan tuna 65% dari bahan baku ikan, industri *loin* tuna 50%, fillet salmon 45%, fillet tilapia 67 – 70% dan fillet pangasius 65% (FAO, 2014)
5. Masalah aroma dan estetika sebagai akibat dari pembusukan debris dan isi perut serta pembuangan limbah padat dan limbah cair yang tidak layak (Anh dkk., 2011). Bau tidak sedap tidak hanya muncul dari limbah. Sebagai contoh, proses pengolahan tepung ikan berbahan baku ikan dan perut ikan menghasilkan bau tak sedap yang berasal dari ikan yang tidak segar, besarnya volume bahan baku yang diolah dan disimpan, serta pemanasan pada proses pemasakan, pengepresan, penyaringan dan pengeringan (Torry Research Station, n.d.).



Gambar 2.1. Diagram alir pengolahan ikan secara umum

2.2. Pengolahan Air

Air memiliki peran penting dalam industri pangan baik langsung maupun tidak langsung. Secara langsung, peran air adalah sebagai salah satu bahan baku dan bahan pembantu dalam industri, sedangkan secara tidak langsung, air berperan dalam menjaga sanitasi dan higiene peralatan dan mesin, gedung dan fasilitas lainnya serta karyawan. Baik secara langsung maupun tidak langsung, peran ini berkaitan dengan penurunan mutu pangan dalam hal keamanan dari kontaminan fisik, kimia dan biologi serta penurunan mutu akibat sifat *perishable*. Oleh sebab itu air yang digunakan dalam industri pangan semestinya memenuhi standar mutu air minum.

Kontaminan utama dalam air yang menjadi fokus dalam pemurnian air adalah logam berat, turbiditas, senyawa organik dan patogen. Kontaminan-kontaminan ini menentukan teknologi yang tepat digunakan dalam pemurnian air (Cheremisinoff, 2002). Cheremisinoff (2002) memaparkan *Best Available*

Techniques (BATs) dalam pemurnian air sesuai kontaminan. Untuk pengendalian turbiditas, warna dan mikrobial pada pengolahan air permukaan dapat digunakan teknologi filtrasi. Variasi teknologi filtrasi yang dapat digunakan adalah konvensional, langsung, pasir lambat, tanah diatom, dan membran. Untuk menginaktivasi mikroorganisme digunakan teknologi disinfeksi dengan disinfektan klorin, klorin dioksida, kloramina dan ozon. Untuk menghilangkan kontaminan organik dari air permukaan digunakan *packed-tower aeration*, *granular activated carbon (GAC)*, *powdered activated carbon (PAC)*, *diffused aeration*, proses-proses oksidasi dan reverse osmosis (RO). Untuk menghilangkan kontaminan anorganik digunakan teknologi membran, pertukaran ion, alumina teraktivasi dan GAC. Teknologi membran juga digunakan menghilangkan mikrobial, nitrat, prekursor DBP, VOCs dan lainnya. Untuk mengendalikan korosi digunakan penyesuaian pH dan penghambat korosi. Teknologi pengolahan lainnya adalah oksidasi fotokemikal menggunakan ozon dan radiasi UV atau hidrogen peroksida untuk menghancurkan senyawa-senyawa organik tahan panas.

Indriatmoko & Herlambang (1999) memaparkan pohon komoditi pengolahan air. Berdasarkan kadar salinitasnya air baku dibagi menjadi dua, yaitu air asin/payau dan air tawar. Air tawar memiliki batas salinitas DHL < 1.250 mmhos, air payau DHL 1.250 – 12.000 mmhos dan air asin DHL < 12.000 mmhos. Sedangkan Cheremisinoff, 2002, mengklasifikasikan air berdasarkan salinitasnya menjadi air tawar dengan TDS < 1.000 mg/l, air payau dengan TDS 1.000 – 5.000 mg/l, air sangat payau dengan TDS 5.000 – 15.000 mg/l, air asin dengan TDS 15.000- 30.000 mg/l dan air laut dengan TDS 30.000 – 40.000 mg/l.

2.2.1. Teknologi Desalinasi

Dewasa ini telah semakin dikembangkan pemanfaatan air payau dan air laut sebagai sumber air minum, terutama di daerah-daerah pesisir. Teknologi yang digunakan untuk mengurangi salinitas kedua jenis air baku tersebut dinamakan teknologi desalinasi. Terdapat tiga metode desalinasi yang dapat digunakan, yaitu filtrasi menggunakan sistem desalinasi termal, desalinasi menggunakan membran reverse osmosis, serta penukar kation (*ion exchange*).

Desalinasi termal memanfaatkan teknik distilasi dengan memanaskan air baku untuk memproduksi uap air yang kemudian dikondensasi menjadi air dengan salinitas rendah. Teknik ini sesuai digunakan pada air dengan salinitas tinggi seperti di daerah Timur Tengah karena kebutuhan energinya tidak tergantung pada salinitas air (Voutchkov, 2013). Proses desalinasi termal antara lain *multistage flash distillation* (MSF), *multi-effect distillation* (MED), dan kompresi uap (VC). VC sendiri terdiri dari 2 tipe yaitu mekanis dan termal (MVC dan TVC). Operasi MSF, MED dan TVC memerlukan 2 bentuk energi, yaitu 1) *low temperature heat* yang menggunakan bahan bakar fosil, energi dari limbah, nuklir dan solar, 2) listrik untuk mengoperasikan pompa dan komponen-komponen listrik lainnya. Sedangkan MVC hanya memerlukan energi listrik saja (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013).

Reverse osmosis adalah alat memisahkan padatan-padatan terlarut dari molekul air dalam larutan menggunakan membran semipermeable yang terbuat dari polimer khusus. Polimer ini memungkinkan molekul air menembusnya namun mampu menahan hampir semua molekul-molekul lain (Cheremisinoff, 2002). Tenaga penggerak utama sistem ini adalah tekanan. Tekanan diperlukan untuk mengatasi tekanan osmotik larutan. Membran RO dapat menyaring padatan-padatan pertikulat dan terlarut, namun tidak dapat menyaring gas. Biasanya membran RO dapat menghilangkan lebih dari 90% senyawa berukuran 200 Da atau lebih atau lebih dari 1 Angstrom. Ini berarti membran RO dapat memisahkan padatan tersuspensi, protozoa, bakteri, virus dan patogen lainnya yang terdapat di dalam air (Voutchkov, 2013)

Ion exchange adalah reaksi kimia dapat balik dimana ion larutan saling bertukar dengan ion bermuatan sama yang melekat pada partikel padat tak bergerak misalnya zeolit anorganik atau resin organik sintetis. Penukar ion adalah material-material yang dapat menukarkan ion materi lain, menahannya sementara waktu dan kemudian melepaskannya pada larutan *regenerant*. Proses *ion exchange* diawali dengan air influen dialirkan melalui sebuah resin penukar kation hidrogen yang mengubah garam influen (misalnya sodium sulfat) menjadi asam (misalnya asam sulfat) dengan menukar ion H dalam jumlah yang ekuivalen

dengan kation-kation logam (Ca^{2+} , Mg^{3+} , Na^+). Asam-asam ini dihilangkan dengan mengalirkan effluen melalui alkali yang dihasilkan oleh resin penukar anion. Resin ini menggantikan anion-anion dalam larutan (Cl^- , SO^- dan NO^-) dengan ion-ion hidroksida dalam jumlah yang ekuivalen. Ion-ion hidrogen dan hidroksida saling menetralkan dan membentuk air murni. Selama proses ini, terjadi rekasi terbalik. Resin kation diregenerasi dengan asam sulfat atau hidroklorat dan resin anion diregenerasi dengan sodium hidroksida (Cheremisinoff, 2002).

Voutchkov (2013) membandingkan beberapa metode desalinasi berdasarkan rentang TDS air baku yang dapat diterima sistem namun tetap bernilai ekonomis serta efektifitas penghilangan kontaminannya. Metode destilasi mampu mengolah air baku dengan TDS 20.000 – 100.000 mg/l, *reverse osmosis* dengan TDS 50 – 46.000 mg/l, elektrodialisis 200 – 3000 mg/l dan *ion exchange* 1 – 800 mg/l (Voutchkov, 2013). Perbandingan efektifitas tiga metode desalinasi disajikan dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1. Perbandingan efektifitas penghilangan kontaminan 3 alternatif teknologi desalinasi

Kontaminan	Destilasi (%)	ED/EDR (%)	RO(%)
TDS	>99,9	50 – 90	90 – 99,9
Pestisida, bahan organik/VOC	50 -90	<5	5 – 50
Patogen	>99	<5	>99,99
TOC	>95	<20	95 – 98
Bahan radiologis	>99	50 – 90	90 – 99
Nitrat	>99	60 – 69	90 – 94
Kalsium	>99	45 – 50	95 – 97
Magnesium	>99	55 – 62	95 – 97
Bikarbonat	>99	45 – 47	95 – 97
Potasium	>99	55 – 58	90 – 92

Sumber: Voutchkov, 2013

Keterangan: ED/EDR: elektrodialisis/electrodialysis reversal; RO: reverse osmosis

Kebutuhan energi untuk desalinasi berbeda menurut teknologi yang digunakan. Demikian halnya juga dengan perbedaan indeks biaya yang dibutuhkan pada proses desalinasi. Tabel 2.2 menyajikan kebutuhan energi dan biaya 2 kelompok teknologi desalinasi yaitu desalinasi termal dan desalinasi membran. Voutchkov (2013) menyebutkan desalinasi termal banyak digunakan di

negara-negara timur tengah. Pertimbangan aplikasi teknologi ini adalah energi yang dibutuhkan tidak tergantung pada salinitas air baku dan cocok digunakan pada air dengan salinitas tinggi.

Tabel 2.2. Kebutuhan energi dan biaya beberapa teknologi desalinasi

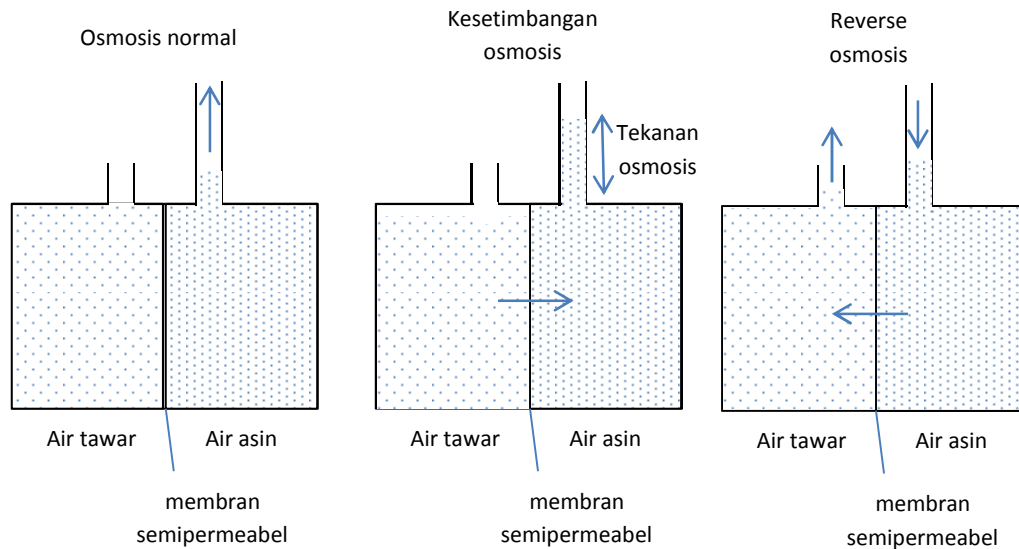
Energi/biaya	Desalinasi termal			Desalinasi membran	
	MED	MSF	VC	BWRO	SWRO
Tekanan uap,	0,2 – 0,4	2,5 – 3,5	Tidak diperlukan	Tidak diperlukan	Tidak diperlukan
Ekuivalen energi listrik, kWh/m ³	4,5 – 6,0	9,5 – 11,0	NA	NA	NA
Konsumsi listrik, kWh/m ³	1,2 – 1,8	3,2 – 4,0	8,0 – 12,0	0,3 – 2,8	2,5 – 4,0
Total energi yang digunakan, kWh/m ³	5,7 -7,8	12,7 – 15,1	8,0 – 12,0	0,3 – 2,8	2,5 – 4,0
Biaya produksi air, US\$/m ³	0,7 – 3,5	0,9 – 4,0	1,4 – 3,5	0,2 – 1,8	0,5 – 3,0

Sumber : Voutchkov, 2013

Berdasarkan rentang toleransi TDS, informasi pada tabel 2.1 dan 2.2, teknologi RO dinilai lebih efektif untuk desalinasi air payau dibandingkan destilasi dan penukar kation. Said (2017) menjelaskan bahwa teknologi RO bekerja berdasarkan prinsip osmosis. Dimana pada dua larutan yang berbeda konsentrasi dipisahkan oleh membran semipermeabel, air akan mengalir dari larutan konsentrasi rendah ke larutan konsentrasi tinggi hingga tercapai kesetimbangan akibat adanya tekanan osmotik dari larutan yang lebih pekat. Jika larutan konsentrasi tinggi diberi tekanan yang lebih besar dari tekanan osmotiknya, maka air akan mengalir dari larutan yang lebih pekat ke larutan yang lebih encer. Proses ini disebut reverse osmosis. Prinsip ini yang digunakan untuk mengekstrak air tawar dari air payau atau air laut.

Pada umumnya, proses desalinasi dengan metode reverse osmosis terbagi menjadi 2 bagian, yaitu unit pengolahan pendahuluan dan unit RO. Unit pendahuluan berfungsi menghilangkan padatan-padatan tersuspensi, mineral, warna dan lain-lain sebelum air dialirkan ke unit RO. Unit RO terdiri dari pompa

bertekanan tinggi, membran RO, pompa dosing anti scalant dan anti biofouling, serta sterilisator (Said, 2008).



Gambar 2.2. Prinsip-prinsip reverse osmosis

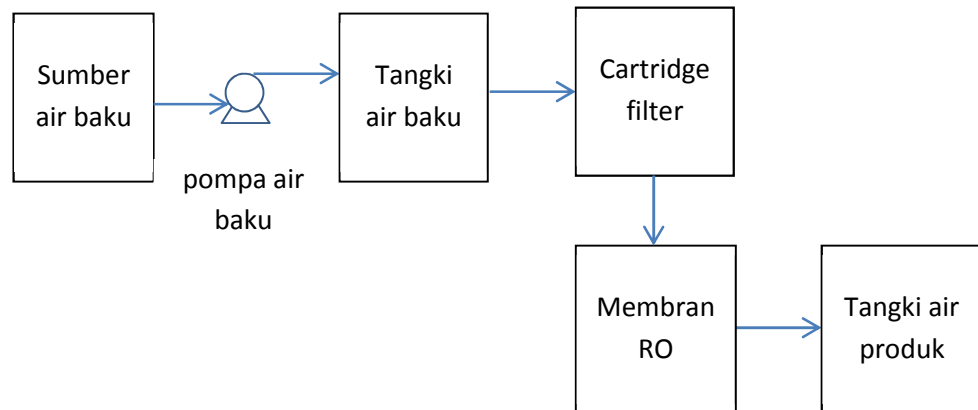
Sumber: Cheremisinoff, 2002

2.2.2. Pengolahan Pendahuluan

Sebelum memasuki pengolahan pendahuluan, tahapan pertama dari sistem RO adalah penyaringan air baku. Tahap penyaringan dapat terdiri dari dua bagian yaitu *cartridge filtration* sederhana atau rangkaian penyaringan mekanis yang didesain untuk menghilangkan serpihan-serpihan besar, organisme laut, dan *microscreen* yang didesain untuk menyaring endapan, plankton, pasir, partikel-partikel cangkang dan debris padat lainnya dalam air baku. Tujuan utama dari penyaringan adalah untuk melindungi peralatan dan struktur fasilitas pengolahan pendahuluan dan RO dari kerusakan, memperlambat penyumbatan dan pembentukan kerak dan meningkatkan volume air produk. Sistem penyaringan pada intake air baku yang umum digunakan adalah satu rangkaian rak bar yang dibersihkan secara manual atau mekanis, kemudian diikuti kotak saringan halus (*bar screens*) yang bergerak otomatis atau pita jala halus (*fine mesh band*) berjalan atau penyaring berbentuk drum (*drum screen*) (Voutchkov, 2013)

Pengolahan pendahuluan bertujuan untuk memproduksi air yang disyaratkan untuk sistem RO yaitu TSS < 1mg/l, turbiditas < 0,3 NTU dan indeks densitas lumpur < 4. Pengolahan pendahuluan juga bertujuan untuk mengurangi pembentukan kerak pada membran oleh mineral serta kontaminan organik dan mikrobial. Pembentukan kerak mineral (kalsium, magnesium dan silika) dapat diminimalisir menggunakan antiscalant, sedangkan pembusukan bahan organik dan partikel atau koloid pada membran diatasi mengaplikasikan koagulan dan flocculant untuk memperbesar ukuran partikel agar bisa dihilangkan dengan metode sedimentasi, pengapungan, filtrasi media granular, membran filtrasi UF atau MF atau kombinasi proses-proses ini (Voutchkov, 2013).

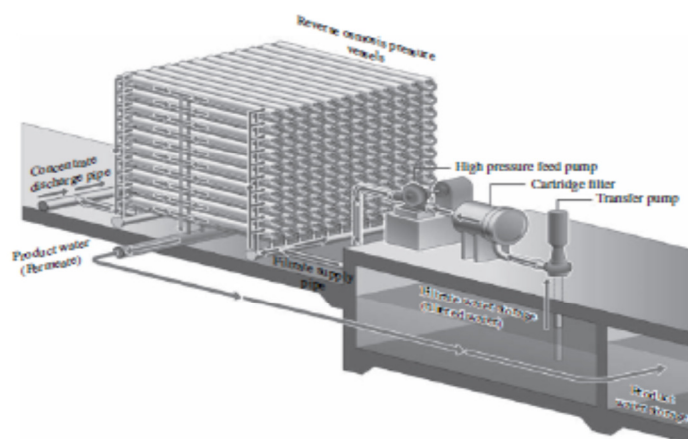
Said (2003, 2008) merancang pengolahan pendahuluan terdiri dari pompa air baku, bak koagulasi-flokulasi, tangki reaktor (kontaktor), saringan pasir, filter mangan zeolit, dan filter untuk penghilangan warna (color removal), dan filter cartridge ukuran 0,5 μm . Air baku dipompa ke bak koagulasi-flokulasi untuk mengendapkan zat padat tersuspensi. Kemudian air dialirkan ke rapid sand filter, dan ditampung dalam bak penampung. Selanjutnya air dipompa ke pressure filter sambil diinjeksi dengan larutan kalium permanganat untuk mengoksidasi besi atau mangan dalam air baku sehingga tidak larut dalam air. Diinjeksikan pula larutan anti scalant dan anti biofouling yang berfungsi mencegah pengkerakan serta membunuh mikroorganisme penyebab biofouling pada membrane RO. Kemudian air dialirkan ke saringan filter multi media untuk menyaring agar senyawa besi atau mangan oksida serta padatan tersuspensi (SS). Dengan filter multi media ini, zat besi atau mangan yang belum teroksidasi dapat dihilangkan sampai konsentarsi <0,1 mg/l. Dari filter multi media, air dialirkan ke filter penghilangan warnayang berfungsi untuk menghilangkan warna dalam air baku. Kemudian air dialirkan ke filter cartridge untuk menyaring partikel berukuran 0,5 μm . selanjutnya air dialirkan ke unit RO menggunakan pompa bertekanan tinggi dan diinjeksi dengan zat antiscalant dan anti biofouling.



Gambar 2.3. Skema proses reverse osmosis

2.2.3. Sistem Reverse Osmosis (RO)

Perancangan instalasi pengolah air menggunakan teknologi membran dimulai dengan pemilihan membran dengan mempertimbangkan kualitas permeat, umur dan ketahanan terhadap pembusukan (*fouling*), dan biaya kompetitif. Kebanyakan membran RO dibuat dari bahan polimer organik dan asimetris. Bahan polimer yang digunakan bersifat hidrofilik dan hidrofobik, diantaranya polimer selulose, polipropilen, polisulfon dan poliamida, pemilihan material akan mempengaruhi karakteristik rejeksi, umur dan potensi penyumbatan (*fouling*) (Cheremisinoff, 2002).



Gambar 2.4. Konfigurasi sistem RO secara umum
Sumber: Voutchkov, 2013

Membran RO diklasifikasikan berdasarkan material serta struktur dan konfigurasi. Berdasarkan strukturnya, membran dibedakan menjadi komposit film-tipis konvensional dan nanokomposit film-tipis. Membran konvensional dibedakan menjadi polyamide dan selulose asetat. Berdasarkan konfigurasi membran dalam elemen membran (modul), membran RO dibagi menjadi 3 kelompok utama, yaitu: *spiral-wound*, *hollow-fiber*, dan *flat-sheet* (plat dan bingkai). Elemen membran RO memiliki standar diameter dan panjang dan secara khusus dipasang pada wadah bertekanan yang dapat memuat 6 sampai 8 elemen per wadah. Elemen-elemen RO dan wadah bertekanan dibedakan menjadi 2 tipe yaitu tipe air payau dan tipe air laut (Voutchkov, 2013; El-ghaffar & Tieama, 2017).

Tabel 2.3. Perbandingan antara polyamide dan selulose asetat

Parameter	Membran polyamide	Membran selulose asetat
Rejeksi garam	Tinggi (> 99,5 %)	Lebih rendah (≤ 95 %)
Tekanan umpan	Lebih rendah (30 – 50 %)	Tinggi
Muatan permukaan	Negatif	Netral
Toleransi klorin	Rendah (≤ 1000 mg/l.jam)	Baik; dapat menerima 1 – 2 mg/l klorin secara terus-menerus
Suhu maksimal air sumber	Tinggi (40-45° C)	Relatif (30 – 35°C)
Frekuensi pembersihan	Tinggi (mingguan sampai bulanan)	Lebih rendah (bulanan sampai tahunan)
Kebutuhan perlakuan pendahuluan	Tinggi (SDI < 4)	Lebih rendah (SDI < 5)
Penghilangan garam, silika dan bahan organik	Tinggi	Relatif rendah
Pertumbuhan biologis pada permukaan membran	Dapat mengakibatkan masalah kinerja	Terbatas, tidak menyebabkan masalah pada kinerja
Toleransi pH	Tinggi (2 - 12)	Relatif rendah (4 – 6)

Sumber : Voutchkov, 2013

Terdapat 2 tipe membran RO yaitu membran *brackish water reverse osmosis* (BWRO) dan membran *seawater reverse osmosis* (SWRO). Parameter kunci kinerja kedua membran ini disajikan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4. Parameter kinerja kunci membran BWRO dan SWRO

Parameter kinerja	Tipe kinerja membran	
	BWRO	SWRO
Rentang salinitas air baku, mg/liter	800 – 10.000	15.000 – 47.000
Tekanan umpan, bars (lb/in ²)	10 – 15 (150 – 220)	55 – 70 (800 – 1000)
Kecepatan flux rata-rata, lmh (gfd)	20 – 40 (12-24)	14 – 16 (8 – 9,4)
Kecepatan flux spesifik, lmh/bar (gfd/lb/in ²)	2 – 4 (0,08 – 0,16)	1 -1,5 (0,04 – 0,06)
Rejeksi garam, %	99 – 99,7	99,5 -99,8
Kecepatan aliran air produk rata-rata per elemen, m ³ /hari (gpd)	20 – 25 (5000 – 6600)	12 – 15 (3200 – 4000)

Sumber : (Voutchkov, 2013)

Pressure vessel. Elemen-elemen membran RO dirangkai dalam sebuah wadah tahan tekanan (*pressure vessel/PV*). Jumlah membran dalam 1 PV sekitar 6 sampai 8 membran. Makin banyak membran dalam 1 PV makin tinggi tekanan diferensial dalam PV. Membran yang paling dekat dengan *vessel* akan mendapat tekanan maksimum. Tekanan maksimum yang umumnya direkomendasikan oleh produsen adalah 4 bar (58 lb/in²). *Pressure vessel* BWRO dirancang mampu menahan tekanan 10,5 sampai 42 bar (150 sampai 6000 lb/in²), sedangkan tabung SWRO beroperasi dengan tekanan 42 sampai 105 bar (600 sampai 1500 lb/in²). Aliran air umpan minimal yang direkomendasikan per membran dalam tabung adalah 10 m³/jam dan maksimal 17 m³/jam, sedangkan aliran konsentrat minimal yang direkomendasikan per tabung adalah 2,7 m³/jam (Voutchkov, 2013). Usaha-usaha untuk mengurangi konsumsi daya dan biaya sistem menghasilkan transisi desain fasilitas RO menjadi konfigurasi *single-stage* dan meningkatkan jumlah elemen per PV. Mayoritas desain sistem RO akhir-akhir ini adalah rak-rak RO 7 elemen dengan rasio *recovery* 40-45%. Beberapa sistem kapasitas besar didesain dan dioperasikan dengan 8 elemen per PV sehingga *recovery* sistem meningkat menjadi 50% (Peñate & García-rodríguez, 2012).

Komponen sistem RO terdiri dari pompa transfer air produk pretreatment, pompa bertekanan tinggi, membran RO, tabung-tabung tekanan, perpipaan interkoneksi, roda—roda RO, sistem *energy-recovery*, sistem pembersihan

membran, perlengkapan dan pengendali. Air produk dari tahap pretreatment dipompa dari sebuah penampungan air melalui filter cartridge menuju pompa air baku RO yang bertekanan tinggi. Kemudian air dipompa masuk ke tabung-tabung RO yang memuat elemen-elemen membran dimana proses desalinasi terjadi (Voutchkov, 2013). Dalam sistem desalinasi RO, energi adalah pertimbangan utama. Konsumsi energi oleh sistem meliputi energi untuk pompa air baku, pompa tekanan tinggi, pompa booster dan pompa bahan kimia. Pada sistem RO 2 tahap, pompa booster dapat membantu menurunkan konsumsi energidan meningkatkan *recovery* air (Peñate & García-rodríguez, 2012).

Pompa transfer air produk *pretreatment*. Pompa ini digunakan pada sistem desalinasi *interim pumping* untuk menaikkan tekanan penghisapan agar operasi pompa RO bertekanan tinggi menjadi efisien. Pada sistem desalinasi *direct flow-trough*, pompa ini tidak diperlukan, karena pompa air baku dirancang untuk memberikan tekanan penghisapan sesuai yang diperlukan pompa RO bertekanan tinggi. Pada sistem ini, sistem pretreatment dirancang dapat mempertahankan tekanan yang diperlukan pompa RO bertekanan tinggi, yaitu dengan menggunakan filter media granular atau filter-filter membran yang dioperasikan dengan tekanan. Untuk sistem desalinasi SWRO tekanan penghisapan yang diperlukan adalah 2 sampai 6 bar (29 sampai 87 lb/in²), sedangkan untuk BWRO dibawah 1 bar (14,5 lb/in²). Pompa ini sering kali dilengkapi dengan VFDs (*variable frequency drives*) yang dapat mengontrol (menyesuaikan) tekanan air yang masuk ke sistem RO. Alat ini diperlukan untuk mengantisipasi perubahan salinitas dan temperatur air pada sumber air yang bersifat musiman bahkan harian karena kondisi ini dapat mempengaruhi tekanan osmosis dan *net driving pressure* (NDP) yang diperlukan dalam proses desalinasi (Voutchkov, 2013).

Pompa bertekanan tinggi. Pompa ini dirancang untuk memompa air ke membran RO dengan tekanan yang dibutuhkan untuk memisahkan garam dari air. Untuk desalinasi BWRO, tekanan yang dibutuhkan adalah 5 sampai 25 bar (73 sampai 363 lb/in²) dan untuk SWRO 55 sampai 70 bar (798 sampai 1015 lb/in²).

Tekanan air baku bersifat spesifik sesuai kualitas air dan proyek, terutama ditentukan oleh salinitas air, target kualitas air produk, dan konfigurasi sistem RO. Ukuran pompa didasarkan pada kebutuhan tekanan aliran dan pengoperasian menggunakan kurva kinerja standar dari produsen pompa. VFDs terkadang dipasang pada motor pompa untuk menyesuaikan kecepatan motor dengan perubahan tekanan air umpan yang dibutuhkan berkenaan dengan fluktuasi alami salinitas dan suhu air umpan (Voutchkov, 2013).

Disamping sistem RO yang merupakan tahapan utama desalinasi, sistem ini umumnya didukung oleh *pretreatment*, *post-treatment*, bahan kimia RO dan pengelolaan *brine*.

Pretreatment

Pretreatment diperlukan dalam instalasi desalinasi sistem RO berkaitan dengan sensitifitas membran RO terhadap *fouling*. Karakterisasi potensi *fouling* air umpan biasanya diekspresikan dengan SDI. Suplier-suplier membran merekomendasikan nilai SDI_{15} air umpan RO < 3 untuk mencegah peningkatan *pressure loss* pada modul-modul dan meminimalkan penyumbatan (*fouling*). Pemilihan metode pretreatment bergantung pada sumber dan komposisi air umpan. Metode pretreatment terdiri dari 2 kelompok yaitu *pretreatment* fisikawi dan *pretreatment* kimiawi. Pretreatment fisikawi dapat berupa penyaringan, filter cartridge, saringan pasir dan filtrasi membran (Fritzmann, dkk., 2007). Saat ini metode *pretreatment* menggunakan membran menjadi semakin menarik secara ekonomi dan kehandalan. Sebuah sistem *pretreatment* ultrafiltrasi pada instalasi RO terdiri dari tahapan pemisahan partikel besar menggunakan saringan kasar, koagulasi *in-line* dosis rendah, pemisahan partikel, bakteri dan partikulat *biofoulant* lainnya menggunakan unit filtrasi, sistem backwash (Tariq Al-Sarkal, 2013)

Post-treatment

Permeate RO memiliki TDS yang rendah sehingga dapat berasa tidak enak, korosif dan tidak sehat, tidak memenuhi standar air minum maupun standar air irigasi. Untuk itu permeate RO perlu diberikan *post-treatment* agar bisa

memenuhi standar air minum maupun standar irigasi (Fritzmman, dkk., 2007). Permeat yang dihasilkan oleh sistem RO distabilisasi dengan menambahkan kapur atau kontak dengan kalsit serta menambahkan CO₂ untuk mendapat alkalinitas dan kesadahan yang tepat untuk melindungi sistem distribusi air dari korosi. Air yang sudah diproses kemudian disimpan dan didisinfeksi sebelum disalurkan ke pengguna akhir (Voutchkov, 2013, Fritzmman, dkk., 2007).

Bahan kimia RO

Bahan kimia digunakan pada tahap *pretreatment*, *reverse osmosis* dan *post-treatment*. Pada tahap *pretreatment* menggunakan ultrafiltrasi, bahan kimia yang diperlukan adalah koagulan, bahan kimia untuk *chemical enhanced backwash* (CEB) dan *Clean in Place* (CIP). Pada tahap *reverse osmosis* bahan kimia yang diperlukan adalah *anti scalant* dan *anti foulant* tergantung pada kualitas air umpan. Sedangkan pada *posttreatment*, bahan kimia yang diperlukan adalah bahan kimia remineralisasi dan *desinfektan* (Voutchkov, 2013; Fritzmman dkk., 2007).

2.2.3 Dampak Lingkungan Instalasi Pengolah Air Minum Sistem Reverse Osmosis

Dari uraian sebelumnya, diketahui bahwa pengolahan air sistem RO memerlukan input berupa sumber daya air, bahan kimia dan energi serta menghasilkan output berupa air produk, lumpur dan *brine* (konsentrat air asin), dan emisi-emisi tidak langsung dari penggunaan energi. Input dan output tersebut memiliki potensi menimbulkan dampak lingkungan. Berkaitan dengan dampak lingkungan ini, Voutchkov (2013) memaparkan 3 kunci dampak lingkungan instalasi desalinasi air, yaitu: pengambilan air baku, dampak konsentrat terhadap lingkungan akuatik, dan jejak karbon operasional instalasi. Beberapa analisis dampak lingkungan instalasi pengolahan air sistem RO menggunakan LCA

menyimpulkan dampak lingkungan terbesar timbul dari besarnya konsumsi energi, diantaranya studi-studi yang telah dilakukan oleh Bhakar, dkk. (2016); Goga (2016); Zhou, Chang, & Fane (2011); dan Zijp & Van der Laan (2015).

Goga (2016) dalam penelitiannya membandingkan 2 model sistem RO yang digunakan pada instalasi desalinasi di kota eThekweni dan instalasi reklamasi air tambang di Mpumalanga. Studi tersebut menemukan bahwa dampak lingkungan ditimbulkan paling tinggi pada tahap utama sebagai konsekuensi dari konsumsi energi diikuti oleh penggunaan bahan-bahan kimia. Dampak ini adalah akibat dari ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber energi. Demikian pula halnya dengan studi yang dilakukan Bhakar dkk. (2016). Bhakar dkk. (2016) dalam studinya menyimpulkan bahwa energi yang dikonsumsi pada tahap purifikasi paling berkontribusi pada kategori dampak potensi perubahan iklim, diikuti dengan konsumsi energi pada ekstraksi air dan redistribusi. Material filtrasi dan pengolahan limbah hanya berkontribusi 7,36% dan 7,1 %. Pada semua kategori dampak, konsumsi energi pada tahap ekstraksi, purifikasi dan redistribusi air produk berdampak lebih signifikan dibanding material dan proses lainnya. Selain itu, juga ditemukan bahwa rejeksi air juga meningkatkan potensi depleksi air. Zhou dkk. (2011) dalam penelitiannya juga menyimpulkan bahwa kebanyakan dampak lingkungan instalasi RO, baik menggunakan air payau maupun air laut, berkaitan dengan konsumsi energi. Zijp & Van der Laan (2015) menyatakan bahwa dampak instalasi RO banyak disebabkan oleh konsumsi energi dan emisinya. Penambahan peralatan UV pada instalasi tidak akan memberikan dampak yang signifikan.

Penilaian dampak lingkungan atas pengolahan air sistem BWRO pada fasilitas Oasen di Kamerik menggunakan metodologi LCIA ReCiPe memperlihatkan bahwa sistem BWRO memiliki kategori potensi dampak *cumulatif energy demand*, perubahan iklim, asidifikasi, toksisitas terhadap manusia, ekotoksitas air tawar, dan eutrofikasi. Potensi dampak tersebut dipicu oleh penggunaan energi, emisi CH₄ dan CO₂ dari oksigenisasi dan degasifikasi, serta emisi dari produksi dan penggunaan bahan-bahan kimia (Zijp & Van der Laan, 2015). Demikian juga penilaian potensi dampak di Kompleks Industri Secunda, Afrika Selatan, yang menggunakan metode LCIA CML baseline 2004. Hasil analisis menyatakan bahwa potensi dampak lingkungan sistem BWRO adalah pada Global Warming Potential (GWP), asidifikasi, toksisitas terhadap manusia, abiotic depletion, eutrofikasi dan ekotoksitas perairan tawar. Dampak terbesar dipicu oleh pembangkit energi, terutama pada GWP, asidifikasi dan eutrofikasi (Ras & von Blottnitz, 2012).

2.3. Pengolahan Air Limbah

Masalah yang sering dihadapi oleh UKM pengolah hasil ikan adalah ketiadaan pengelolaan limbah cair. Limbah cair sering kali dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan.

Karakteristik air limbah pengolahan beberapa spesies ditampilkan pada tabel 2.5.

Tabel 2.5. Karakteristik air limbah pengolahan ikan

Parameter	Unit	Tuna	Catfish	Salmon (hand)	Sardine
Waste water	m ³ /ton	25	24	4	8,7
BOD ₅	kg/ton	13,4	7,3	2,1	9,2
Total N	kg/ton	2,1	0,65		
Oil, fat & grease	kg/ton	7,4	4,7	1,5	1,7
Total suspended solid	kg/ton	10,4	9,4	1,2	5,4

Sumber: Duangpaseuth, SDas, Chotchamlong, Ariunbaatar, Khunchornyakong, & Prashanthini, n.d.

Limbah cair dari proses pengolahan ikan yang kaya akan bahan organik, garam, minyak dan lemak, serta sangat bervariasi bergantung pada proses pengolahan dan pretreatment bahan baku ikan (Sunny & Mathai P, 2013). Kontaminan ini baik dalam bentuk terlarut, koloid maupun partikel, dapat mengandung BOD, FOG dan nitrogen dalam jumlah yang sangat tinggi (Tay, Show, & Hung, 2004).

Fakta ini menjadi penghambat dalam pengolahan limbah yang seringkali memerlukan pretreatment sebelum masuk ke sistem pengolah limbah. Dengan mempertimbangkan tingginya bahan organik, metode yang efektif untuk pengolahan limbah industri perikanan adalah pengolahan secara biologis, namun harus dikerjakan pada kondisi optimum (Sunny & Mathai P, 2013).

Untuk hasil pengolahan limbah yang optimal, direkomendasikan pengolahan primer sebelum pengolahan secara biologis atau aplikasi lahan. Penghilangan padatan sesegera mungkin dari air limbah menjadi pertimbangan utama dalam perancangan sebuah sistem pengolahan limbah. Proses penghilangan padatan tak larut (tersuspensi) dapat dilakukan secara kimia maupun fisika. Untuk air limbah pengolahan ikan, pengolahan primer dapat berupa penyaringan, sedimentasi, ekualisasi aliran dan pengapungan. Umumnya unit operasi ini akan menghilangkan lebih dari 85% TSS serta 65% BOD₅ dan COD dalam air limbah (Tay dkk., 2004).

Proses selanjutnya setelah pengolahan primer adalah pengolahan biologis. Pengolahan biologis melibatkan sejumlah mikroorganisme untuk menghilangkan

nutrien-nutrien terlarut dalam air limbah baik secara aerobik, anaerobik maupun fakultatif aerobik. Sistem pengolahan biologis dapat mengubah 1/3 bahan organik koloidal dan terlarut menjadi produk akhir yang stabil serta mengubah 2/3 sisanya menjadi sel mikrobial yang dapat dipisahkan menggunakan prinsip grafitasi. Mikrobial mengubah sebagian bahan organik menjadi biomassa dan hampir semua sisanya dilepaskan sebagai gas. Pengolahan secara aerobik menghasilkan karbondioksida (CO_2), sedangkan secara anaerobik menghasilkan karbondioksida (CO_2) dan metana (CH_4). Dalam air limbah pengolahan ikan, porsi bahan yang tidak dapat didegradasi secara biologis sangat kecil (Tay dkk., 2004).

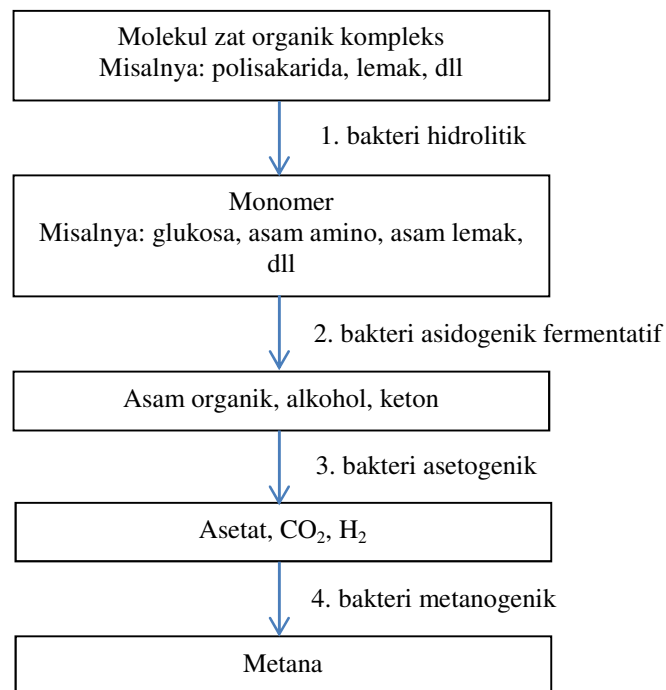
Sistem pengolahan secara biologis paling efektif bila beroperasi 24 jam/hari dan 365 hari/tahun secara terus menerus. Sistem yang tidak beroperasi secara kontinu akan menurunkan efisiensi karena perubahan ketersediaan beban nutrisi menjadi biomassa mikrobial (Tay et al., 2004).

2.3.1. Metode biofilter anaerob-aerob

Metode biofilter anaerob-aerob dipercaya memiliki efisiensi penguraian limbah yang tinggi, bahkan ada yang mencapai 95%. Integrasi kedua metode ini selain memberikan hasil yang lebih baik juga dapat mengurangi konsumsi energi serta mengurangi produksi lumpur (Sunny & Mathai P, 2013 dan Said, 2017).

Pengolahan air limbah dengan proses biofilter anaerob-aerob merupakan gabungan proses anaerob dan proses aerob. Pada tahap anaerob polutan organik dalam air limbah diuraikan menjadi gas CO_2 tanpa menggunakan energi, tetapi amoniak dan H_2S tidak hilang. Selanjutnya sisa bahan organik yang belum terurai, diuraikan pada tahap aerob, dimana bahan organik diuraikan menjadi CO_2 dan air, amoniak menjadi nitrit dan selanjutnya nitrat, dan H_2S menjadi sulfat (Said, 2017).

Proses penguraian pada tahap anaerob melibatkan 4 kelompok bakteri, yaitu bakteri hidrolitik, bakteri asidogenik fermentatif, bakteri asetogenik dan bakteri metanogenik. Keempat bakteri ini bekerja mengubah bahan organik menjadi CH_4 dan CO_2 , serta sedikit NH_3 , H_2 dan H_2S (Said, 2017).

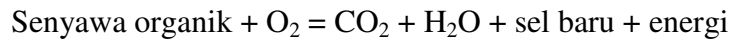


Gambar 2.5. Kelompok bakteri metabolik yang terlibat dalam penguraian limbah dalam sistem anaerobik (Said, 2017)

Secara lebih rinci, proses anaerobic digestion dapat digambarkan sebagai berikut (Lier, Mahmoud, & Zeeman, 2008):

1. Hydrolysis, pada tahap ini enzim yang diekskresi bakteri mengubah material polimer menjadi lebih sederhana dan dapat larut yang dapat melalui dinding dan membran sel bakteri fermentatif. Senyawa-senyawa protein, polisakarida dan lemak diubah menjadi asam amino, gula, asam lemak dan alkohol.
2. Acidogenesis, senyawa-senyawa yang telah masuk ke dalam sel fermentatif diubah menjadi senyawa-senyawa sederhana seperti volatile fatty acids, alcohols, lactic acid, CO₂, H₂, NH₃, dan H₂S yang kemudian diekskresikan serta material sel baru.
3. Acetogenesis, senyawa-senyawa sederhana tadi diubah lagi menjadi asetat, hidrogen (H₂) dan CO₂.
4. Methanogenesis, pada tahap ini asetat, hidrogen serta karbonat, formate dan methanol diubah menjadi metana, CO₂, dan material sel baru.

Pada tahap aerob berlangsung proses metabolisme bakteri yang menguraikan bahan-bahan organik menjadi bentuk yang sederhana yaitu CO₂, H₂O, senyawa-senyawa oksida seperti nitrat, sulfat, fosfat dan terbentuknya massa sel yang baru. Secara umum, reaksinya adalah (Said, 2017):



2.3.2. Produksi Dinitrogen Oksida (N₂O)

Proses utama yang digunakan dalam pengolahan air limbah untuk mengurangi nitrogen adalah nitrifikasi dan denitrifikasi yang melibatkan bakteri autotrofik. Selama nitrifikasi, amonia diubah menjadi nitrit oleh bakteri nitrosomonas, kemudian nitrit diubah menjadi nitrat oleh bakteri nitrobakter. Dalam proses ini N₂O dapat dihasilkan sekalipun bukan merupakan produk antara. Proses nitrifikasi memerlukan oksigen yang cukup besar yaitu 3,43 g O₂ untuk mengoksidasi nitrogen menjadi nitrit, dan 1,14 g O₂ untuk mengoksidasi nitrogen menjadi nitrat (Snip, 2010 dan Said, 2017).

Denitrifikasi terjadi pada kondisi anoxic, dimana bakteri heterotrofik menggunakan nitrat, nitrit, nitric oxide dan nitrogen oksida sebagai aseptor elektron. Dalam proses ini N₂O menjadi bahan intermediat. Sehingga N₂O dapat diproduksi dan dilepaskan oleh proses denitrifikasi yang tidak sempurna (Snip, 2010 dan Said, 2017).



2.3.3. Dampak lingkungan instalasi pengolahan limbah

Kontributor utama terhadap semua kategori dampak adalah emisi yang berkaitan dengan produksi listrik yang dikonsumsi WWTPs, emisi ke air dari limbah yang telah diolah, dan logam berat dalam lumpur yang dihasilkan (Kalbar, Karmakar, & Asolekar, 2013; Zang, Li, Wang, Zhang, & Xiong, 2015).

Kalbar, Karmakar, & Asolekar, 2013, membandingkan 4 instalasi pengolahan air limbah perkotaan berdasarkan teknologi yang berbeda menggunakan LCA dengan metodologi CML 2 baseline 2000. Teknologi

pengolahan limbah yang dibandingkan adalah *activated sludge process* (ASP), *sequency batch reactor* (SBRs), *up-flow anaerobic sludge blanket reactor – facultatif aerobic lagoon* (UASB-FAL), dan *constructed wetlands* (CWs). Keempat teknologi tersebut merupakan teknologi pengolahan limbah secara biologis. Kalbar, Karmakar, & Asolekar, 2013, dengan studinya menyimpulkan bahwa SBRs mengkonsumsi energi paling tinggi dan paling berkontribusi pada kategori dampak pemanasan global (GWP), namun SBRs menghasilkan kualitas *effluent* paling baik dalam hal kadar bahan organik dan nutrien. Konsumsi energi CWs dalam studi ini relatif kecil sehingga dapat diabaikan. CWs berkontribusi negatif terhadap GWP karena adanya penyerapan karbon oleh makrofita (Kalbar dkk., 2013).

Pintilie, dkk. (2016) menyatakan bahwa dampak lingkungan terbesar sebuah WWTP adalah pada tahap pengolahan secara biologis (sekunder) dengan kontribusi antara 20 % – 90 %. Dampak lingkungan pada tahap ini terutama disebabkan oleh konsumsi energi yang tinggi pada reaktor aerobik dan oleh penggunaan bahan-bahan kimia. Penelitian lain yang dilakukan oleh Polruang, Sirivithayapakorn, & Prateep (2017) di Thailand juga menyimpulkan hal yang sama, bahwa penggunaan listrik dan juga sumber listrik sebuah WWTP dengan teknologi lumpur aktif menjadi kontributor dominan terhadap hampir semua kategori dampak lingkungan, kecuali kategori dampak penipisan sumber daya abiotik dan eutrofikasi. Pada WWTP ini, kontributor utama eutrofikasi adalah *effluent*.

Berkaitan dengan lokasi WWTP, Opher & Friedler (2016) telah membandingkan dampak lingkungan dari centralisasi WWTP dan desentralisasi WWTP pada perkotaan di Israel berkenaan dengan penggunaan kembali *grey water*. Desentralisasi WWTP untuk keperluan penggunaan kembali air hasil pengolahan menghasilkan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan sentralisasi WWTP. Namun desentralisasi pada tingkat komunitas lebih baik dari segi dampak lingkungan dibanding di tingkat gedung. Dampak lingkungan yang lebih rendah ini berasosiasi dengan konsumsi material dan energi pada sistem pendistribusian kembali air hasil pengolahan. Sama seperti peneliti lainnya, Opher

& Friedler, 2016, juga menyimpulkan bahwa listrik menjadi kontributor utama terhadap hampir semua kategori dampak.

2.4. *Life Cycle Assesment (LCA)*

Life Cycle Assesment (LCA) adalah alat yang digunakan untuk menilai konsekuensi lingkungan sebuah produk sepanjang daur hidupnya dan konsekuensi yang mungkin timbul dari produk dan proses produksinya (Ulhasanah dan Goto, 2012). ISO 14040 menyatakan bahwa LCA adalah suatu teknik menilai aspek lingkungan dan dampak-dampak potensial sehubungan dengan produk, dengan cara:

- Menyusun inventori input dan output yang relevan mengenai sebuah sistem produk
- Mengevaluasi dampak-dampak lingkungan yang berhubungan dengan input dan output tersebut
- Menginterpretasikan hasil analisis inventori dan fase asesmen dampak sesuai dengan tujuan studi

Beberapa hal mengenai LCA disebutkan dalam ISO 14040 sebagai berikut:

1. LCA dapat membantu dalam:

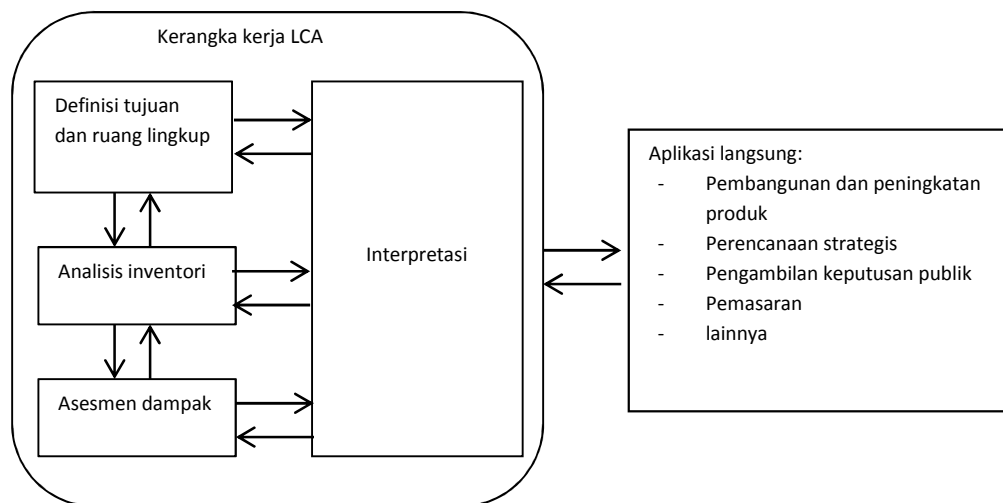
- Mengidentifikasi kesempatan untuk meningkatkan aspek lingkungan produk pada berbagai titik dalam daur hidupnya;
- Pembuatan keputusan dalam industri, organisasi pemerintah dan non pemerintah
- Memilih indikator-indikator kinerja lingkungan yang relevan, meliputi teknik-teknik pengukuran
- Pemasaran

2. LCA memiliki keterbatasan sebagai berikut:

- Sifat pilihan-pilihan dan asumsi-asumsi dalam LCA (misalnya pengaturan batasan sistem, seleksi sumber data dan kategori dampak) dapat subyektif,

- Model yang digunakan untuk analisis inventori atau untuk menilai dampak lingkungan dibatasi oleh asumsi peneliti, dan mungkin tidak dapat digunakan untuk seluruh dampak atau aplikasi potensial,
- Hasil studi LCA yang difokuskan pada isu-isu global dan regional mungkin tidak sesuai untuk aplikasi lokal, dengan kata lain kondisi lokal mungkin tidak terwakili secara layak oleh kondisi global atau regional,
- Akurasi studi LCA dapat dibatasi oleh aksesibilitas atau ketersediaan data yang relevan, atau oleh kualitas data, misalnya kesenjangan, tipe data, agregasi, rerata, spesifikasi tempat,
- Kekurangan dimensi-dimensi spasial dan temporal dalam data inventori yang digunakan untuk asesmen dampak memunculkan ketidakpastian masing-masing kategori dampak.

.ISO 14044: 2006 menguraikan kerangka kerja LCA sebagai berikut:



Gambar 2.7. Kerangka Kerja LCA (ISO 14044: 2006)

1. Mendefinisikan tujuan dan ruang lingkup LCA

Dalam mendefinisikan ruang lingkup LCA, item-item berikut harus dipertimbangkan dan digambarkan dengan jelas, yaitu: Sistem produk yang akan dipelajari, fungsi-fungsi sistem produk atau sistem-sistem dalam kasus studi perbandingan, unit fungsional, batasan sistem, prosedur alokasi, metodologi LCIA dan tipe-tipe dampak, interpretasi yang digunakan,

persyaratan data, asumsi-asumsi, pilihan-pilihan nilai dan unsur-unsur pilihan, pembatasan, persyaratan kualitas data, tipe review kritis, jika ada, serta tipe dan format laporan yang diminta. Dalam kasus yang sama, tujuan dan ruang lingkup studi dapat direvisi karena batasan-batasan tak terduga, desakan-desakan, atau sebagai hasil dari informasi tambahan. Modifikasi semacam itu beserta justifikasinya harus didokumentasikan.

2. *Life Cycle Inventory* (LCI)

Langkah-langkah pelaksanaan LCI:

- Mengumpulkan data

Data kualitatif dan kuantitatif yang dikumpulkan adalah dari tiap proses unit yang termasuk dalam batasan sistem. Data yang dikumpulkan, apakah dari pengukuran, penghitungan atau perkiraan, digunakan untuk menghitung input dan output sebuah proses unit. Data diklasifikasikan menjadi:

- 1) Input energi, input material mentah, input pendukung dan input-input fisik lainnya
- 2) Produk, co-produk dan limbah
- 3) Pelepasan ke udara, air dan tanah, dan
- 4) Aspek lingkungan lainnya

- Menghitung data

Beberapa langkah operasi diperlukan untuk menghitung data, yaitu:

- 1) Validasi data; validasi data dapat melibatkan pembangunan neraca massa, neraca energi dan/atau analisis komparatif faktor-faktor lepas.
- 2) Menghubungkan data ke proses unit dan unit fungsional; sebuah aliran yang sesuai ditentukan untuk masing-masing proses. Data input dan output kuantitatif proses unit dihitung menurut aliran ini.
- 3) Menyaring batasan sistem; merefleksikan sifat berulang LCA, keputusan yang berkaitan dengan data yang akan digunakan didasarkan pada analisis sensitifitas untuk menentukan

signifikansinya. Hasil dari proses penyaringan dan analisis sensitifitas ini didokumentasikan. Analisis sensitifitas dapat menghasilkan:

- Pengeluaran tahapan daur hidup yang kurang signifikan
- Pengeluaran input dan output yang kurang signifikan
- Pemasukan proses-proses, input dan output baru yang memperlihatkan signifikansi.

Analisis ini menyediakan batas penanganan data selanjutnya ke data input dan output yang ditentukan signifikan terhadap tujuan LCA.

- Alokasi

Langkah-langkah alokasi:

- 1) langkah 1: jika mungkin, alokasi harus dihindari dengan:
 - a. membagi proses unit untuk dialokasikan menjadi dua atau lebih sub-proses, atau
 - b. mengembangkan sistem produk agar meliputi fungsi-fungsi tambahan yang berhubungan dengan co-produk.
- 2) Langkah 2: jika alokasi tidak dapat dihindari, input dan output sistem harus dipisah antara produk-produk atau fungsi-fungsinya yang berbeda dalam cara yang merefleksikan hubungan fisik dasar antar produk atau fungsi tersebut; dengan kata lain alokasi tersebut harus merefleksikan cara input dan output berubah oleh perubahan kuantitatif dalam produk atau fungsi pada sistem.
- 3) Langkah 3: dimana hubungan fisik saja tidak dapat dibentuk atau digunakan sebagai dasar alokasi, input harus dialokasikan di antara produk dan fungsi dalam cara yang merefleksikan hubungan lain. Sebagai contoh, data input dan output dapat dialokasikan di antara co-produk dalam proporsi nilai ekonomi produk. Beberapa output dapat berupa sebagian co-produk dan sebagian limbah. Dalam kasus ini, adalah penting untuk

mengidentifikasi rasio antara co-produk dan limbah karena input dan output akan dialokasikan hanya sebagai co-produk.

Bagaimanapun, dalam situasi ini, elaborasi tambahan diperlukan untuk alasan-alasan berikut:

- *Reuse and recycling* (seperti pengkomposan, pembaruan energi dan proses lain yang dapat diasimilasikan sebagai *reuse/recycling*) dapat mengimplikasikan bahwa input dan output berhubungan dengan proses-proses unit, untuk mengekstrak dan memolah bahan mentah dan pembuangan akhir produk, memungkinkan dibagi menjadi lebih dari satu sistem produk.
- *Reuse* dan *recycling* dapat mengubah sifat-sifat melekat suatu material dalam penggunaan selanjutnya.
- Perlakuan khusus harus dilakukan ketika mendefinisikan batasan sistem sehubungan dengan proses *recovery*.

Prosedur alokasi untuk proses-proses unit yang terbagi, sebagai dasar alokasi, jika layak, harus mengikuti aturan berikut:

- 1) sifat fisik (misalnya massa)
- 2) nilai ekonomik (misalnya nilai pasar material yang dibuang atau didaur ulang dalam hubungannya dengan nilai pasar bahan baku); atau
- 3) jumlah penggunaan selanjutnya material yang didaur ulang.

3. *Life Cycle Inventory Analisis (LCIA)*

Tahap LCIA harus direncanakan dengan hati-hati untuk mencapai tujuan dan ruang lingkup studi LCA. Tahapan LCIA meliputi pengumpulan hasil-hasil indikator untuk kategori dampak yang berbeda, yang secara bersama-sama merepresentasikan profil LCIA bagi sistem produk.

LCIA terdiri dari dua unsur:

- a. Unsur wajib

1) Seleksi kategori dampak, indikator kategori dan model karakterisasi

Untuk tiap kategori dampak, komponen LCIA yang penting meliputi:

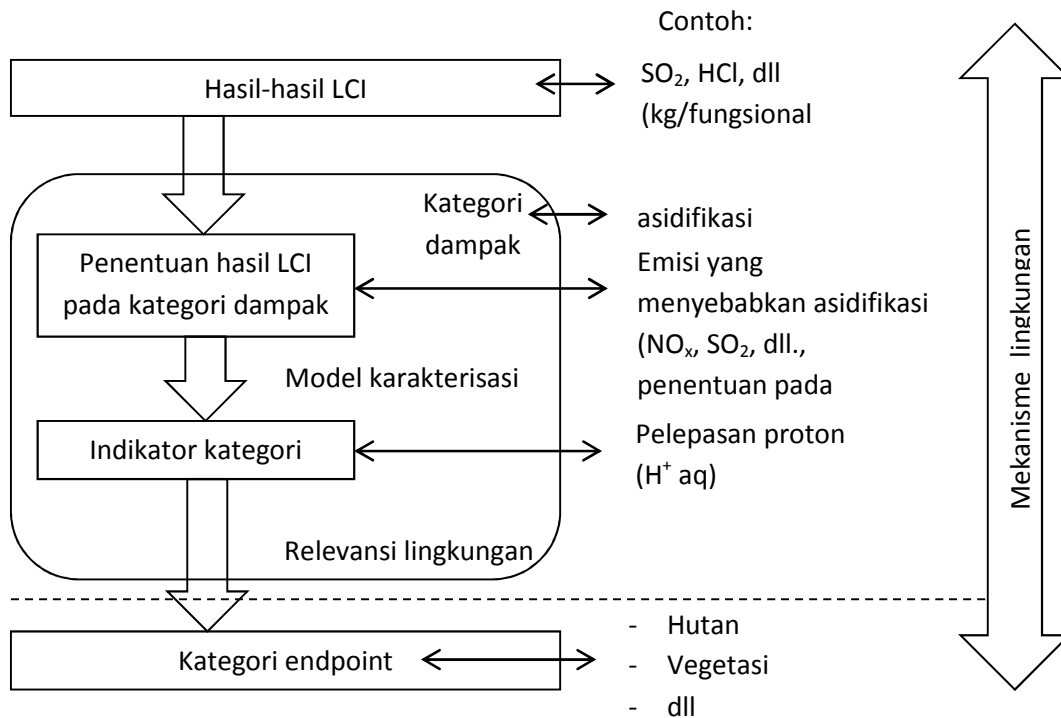
- Identifikasi kategori titik akhir,
- Definisi indikator kategori untuk titik akhir kategori yang ditentukan
- Identifikasi hasil LCI yang layak yang dapat ditetapkan untuk kategori dampak, memperhitungkan indikator kategori yang dipilih dan titik akhir kategori yang diidentifikasi, dan
- Identifikasi model karakterisasi dan faktor karakterisasi.
- Prosedur ini memfasilitasi pengumpulan, penetapan dan pemodelan karakterisasi hasil-hasil LCI yang sesuai.

2) Penetapan hasil-hasil LCI ke kategori dampak terpilih (klasifikasi)

Penetapan hasil-hasil LCI ke kategori dampak harus mempertimbangkan hal-hal berikut, kecuali disyaratkan berbeda dalam tujuan dan ruang lingkup:

- Penetapan hasil-hasil LCI ke kategori dampak yang eksklusif pada satu kategori dampak
- Identifikasi hasil LCI yang berhubungan dengan lebih dari satu kategori, meliputi:
 - a. Perbedaan antara mekanisme-mekanisme paralel (misalnya SO_2 dibagi kategori dampak terhadap kesehatan manusia dan asidifikasi), dan
 - b. Penetapan mekanisme-mekanisme serial (misalnya NO_2 dapat diklasifikasikan berkontribusi pada pembentukan ozon permukaan tanah (*ground-level*) dan asidifikasi.
- Penghitungan hasil-hasil indikator kategori (karakterisasi)
 Penghitungan hasil-hasil indikator melibatkan konversi hasil-hasil LCI ke unit-unit umum dan pengumpulan hasil-hasil yang telah dikonversi dalam kategori dampak yang sama. konversi

ini menggunakan faktor-faktor karakterisasi. Hasil penghitungan adalah hasil indikator numerik. Metode penghitungan hasil-hasil indikator harus diidentifikasi dan didokumentasikan, meliputi pilihan-pilihan nilai dan asumsi-asumsi yang digunakan.



Gambar 2.7. Konsep Indikator Kategori (ISO 14044: 2006)

3) Penghitungan hasil-hasil indikator kategori

Penghitungan hasil-hasil indikator (karakterisasi) melibatkan konversi hasil-hasil LCI ke unit-unit umum dan mengumpulkan hasil-hasil yang dikonversi dalam kategori dampak yang sama. Konversi ini menggunakan faktor-faktor karakterisasi. Hasil kalkulasi adalah sebuah hasil indikator numerik. Metode menghitung hasil indikator akan diidentifikasi dan di dokumentasi, termasuk pilihan-pilihan nilai dan asumsi-asumsi yang digunakan. Jika hasil-hasil LCI tidak tersedia atau jika data tidak cukup berkualitas agar LCIA dapat mencapai tujuan dan ruang lingkup,

diperlukan pengulangan pengumpulan data ataupun penyesuaian tujuan dan ruang lingkup.

Setelah karakterisasi dan sebelum unsur-unsur opsional, input dan output sistem produk digambarkan, misalnya, dengan:

- Sebuah kompilasi diskrit hasil indikator kategori LCIA bagi kategori-kategori dampak yang berbeda yang disebut sebagai sebuah profil LCIA.
- Sebuah set hasil inventory yang merupakan aliran dasar tetapi tidak ditetapkan sebagai kategori impact misalnya karena kurang relevan dengan lingkungan.
- Sebuah set data yang tidak menggambarkan aliran-aliran dasar.

b. Unsur opsional

Unsur-unsur opsional tergantung pada tujuan dan ruang lingkup LCIA, terdiri dari berikut ini:

- a) Normalisasi: menghitung besarnya hasil-hasil indikator kategori relatif terhadap informasi referensi
- b) Pengelompokan: penyaringan dan perankingan yang mungkin dari kategori dampak
- c) Pembobotan: pengkonversian dan pengumpulan yang mungkin atas hasil-hasil indikator pada kategori dampak menggunakan faktor-faktor numerik berdasarkan pilihan-pilihan nilai; sebelum data diberi bobot, data harus tetap tersedia.
- d) Analisis kualitas data: pemahaman yang lebih baik mengenai keandalan pengumpulan hasil-hasil indikator, profil LCIA.

Elemen opsional LCIA dapat menggunakan informasi dari luar kerangka kerja LCIA. Penggunaan informasi semacam itu harus dijelaskan dan penjelasan harus dilaporkan.

4. Menginterpretasikan hasil

Fase interpretasi daur hidup LCA atau studi LCI terdiri dari beberapa unsur terdiri dari:

- Identifikasi isu-isu signifikan berdasarkan hasil-hasil fase LCI dan LCIA
- Evaluasi yang mempertimbangkan kelengkapan, sensitifitas dan cek konsistensi
- Kesimpulan, pembatasan dan rekomendasi

Menurut Hall dan Howe (2012) ada enam kategori dampak lingkungan yang umum adalah:

1. Pemanasan global; dimana kontributor utamanya adalah pembakaran bahan bakar fosil untuk berbagai alasan dan diekspresikan sebagai CO_2 *equivalent* (paling relevan dengan pembangkitan energi dan substitusi sumber daya dengan pembangkit energi terbarukan),
2. Asidifikasi; yang mempengaruhi air, hutan dan dalam beberapa kasus pembangunan disebabkan terutama oleh pembakaran untuk listrik, pemanasan dan transport dan diekspresikan sebagai SO_2 *equivalent*.
3. Eutrofikasi; yang menyebabkan ledakan alga dan penurunan kadar oksigen serta kematian ikan, terutama disebabkan aliran pupuk nitrogen ke dalam air dan diekspresikan sebagai *nitrate equivalent*.
4. Penipisan ozon; disebabkan oleh halokarbon buatan manusia (CFC, HCFC, dll)
5. Penggunaan lahan dalam produksi produk dan diekspresikan sebagai ha/tahun (atau m^2/tahun),
6. Asbut (asap kabut) fotokemikal dari senyawa organik volatil (VOC) yang diproduksi dari bensin dan solar serta larutan-larutan organik yang tidak terbakar yang menyebabkan masalah-masalah pernafasan dan mengurangi hasil pertanian – diekspresikan sebagai *ethane equivalent*.

Tabel 2.6. Kategori Dampak dan Indikator

Kategori dampak	Indikator
<i>Kategori yang berhubungan dengan input</i>	
Ekstraksi sumber daya abiotik	Kelangkaan sumber daya
Ekstraksi sumber daya biotik	Kelangkaan sumber daya, mempertimbangkan laju pertumbuhan
<i>Kategori yang berhubungan dengan output</i>	
Perubahan iklim	KgCO ₂ sebagai unit ekuivalensi untuk Potensi Pemanasan Global (GWP)
Penipisan ozon stratosperik	KgCFC-11 sebagai unit ekuivalensi untuk potensi penipisan ozon (ODP)
Toksisitas terhadap manusia	Potensi toksisitas terhadap manusia (HTP)
Eko-toksisitas	Potensi Eko-toksisitas Akuatik (AETP)
Pembentukan foto-oksidan	Kg ethana sebagai unit ekuivalensi untuk potensi pembantuan ozon fotokimiawi (POCP)
Asidifikasi	Pelepasan H ⁺ sebagai ekuivalensi untuk potensi asidifikasi (AP)
Nutrifikasi	Jumlah stoichiometric makro-nutrien sebagai unit ekuivaalensi bagi potensi nutrifikasi (NP)

Sumber: Udo de Haes, 1996 dan Udi de Haes, dkk., 1999 dalam DTIE UNEP, 2013

Midpoint dan endpoint

DTIE UNEP, 2003 menguraikan istilah *midpoint* dan *endpoint* dalam LCI sebagaimana berikut:

1. Midpoint merupakan titik dalam rantai sebab (mekanisme lingkungan) dari sebuah kategori dampak, antara *stressor* dengan *endpoint*. Karena faktor-faktor karaterisasi *midpoint* dapat dihitung untuk merefleksikan kepentingan relatif sebuah emisi atau ekstraksi dalam LCI. Dalam pendekatan midpoint, relevansi lingkungan umumnya ada dalam bentuk hubungan kualitatif, statistik dan artikel-artikel review; bagaimanapun, pendekatan *midpoint* dapat mirip dengan penghitungan menggunakan metode *endpoint* untuk menyediakan pandangan kepada pengambil keputusan.
2. Pendekatan endpoint dimulai dari nilai-nilai utama dalam masyarakat, dihubungkan dengan area perlindungan, atau objek-objek perlindungan. Dari nilai-nilai ini dan *endpoint-endpoint* yang terhubung, pemodelan kembali lagi ke emisi dan konsumsi sumber daya. Dalam pendekatan *endpoint* tidak

diperlukan kesepakatan terpisah dengan relevansi lingkungan indikator kategori. Pemodelan *endpoint* dapat memfasilitasi lebih banyak pembobotan terstruktur dan terinformasi, khususnya dalam penyatuan berbasis *science* melintasi kategori-kategori mengenai parameter-parameter umum) misalnya, dampak kesehatan manusia dihubungkan dengan perubahan iklim dapat dibandingkan dengan dampak kesehatan manusia yang dihubungkan dengan meruskan ozon menggunakan basis umum seperti DALYs – *Disability Adjusted Life Years*).

Pendekatan LCA dalam penilaian kinerja lingkungan simbiosis industri digunakan oleh Matilla dkk. (2012) dan Daddy dkk. (2017). Panduan *International Reference Life Cycle (ILCD)* digunakan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan penelitian utama dalam literatur simbiosis industri. Tipologi lima pertanyaan penelitian utama yang diajukan adalah: 1) Analisis, 2) peningkatan, 3) ekspansi sistem yang sudah berjalan, 4) desain taman eko-industri baru, 5) merestruktur daur ekonomi. Tiga grup pertama membantu analisis sistem yang sudah ada, meskipun masing-masing memiliki fokus yang berbeda. Dua grup terakhir adalah untuk studi hipotetik sistem yang akan datang atas dua skala yang berbeda: tingkat EIP dan tingkat makroekonomi (Mattila, dkk, 2012).

- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *24*, 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>
- Alkaya, E., & Demirer, G. N. (2016). Minimizing and adding value to seafood processing wastes. *Food and Bioproducts Processing*, *100*, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.003>
- Anh, P. T., Dieu, T. T. M., Mol, A. P. J., Kroeze, C., & Bush, S. R. (2011). Towards eco-agro industrial clusters in aquatic production : the case of shrimp processing industry in Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, *19*(17–18), 2107–2118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.002>
- Bezama, A., Valeria, H., Correa, M., & Szarka, N. (2012). Evaluation of the environmental impacts of a Cleaner Production Agreement by frozen fish facilities in the Biobío Region , Chile. *Journal of Cleaner Production*, *26*, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.029>
- Bhakar, V., Kumar, D. N. S. H., Krishna, N., & Singh, K. (2016). Life cycle assessment of filtration systems of reverse osmosis units : a case study of a university campus. *Procedia CIRP*, *40*, 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.119>
- Bugallo, P. M. B., Andrade, L. C., Iglesias, A. M., & López, R. T. (2013). Integrated environmental permit through Best Available Techniques : evaluation of the fish and seafood canning industry. *Journal of Cleaner Production*, *47*, 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.022>
- Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook o Water and Wastewater Treatment Technologies*. Boston, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi: Butterworth Heinemann.
- DTIE UNEP. (2003). *Evaluation of Environmental Impacts In Life Cycle Assessment*. UNEP, EPA, CML, AGA.
- Duangpaseuth, SDas, Q., Chotchamlong, N., Ariunbaatar, J., Khunchornyakong, A., & Prashanthini, V. (n.d.). *Seafood Processing*.
- El-ghaffar, M. A. A., & Tieama, H. A. (2017). A Review of Membranes

- Classifications , Configurations , Surface Modifications , Characteristics and Its Applications in Water Purification. *Chemical and Biomolecular Engineering*, 2(2), 57–82. <https://doi.org/10.11648/j.cbe.20170202.11>
- FAO. (2014). *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Rome. Retrieved from www.fao.org/3/a-i3720e.pdf
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1–3), 1–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>
- Goga, T. (2016). *A Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Water Treatment Plants using Alternative Sources of Water (Seawater and Mine Affected Water)* by Submitted in fulfilment of the academic requirements of Master of Science in Engineering School of Engineering. School of Engineering College of Agriculture, Engineering and Science, University of KwaZulu-Natal.
- Hall, G. M., & Kose, S. (2014). Fish Processing Installations: Sustainable Operation. In I. S. Boziaris (Ed.), *Seafood Processing: Technology, Quality and Safety* (pp. 1–488). West Sussex: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118346174>
- Indriatmoko, R. H., & Herlambang, A. (1999). *PENGOLAHAN AIR ASIN ATAU PAYAU DENGAN SISTEM OSMOSIS BALIK*. Jakarta.
- Kalbar, P. P., Karmakar, S., & Asolekar, S. R. (2013). Assessment of wastewater treatment technologies : life cycle approach, 27(3), 261–268. <https://doi.org/10.1111/wej.12006>
- Lier, J. B. Van, Mahmoud, N., & Zeeman, G. (2008). Anaerobic Wastewater Treatment. In M. Heze, M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, & D. Brdjanovic (Eds.), *Biological Wastewater Treatment: principles Modelling and Design* (pp. 401–441). London: IWA Publishing.
- Mattila, T., Lehtoranta, S., Sokka, L., Melanen, M., & Nissinen, A. (2012). Methodological Aspects of Applying Life Cycle Assessment to Industrial Symbioses, 16(1), 51–60. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00443.x>
- Opara, L., Al-Jufaili, S. M., & Rahman, M. S. (2007). Postharvest Handling and

- Preservation of Fresh Fish and Seafood. In M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of Food Preservation* (2nd Editio, pp. 151–172). Boca Raton London New York: CRC Press.
- Opher, T., & Friedler, E. (2016). Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse. *Journal of Environmental Management*, *182*, 464–476. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.080>
- Peñate, B., & García-rodríguez, L. (2012). Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology. *Desalination*, *284*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.010>
- Pintilie, L., Torres, C. M., Teodosiu, C., & Castells, F. (2016). Urban wastewater reclamation for industrial reuse : An LCA case study. *Journal of Cleaner Production*, *139*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.209>
- Polruang, S., Sirivithayapakorn, S., & Prateep, N. T. R. (2017). A comparative life cycle assessment of municipal wastewater treatment plants in Thailand under variable power schemes and effluent management programs. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.183>
- Pusat Studi Sumber Daya dan Teknologi Kelautan UGM. (2014). Jenis, Potensi, Peluang Pemanfaatan Sumber Daya Kelautan dan Perikanan. In L. dan U. Sahubawa (Ed.), *Teknologi Pengawetan dan Pengolahan Hasil Perikanan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Ras, C., & von Blottnitz, H. (2012). A comparative life cycle assessment of process water treatment technologies at the Secunda industrial complex , South Africa. *Water SA*, *38*(4), 549–554. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v38i4.10>
- Said, N. I. (2003). Aplikasi Teknologi Osmosis Balik Untuk Memenuhi Kebutuhan Air Minum. *J.Tek.Ling. P3TL-BPPT*, *4*(2), 16–35.
- Said, N. I. (2008). Pengolahan Payau Menjadi Air Minum dengan Teknologi Reverse Osmosis. In *Teknologi Pengolahan Air Minum* (pp. 443–501). Jakarta: BPPT.
- Said, N. I. (2017). *Teknologi Pengolahan Air Limbah*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sampels, S. (2015). The effects of processing technologies and preparation on the

- final quality of fish products. *Trends in Food Science & Technology*, 44(2), 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.003>
- Snip, L. J. P. (2010). *Quantifying the greenhouse gas emissions of wastewater treatment plants*. Wageningen University. Retrieved from http://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/MSc_s/sniplaura_msc.pdf
- Sunny, N., & Mathai P, L. (2013). Physicochemical process for fish processing wastewater. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(4), 901–905.
- Tariq Al-Sarkal, H. A. A. (2013). Ultrafiltration versus sedimentation-based pretreatment in Fujairah-1 RO plant: Environmental impact study. *Desalination*, 317, 55–66. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.02.019>
- Tay, J.-H., Show, K.-Y., & Hung, Y.-T. (2004). Seafood Processing Wastewater Treatment. In L. K. Wang, Y. Hung, H. H. Lo, & C. Yapijakise (Eds.), *Handbook of industrial and hazardous wastes treatment* (2nd ed., Vol. Chapter 14, pp. 29–66). New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.
- Torry Research Station. (n.d.). Reducing odour in fish meal production. Retrieved April 27, 2018, from <http://www.fao.org/wairdocs/tan/x5943e/x5943e01.htm>
- Ulhasanah, N., & Goto, N. (2012). Preliminary Design of Eco-City by Using Industrial Symbiosis and Waste Co-Processing Based on MFA, LCA, and MFCA of Cement Industry in Indonesia. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(6), 553. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.285>
- Uttamangkabovorn, M., Prasertsan, P., & Kittikun, A. H. (2005). Water conservation in canned tuna (pet food) plant in Thailand, 13, 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.12.003>
- Voutchkov, N. (2013). *Desalination Engineering Planning and Design*. New York: McGraw-Hill.
- Zang, Y., Li, Y., Wang, C., Zhang, W., & Xiong, W. (2015). Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A

review. *Journal of Cleaner Production*, 107, 676–692.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.060>

Zhou, J., Chang, V. W. C., & Fane, A. G. (2011). Environmental life cycle assessment of brackish water reverse osmosis desalination for different electricity production models. *Energy Environ. Sci.*, 4, 2267–2278.

<https://doi.org/10.1039/c0ee00828a>

Zijp, M. ., & Van der Laan, H. (2015). *Life Cycle Assessment of two drinking water production schemes*. Bilthoven.