

# Penerapan *Life Cycle Assessment* untuk Kajian Dampak Lingkungan Pada Instalasi Pengolahan Air Bersih

Muhammad Purnama Adji<sup>1\*</sup>, Munawar Ali<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

\*Koresponden email: purnamaadji08@gmail.com

Diterima: 16 April 2024

Disetujui: 21 April 2024

## Abstract

Water Treatment Plants (WTP) are an important component in providing drinking water that is safe and meets health standards. However, the process can have a negative impact on the environment due to the use of chemicals and electrical energy. This research uses the Life Cycle Assessment (LCA) method with the help of SimaPro software to analyze the environmental impact of WTP. The research aims to analyze the environmental impact of the clean water treatment process and offer an environmentally friendly alternative to WTP. The LCA method is used with environmental impact assessment using SimaPro 9.0. This research includes determining objectives and scope, data collection (Life Cycle Inventory), impact analysis (Life Cycle Impact Assessment), and data interpretation. The results of the analysis show that the reservoir and lamella units are the biggest contributors to the impact in the endpoint impact category. The Impact 2002+ and ReCiPe 2016 methods produced different impacts, with ReCiPe 2016 showing a higher impact in some categories. This research provides insight into the environmental impacts of the clean water processing process at WTP. Recommendations for improvement include reducing the use of chemicals, energy efficiency, and implementing environmentally friendly technology.

**Keywords:** *Water Treatment Plant (WTP), Life Cycle Assessment (LCA), Impact Method 2002+, ReCiPe 2016, Environmental Improvement*

## Abstrak

Instalasi Pengolahan Air Bersih (IPA) adalah komponen penting dalam penyediaan air minum yang aman dan sesuai standar kesehatan. Namun, prosesnya dapat memiliki dampak negatif terhadap lingkungan karena penggunaan bahan kimia dan energi listrik. Penelitian ini menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)* dengan bantuan *software SimaPro* untuk menganalisis dampak lingkungan dari IPA. Penelitian bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih dan menawarkan alternatif yang ramah lingkungan untuk IPA. Metode LCA digunakan dengan penilaian dampak lingkungan menggunakan SimaPro 9.0. Penelitian ini meliputi penentuan tujuan dan ruang lingkup, pengumpulan data (*Life Cycle Inventory*), analisis dampak (*Life Cycle Impact Assessment*), dan interpretasi data. Hasil analisis menunjukkan bahwa unit reservoir dan lamella menjadi penyumbang dampak terbesar pada kategori dampak endpoint. Metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016 menghasilkan dampak yang berbeda, dengan ReCiPe 2016 menunjukkan dampak yang lebih tinggi pada beberapa kategori. Penelitian ini memberikan wawasan tentang dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih di IPA. Rekomendasi perbaikan meliputi pengurangan penggunaan bahan kimia, efisiensi energi, dan penerapan teknologi ramah lingkungan.

**Kata Kunci:** *Instalasi Pengolahan Air Bersih (IPA), Life Cycle Assessment (LCA), Metode Impact 2002+, ReCiPe 2016, Perbaikan Lingkungan*

## 1. Pendahuluan

Instalasi Pengolahan Air Bersih (IPA) merupakan sistem bangunan yang bertugas untuk menghilangkan polutan dari air baku sehingga dapat digunakan sesuai dengan standar kesehatan yang berlaku. IPA melibatkan tiga jenis pengolahan utama yaitu fisika, kimia, dan biologis. Faktor-faktor seperti karakteristik air, kandungan zat pencemar, dan hasil akhir kualitas air menjadi pertimbangan utama dalam menentukan jenis unit pengolahan yang diperlukan [1]. Unit-unit dalam IPA, seperti intake, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, desinfeksi dan *ion exchange*, berperan penting dalam memproses air baku menjadi air bersih yang layak konsumsi [2]. Misalnya pada proses koagulasi, bahan kimia seperti

aluminium sulfat digunakan untuk membentuk flok yang akan menyaring partikel-partikel terlarut dalam air [3].

Penggunaan teknologi ozonisasi juga menjadi salah satu metode disinfeksi yang ramah lingkungan dalam menghasilkan air bersih. Metode ini efektif dalam menurunkan kadar polutan seperti warna, senyawa organik, dan bau dalam air, sambil meningkatkan kadar oksigen terlarut [4]. Namun, penting untuk memahami dampak lingkungan dari seluruh proses pengolahan air bersih. Untuk itu, metode *Life Cycle Assessment* (LCA) menjadi solusi yang efektif dalam menganalisis dampak lingkungan dari tahap produksi hingga pemakaian. LCA memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi keseluruhan dampak lingkungan, menyediakan rekomendasi untuk peningkatan keberlanjutan, dan menggambarkan siklus hidup produk secara komprehensif [5].

Batasan-batasan dalam *Life Cycle Assessment* (LCA) terbagi menjadi empat jenis: *Cradle to grave*, *Cradle to gate*, *Gate to Gate*, dan *Cradle to cradle* [6]. *Cradle to grave* dimulai dari bahan baku hingga pengoperasian produk, *Cradle to gate* dimulai dari bahan baku hingga mencapai titik tertentu dalam proses, *Gate to Gate* meninjau aktivitas terdekat seperti proses produksi, dan *Cradle to cradle* memperhitungkan dari bahan baku hingga daur ulang material. Selanjutnya, dalam tahapan *Life Cycle Assessment* (LCA), terdapat empat fase yang meliputi *Goals and Scope Definition*, *Life Cycle Inventory* (LCI), *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) dan *Interpretation* [7].

Dalam implementasi LCA, penggunaan software Simapro menjadi penting karena memfasilitasi pengumpulan data, analisis, dan pengendalian dampak lingkungan dari suatu produk atau proses [8]. Simapro menawarkan berbagai metode LCA seperti Eco indicator 99, Edip 1997 dan 2003, EPS 2000, dan Impact 2002+, yang membantu dalam menilai dampak lingkungan secara menyeluruh [9]. Penggunaan metode LCA yang tepat, seperti CML, EDIP, TRACI, atau Impact 2002+, akan mempengaruhi hasil analisis dan keputusan untuk meningkatkan keberlanjutan proses pengolahan air bersih [10]. Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan teoritis yang kuat dan kerangka kerja yang sistematis dalam memahami dan mengelola dampak lingkungan dari instalasi pengolahan air bersih.

Metode Impact 2002+ menggunakan pendekatan yang menggabungkan midpoint yang sesuai untuk menghasilkan 15 kategori dampak kerusakan yang kemudian digabungkan menjadi 4 kategori kerusakan. Kategori dampak tersebut mencakup berbagai aspek seperti karsinogen, non-karsinogen, organik pernapasan, anorganik pernapasan, radiasi ionisasi, penipisan lapisan ozon, oksidasi fotokimia, ekotoksitas akuatik, ekotoksitas terestrial, asidifikasi/nutrifikasi terestrial, asidifikasi akuatik, eutrofikasi akuatik, penempatan lahan, pemanasan global, energi tidak terbarukan, dan ekstraksi mineral [11]. Sementara itu, metode ReCiPe merupakan hasil gabungan dari metode CML dan Eco-Indicator 99 yang menawarkan berbagai dampak seperti toksisitas manusia (kanker dan non-kanker), radiasi ionisasi, penipisan lapisan ozon stratosfer, partikulat, pembentukan ozon troposfer (manusia), sumber daya fosil, ekotoksitas air tawar, eutrofikasi air tawar, penggunaan/transformatasi lahan, pembentukan ozon troposfer (ekologi), ekotoksitas terestrial, ekotoksitas laut, sumber daya mineral, eutrofikasi laut dan penggunaan air [12].

Instalasi Pengolahan Air Bersih (IPA) adalah bagian krusial dalam sistem penyediaan air minum yang bertujuan untuk menghasilkan air yang aman dan sesuai dengan standar kesehatan yang berlaku, seperti yang diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 32 Tahun 2017 [13]. Meskipun memberikan manfaat penting bagi masyarakat, proses pengolahan air bersih juga dapat memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini disebabkan karena IPA menggunakan bahan kimia seperti koagulan, polimer, dan disinfektan, serta mengandalkan energi listrik untuk menggerakkan pompa-pompa dalam prosesnya. Oleh karena itu, IPA bertanggung jawab atas dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan bahan kimia dan konsumsi energi listrik tersebut.

Dalam mengidentifikasi dan mengukur dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih, peneliti menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan bantuan software Simapro. Metode ini telah terbukti efektif dalam menganalisis proses pengolahan air bersih serta memberikan gambaran yang objektif dan komprehensif mengenai dampak lingkungan yang dihasilkan [14]. Dengan LCA, peneliti dapat mengidentifikasi titik-titik penting dalam siklus hidup IPA yang mempengaruhi lingkungan, serta memberikan rekomendasi untuk mengurangi dampak negatif tersebut. Melalui pendekatan ini, IPA dapat terus meningkatkan kinerjanya menuju keberlanjutan lingkungan yang lebih baik [15].

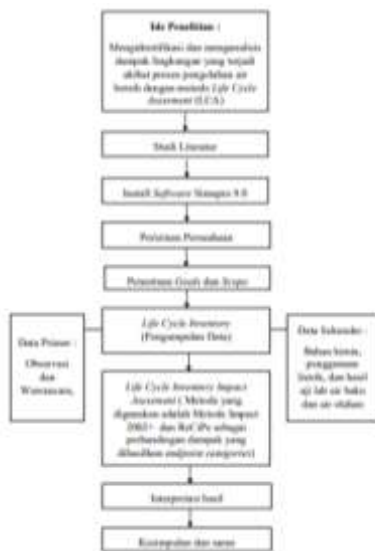
## 2. Metode Penelitian

Kerangka penelitian dalam **Gambar 1** dirancang untuk memudahkan pemahaman alur penelitian dan prosedur kerja yang akan dilakukan. Tujuan utama penelitian adalah untuk menganalisis serta mengidentifikasi dampak lingkungan yang disebabkan oleh pengolahan air bersih, dengan harapan hasil

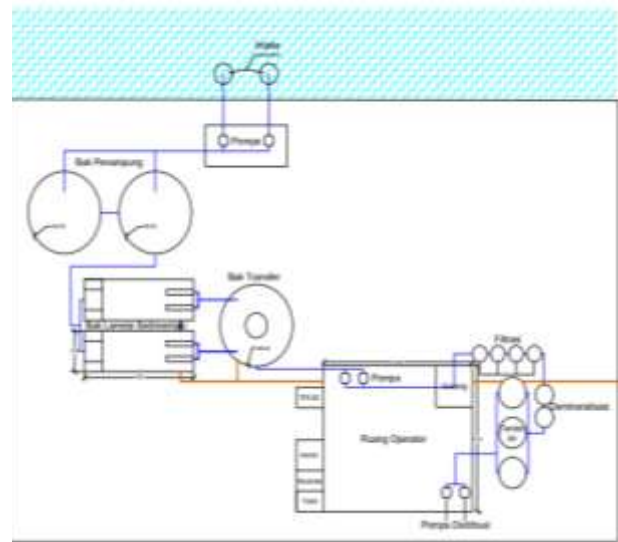
analisis ini dapat menjadi acuan dalam mencari alternatif yang ramah lingkungan untuk diterapkan pada instalasi pengolahan air bersih. Metode yang digunakan adalah *Life Cycle Assessment (LCA)*, dengan penilaian dampak lingkungan dilakukan menggunakan aplikasi software SimaPro 9.0.

Langkah selanjutnya adalah menentukan tujuan (*goals*) dan ruang lingkup (*scope*) penelitian. Tujuan penelitian adalah menganalisis dan mengidentifikasi dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih, sedangkan ruang lingkup penelitian meliputi beberapa tahapan proses pengolahan air bersih, seperti Intake, lamella sedimentasi, bak transfer ozon, filtrasi, demineralisasi (*ion exchange*), reservoir. Setelah itu, dilakukan tahap pengumpulan data (*Life Cycle Inventory*) yang terdiri dari data primer meliputi observasi dan wawancara dan data sekunder, seperti penggunaan bahan kimia, kebutuhan listrik, hasil laboratorium air, dan parameter air baku dan olahan dari setiap unit seperti *Total Suspended Solid (TSS)*, *Biological Oxygen Demand (BOD)*, *Chemical Oxygen Demand (COD)* dan E-Coli.

Selanjutnya, dilakukan tahap *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* menggunakan metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016. Pada tahap ini, dilakukan analisis terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan, seperti global warming, human toxicity, dan lainnya. Hasil analisis ini kemudian diinterpretasikan untuk mengidentifikasi penyebab dari dampak lingkungan terbesar dan memberikan rekomendasi program perbaikan. Terakhir, dilakukan tahap pembuatan perbandingan untuk kategori dampak endpoint antara metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016 untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang dampak lingkungan dari instalasi pengolahan air bersih.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



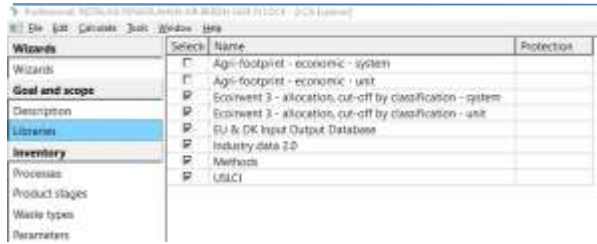
Gambar 2. Denah Instalasi Pengolahan Air Bersih

### 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian tentang pengolahan data penilaian dampak lingkungan hidup menggunakan software SimaPro melalui beberapa tahapan penting, termasuk penentuan tujuan dan cakupan, pencatatan inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi data. Fokus penelitian terbatas pada penggunaan bahan baku dan proses produksi air bersih. Tahap LCI mencakup input data dari bahan baku, bahan kimia, dan energi seperti listrik yang digunakan dalam proses pengolahan. Selanjutnya, tahap LCIA mengevaluasi dampak lingkungan yang timbul dari proses produksi air bersih. Hasil interpretasi data digunakan untuk mengidentifikasi dampak produksi air bersih dan mengusulkan langkah-langkah perbaikan yang sesuai.

#### 3.1 Penentuan Goal and Scope

Penelitian *Life Cycle Assessment (LCA)* bertujuan untuk mengidentifikasi dampak lingkungan yang muncul dari proses pengolahan air bersih dan menawarkan alternatif untuk mengurangi dampak tersebut. Ruang lingkup penelitian ini terbatas pada proses pengolahan air bersih (*gate to gate*). *Goal and scope* yang digunakan dalam aplikasi SimaPro mencakup hal yang bisa dilihat dalam **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



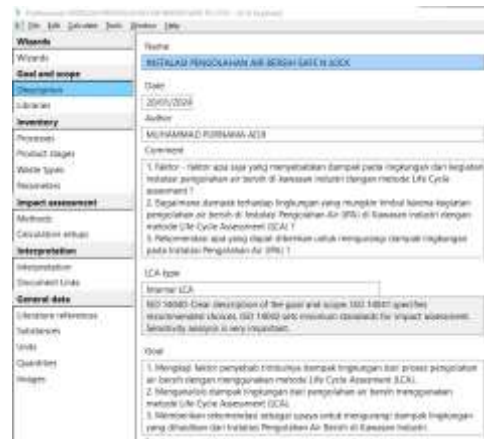
Gambar 3. Penentuan Scope pada Simapro 9.5

Pada tahap ini, harus dengan jelas mendefinisikan tujuan dan batasan analisis yang dilakukan. Ini meliputi menetapkan produk atau layanan yang akan dievaluasi, serta sumber daya dan emisi yang akan dimasukkan dalam perhitungan. Selain itu, perlu memilih unit fungsi sebagai dasar perbandingan dalam analisis, mengidentifikasi proses-proses relevan dalam siklus hidup produk atau layanan yang akan

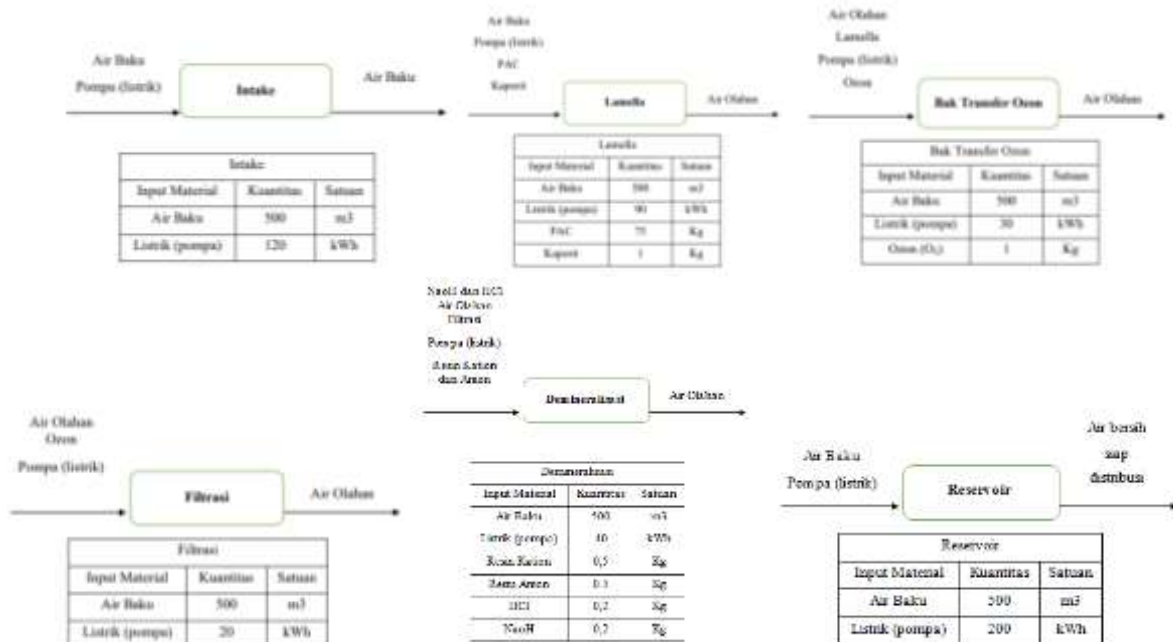
### 3.2 Life Cycle Inventory (LCI)

Tahap *Life Cycle Inventory* (LCI) melibatkan pengumpulan data untuk dimasukkan ke dalam perangkat lunak SimaPro guna menghasilkan output yang menunjukkan dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih. Data ini diperoleh dari perusahaan dan mencakup berbagai unit seperti Unit Intake, Unit Lamella, Unit Bak Transfer Ozon, Unit Filtrasi, Unit Demineralisasi, dan Unit Reservoir. Misalnya, Unit Intake mengambil air baku dan listrik untuk operasi pompa, sedangkan Unit Lamella melibatkan bahan kimia seperti PAC dan Kaporit untuk proses koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi. Unit Demineralisasi melibatkan pertukaran ion menggunakan resin kation dan anion, serta bahan kimia seperti HCl dan NaOH. Semua unit ini memerlukan konsumsi listrik yang signifikan untuk pompa dan proses lainnya.

dievaluasi, dan menyesuaikan parameter serta asumsi tambahan sesuai kebutuhan analisis.



Gambar 4. Penentuan goal pada Simapro 9.5



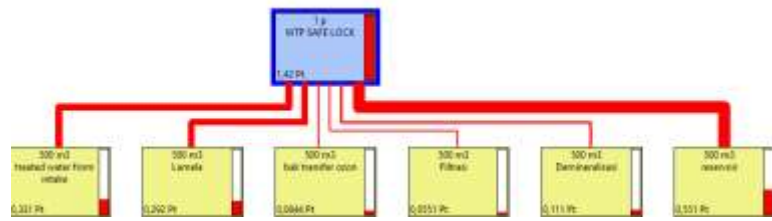
Gambar 5. Life Cycle Inventory (LCI)

### 3.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Pada tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), dilakukan klasifikasi dan penilaian terhadap dampak lingkungan yang timbul dari proses pengolahan air bersih, berdasarkan data dari *Life Cycle Inventory*. Dampak-dampak tersebut dianalisis menggunakan metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016 untuk membandingkan dampak yang dihasilkan. Metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016 mencakup 15 dampak. Analisis dilakukan untuk menentukan dampak terbesar dari ke-15 dampak tersebut. LCIA juga menampilkan network result yang menggambarkan hubungan antarproses yang berdampak pada lingkungan, dengan panah merah ke atas menunjukkan pengaruh pada lingkungan, garis merah

menunjukkan keterkaitan antara material dan proses, sementara garis hijau menandakan emisi yang terproses tanpa dampak pada lingkungan.

3.3.1 Metode Impact 2002 +



Gambar 6. Network Result dari proses pengolahan air bersih menggunakan metode Impact 20  
Sumber : Hasil Running Simapro

Dari network result di atas menunjukkan bahwa besarnya dampak yang dihasilkan dari proses pengolahan air bersih secara berturut – turut adalah Reservoir 0,551 Pt, Intake 0,331 Pt, Lamella 0,292 Pt, Demineralisasi 0,111 Pt, Bak transfer ozon 0,0844 Pt, dan terakhir Filtrasi sebesar 0,0551 Pt.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan yang menjelaskan dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih. Fase *Characterization* melibatkan penilaian besarnya materi yang berkontribusi terhadap kategori dampak berdasarkan data dalam tabel kontribusi dampak. Pada tahap ini, metode Impact 2002+ digunakan untuk mengkategorikan 15 dampak lingkungan yang dapat dilihat dalam Tabel 1. , Selanjutnya, tahap *Damage Assessment* mengukur dampak harian dari setiap kategori yang dapat dilihat dalam Tabel 2. Setelah itu, Normalization dilakukan untuk menyamakan satuan dari setiap kategori dampak, dan teridentifikasi tiga dampak paling besar: *respiratory inorganics*, *global warming*, dan *non-renewable energy* yang dapat dilihat dari Gambar 7. Tahap terakhir adalah *Weighting and single score*, di mana dampak dari setiap kategori dinilai dan dihitung dalam satu skor tunggal. Dampak terbesar ditemukan pada *respiratory inorganics*, *global warming*, dan *non-renewable energy*, dengan reservoir, intake, dan lamella menjadi penyumbang terbesar yang bisa dilihat dalam Tabel 3 dan Gambar 8.

Tabel 1. Characterization Impact 2002 + Pada Proses pengolahan Air bersih

| Impact category         | Unit         | Total   | Intake  | Lamela  | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|-------------------------|--------------|---------|---------|---------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| Carcinogens             | kg C2H3Cl eq | 2.02714 | 0.04723 | 1.80895 | 0.01874           | 0.00787  | 0.06564        | 0.07871   |
| Non-carcinogens         | kg C2H3Cl eq | 16.6296 | 0.17762 | 15.9424 | 0.07602           | 0.0296   | 0.10797        | 0.29604   |
| Respiratory inorganics  | kg PM2.5 eq  | 12.8473 | 3.1066  | 2.22688 | 0.78056           | 0.51777  | 1.03782        | 5.17766   |
| Ionizing radiation      | Bq C-14 eq   | 461.15  | 8.32596 | 312.666 | 117.411           | 1.38766  | 7.48248        | 13.8766   |
| Ozone layer depletion   | kg CFC-11 eq | 0.0001  | 4.7E-07 | 1.4E-05 | 1.9E-07           | 7.8E-08  | 8.6E-05        | 7.8E-07   |
| Respiratory organics    | kg C2H4 eq   | 0.13871 | 0.0232  | 0.05631 | 0.00736           | 0.00387  | 0.0093         | 0.03867   |
| Aquatic ecotoxicity     | kg TEG water | 2995.12 | 97.5317 | 2584.96 | 38.581            | 16.2553  | 95.2336        | 162.553   |
| Terrestrial ecotoxicity | kg TEG soil  | 1191.04 | 81.8286 | 849.987 | 38.491            | 13.6381  | 70.7098        | 136.381   |
| Terrestrial acid/nutri  | kg SO2 eq    | 11.8225 | 2.28907 | 3.90468 | 0.63366           | 0.38151  | 0.79848        | 3.81512   |
| Land occupation         | m2org.arable | 1.2349  | 0.10927 | 0.79681 | 0.08235           | 0.01821  | 0.04614        | 0.18212   |
| Aquatic acidification   | kg SO2 eq    | 3.13149 | 0.57737 | 1.1285  | 0.16439           | 0.09623  | 0.20273        | 0.96228   |
| Aquatic eutrophication  | kg PO4 P-lim | 0.33544 | 0.07825 | 0.06632 | 0.02112           | 0.01304  | 0.02631        | 0.13041   |
| Global warming          | kg CO2 eq    | 668.675 | 134.717 | 201.009 | 38.514            | 22.4529  | 47.4524        | 224.529   |
| Non-renewable energy    | MJ primary   | 7935.91 | 1539.56 | 2501.1  | 508.517           | 256.593  | 564.214        | 2565.93   |
| Mineral extraction      | MJ surplus   | 55.6862 | 0.00961 | 55.599  | 0.00421           | 0.0016   | 0.0557         | 0.01602   |

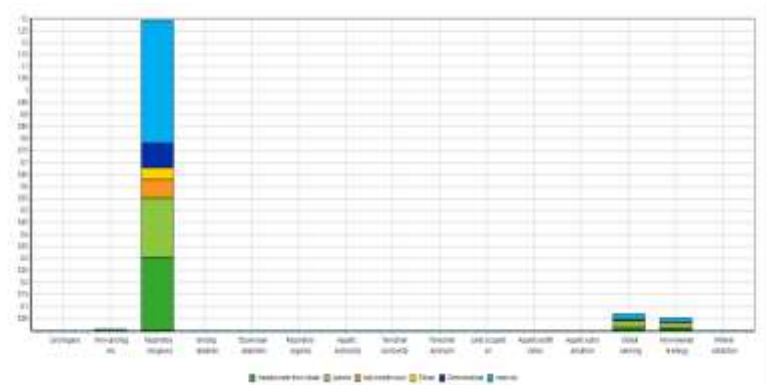
Sumber : Hasil Running Simapro

Tabel 2. Damage Assessment Impact 2002+ pada Proses pengolahan Air Bersih

| Impact category         | Unit      | Total   | intake  | Lamela  | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|-------------------------|-----------|---------|---------|---------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| Carcinogens             | DALY      | 5.7E-06 | 1.3E-07 | 5.1E-06 | 5.2E-08           | 2.2E-08  | 1.8E-07        | 2.2E-07   |
| Non-carcinogens         | DALY      | 4.7E-05 | 5E-07   | 4.5E-05 | 2.1E-07           | 8.3E-08  | 3E-07          | 8.3E-07   |
| Respiratory inorganics  | DALY      | 0.00899 | 0.00217 | 0.00156 | 0.00055           | 0.00036  | 0.00073        | 0.00362   |
| Ionizing radiation      | DALY      | 9.7E-08 | 1.7E-09 | 6.6E-08 | 2.5E-08           | 2.9E-10  | 1.6E-09        | 2.9E-09   |
| Ozone layer depletion   | DALY      | 1.1E-07 | 4.9E-10 | 1.5E-08 | 2E-10             | 8.2E-11  | 9.1E-08        | 8.2E-10   |
| Respiratory organics    | DALY      | 3E-07   | 4.9E-08 | 1.2E-07 | 1.6E-08           | 8.2E-09  | 2E-08          | 8.2E-08   |
| Aquatic ecotoxicity     | PDF*m2*yr | 0.15035 | 0.0049  | 0.12977 | 0.00194           | 0.00082  | 0.00478        | 0.00816   |
| Terrestrial ecotoxicity | PDF*m2*yr | 9.42109 | 0.64726 | 6.7234  | 0.30446           | 0.10788  | 0.55931        | 1.07877   |
| Terrestrial acid/nutri  | PDF*m2*yr | 12.2954 | 2.38064 | 4.06087 | 0.65901           | 0.39677  | 0.83042        | 3.96773   |
| Land occupation         | PDF*m2*yr | 1.34604 | 0.1191  | 0.86852 | 0.08977           | 0.01985  | 0.05029        | 0.19851   |

| Impact category        | Unit       | Total   | intake  | Lamela  | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|------------------------|------------|---------|---------|---------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| Aquatic acidification  | ?          | 0       | 0       | 0       | 0                 | 0        | 0              | 0         |
| Aquatic eutrophication | ?          | 0       | 0       | 0       | 0                 | 0        | 0              | 0         |
| Global warming         | kg CO2 eq  | 668.675 | 134.717 | 201.009 | 38.514            | 22.4529  | 47.4524        | 224.529   |
| Non-renewable energy   | MJ primary | 7935.91 | 1539.56 | 2501.1  | 508.517           | 256.593  | 564.214        | 2565.93   |
| Mineral extraction     | MJ primary | 55.6862 | 0.00961 | 55.599  | 0.00421           | 0.0016   | 0.0557         | 0.01602   |

Sumber : Hasil Running Simapro



Gambar 7. Grafik Normalization pada proses pengolahan air bersih

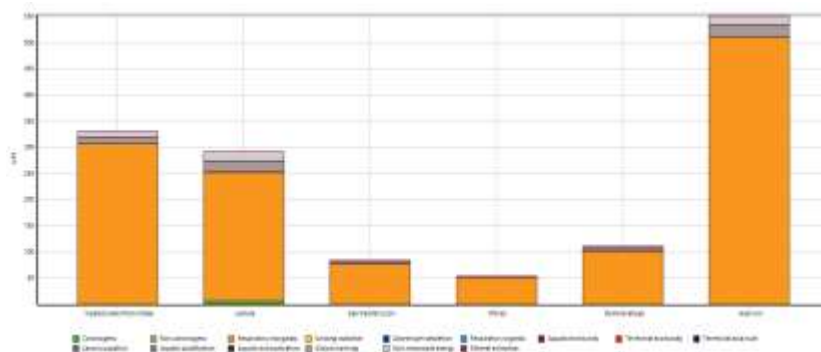
Berdasarkan Gambar 7 diatas, terdapat tiga dampak paling besar yang dihasilkan yaitu *respiratory inorganics*, *global warming*, dan *non – renewable energy*.

Tabel 3. Weighting Impact 2002+ pada proses pengolahan air bersih

| Impact category         | Unit | Total    | intake   | Lamela   | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|-------------------------|------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| Total                   | Pt   | 1.40     | 0.330684 | 0.264814 | 0.084397          | 0.055114 | 0.111128       | 0.55114   |
| Carcinogens             | Pt   | 0.0008   | 1.86E-05 | 0.000714 | 7.4E-06           | 3.11E-06 | 2.59E-05       | 3.11E-05  |
| Non-carcinogens         | Pt   | 0.006565 | 7.01E-05 | 0.006294 | 3E-05             | 1.17E-05 | 4.26E-05       | 0.000117  |
| Respiratory inorganics  | Pt   | 1.27     | 0.306621 | 0.219793 | 0.077041          | 0.051104 | 0.102432       | 0.511035  |
| Ionizing radiation      | Pt   | 1.37E-05 | 2.47E-07 | 9.26E-06 | 3.48E-06          | 4.11E-08 | 2.22E-07       | 4.11E-07  |
| Ozone layer depletion   | Pt   | 1.51E-05 | 6.97E-08 | 2.07E-06 | 2.76E-08          | 1.16E-08 | 1.28E-05       | 1.16E-07  |
| Respiratory organics    | Pt   | 4.17E-05 | 6.97E-06 | 1.69E-05 | 2.21E-06          | 1.16E-06 | 2.79E-06       | 1.16E-05  |
| Aquatic ecotoxicity     | Pt   | 1.1E-05  | 3.57E-07 | 9.47E-06 | 1.41E-07          | 5.96E-08 | 3.49E-07       | 5.96E-07  |
| Terrestrial ecotoxicity | Pt   | 0.000688 | 4.73E-05 | 0.000491 | 2.22E-05          | 7.88E-06 | 4.08E-05       | 7.88E-05  |
| Terrestrial acid/nutri  | Pt   | 0.000898 | 0.000174 | 0.000296 | 4.81E-05          | 2.9E-05  | 6.06E-05       | 0.00029   |
| Land occupation         | Pt   | 9.83E-05 | 8.69E-06 | 6.34E-05 | 6.55E-06          | 1.45E-06 | 3.67E-06       | 1.45E-05  |
| Aquatic acidification   | Pt   | 0        | 0        | 0        | 0                 | 0        | 0              | 0         |
| Aquatic eutrophication  | Pt   | 0        | 0        | 0        | 0                 | 0        | 0              | 0         |
| Global warming          | Pt   | 0.067536 | 0.013606 | 0.020302 | 0.00389           | 0.002268 | 0.004793       | 0.022677  |
| Non-renewable energy    | Pt   | 0.052218 | 0.01013  | 0.016457 | 0.003346          | 0.001688 | 0.003713       | 0.016884  |
| Mineral extraction      | Pt   | 0.000366 | 6.33E-08 | 0.000366 | 2.77E-08          | 1.05E-08 | 3.67E-07       | 1.05E-07  |

Sumber : Hasil Running Simapro

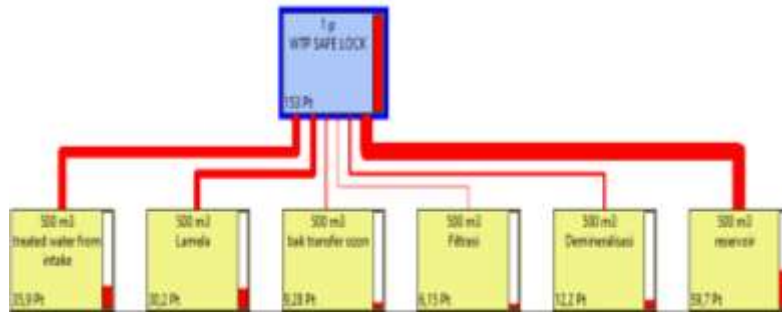
Berdasarkan Tabel 3 diatas menunjukkan bahwa dampak terbesar yaitu *respiratory inorganics* dengan nilai sebesar 1,27 Pt, lalu *global warming* sebesar 0,0675 Pt, dan *Non- renewable energy* sebesar 0,052 Pt.



Gambar 8. Grafik single score proses pengolahan air bersih

Berdasarkan Gambar 8 diatas menunjukkan bahwasannya unit yang menjadi penyumbang dampak terbesar ke lingkungan secara berturut – turut adalah reservoir, intake, lamella, demineralisasi, bak transfer ozon , dan filtrasi.

3.3.2 Metode ReCiPe 2016



Gambar 9. Network Result simapro menggunakan metode ReCiPe 2016  
Sumber : Hasil Running Simapro

Pada network result di atas menunjukkan dampak yang dihasilkan dari proses secara berturut – turut adalah reservoir 59,7 Pt, intake 35,9 Pt, lamella 30,2 Pt, demineralisasi 12,2 Pt, bak transfer ozon 9,28 Pt, dan filtrasi sebesar 6,15 Pt.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan yang menjelaskan dampak lingkungan dari proses pengolahan air bersih. Fase *Characterization* melibatkan penilaian besarnya materi yang berkontribusi terhadap kategori dampak berdasarkan data dalam tabel kontribusi dampak. Pada tahap ini, metode Recipe 2016 digunakan untuk mengkategorikan 15 dampak lingkungan yang dapat dilihat dalam Tabel 4. Selanjutnya, tahap *Damage Assessment* mengukur dampak harian dari setiap kategori yang dapat dilihat dalam Tabel 5. Setelah itu, Normalization dilakukan untuk menyamakan satuan dari setiap kategori dampak, dan teridentifikasi tiga dampak paling besar: *Fine Particulate matter*, *global warming*, *human health*, dan terakhir *human carcinogenic* yang dapat dilihat dari Gambar 10.

Tahap terakhir adalah *Weighting and single score*, di mana dampak dari setiap kategori dinilai dan dihitung dalam satu skor tunggal. Dampak terbesar ditemukan pada *Fine Particulate matter*, *global warming*, *human health*, dan terakhir *human carcinogenic*, dengan reservoir, intake, dan lamella menjadi penyumbang terbesar yang bisa dilihat dalam Tabel 6 dan Gambar 11.

Tabel 4. Characterization metode ReCiPe 2016 Pada Proses pengolahan Air bersih

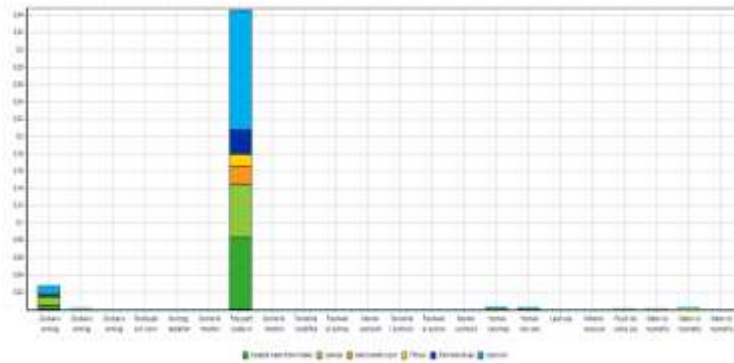
| Impact category                         | Unit       | Total   | intake  | Lamella | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|---|------------|---------|---------|---------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| Global warmings                         | DALY       | 0.00064 | 0.00013 | 0.0002  | 3.68664E-05       | 2.1E-05  | 4.56815E-05    | 0.00021   |
| Stratospheric ozone depletions          | DALY       | 1.6E-07 | 1.6E-08 | 4.5E-08 | 5.32536E-09       | 2.7E-09  | 6.17175E-08    | 2.7E-08   |
| Ionizing radiations                     | DALY       | 7.4E-09 | 1.4E-10 | 5E-09   | 1.85239E-09       | 2.4E-11  | 1.17296E-10    | 2.4E-10   |
| Ozone formation, Human healths          | DALY       | 1.7E-06 | 3.3E-07 | 5.4E-07 | 9.08206E-08       | 5.5E-08  | 1.15699E-07    | 5.5E-07   |
| Fine particulate matter formation       | DALY       | 0.0083  | 0.00199 | 0.00148 | 0.000502313       | 0.00033  | 0.000666381    | 0.00332   |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | species.yr | 2.4E-07 | 4.8E-08 | 7.8E-08 | 1.3041E-08        | 7.9E-09  | 1.66115E-08    | 7.9E-08   |
| Freshwater eutrophications              | species.yr | 2.6E-07 | 1.2E-07 | 1.5E-08 | 2.90059E-08       | 5.9E-08  | 6.17941E-09    | 2.9E-08   |
| Marine eutrophications                  | species.yr | 4.8E-12 | 4.8E-13 | 2.8E-12 | 1.64511E-13       | 8.1E-14  | 4.09226E-13    | 8.1E-13   |
| Terrestrial ecotoxicity                 | species.yr | 5.9E-09 | 5.7E-10 | 3.8E-09 | 1.71321E-10       | 9.6E-11  | 2.80132E-10    | 9.6E-10   |
| Freshwater ecotoxicity                  | species.yr | 3.4E-10 | 2.8E-11 | 2.4E-10 | 7.91828E-12       | 4.7E-12  | 1.08949E-11    | 4.7E-11   |
| Marine ecotoxicity                      | species.yr | 9.9E-11 | 8.7E-12 | 6.9E-11 | 2.4963E-12        | 1.4E-12  | 3.54327E-12    | 1.4E-11   |
| Human carcinogenic toxicitys            | DALY       | 6.6E-05 | 2.7E-06 | 5.7E-05 | 7.30496E-07       | 4.5E-07  | 1.06903E-06    | 4.5E-06   |
| Human non-carcinogenic toxicitys        | DALY       | 5.1E-05 | 4.5E-06 | 3.5E-05 | 1.30465E-06       | 7.5E-07  | 1.69477E-06    | 7.5E-06   |
| Land uses                               | species.yr | 1.6E-08 | 1.5E-09 | 9.3E-09 | 1.61326E-09       | 2.5E-10  | 6.40746E-10    | 2.5E-09   |
| Mineral resource scarcitys              | USD2013    | 1.05285 | 0.00025 | 1.05047 | 0.000743687       | 4.2E-05  | 0.000921337    | 0.00042   |
| Fossil resource scarcitys               | USD2013    | 23.0596 | 3.80977 | 9.39238 | 1.237957451       | 0.63496  | 1.634943481    | 6.34961   |
| Water consumptions                      | DALY       | 2.6E-05 | 4.2E-06 | 6E-06   | 3.69402E-06       | 3.6E-06  | 3.75416E-06    | 4.7E-06   |

Sumber : Hasil Running Simapro

**Tabel 5. Damage Assessment metode ReCiPe 2016 pada Proses pengolahan Air Bersih**

| Impact category                         | Unit       | Total   | intake  | Lamela  | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|---|------------|---------|---------|---------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| Global warmings                         | DALY       | 0.00064 | 0.00013 | 0.0002  | 3.68664E-05       | 2.1E-05  | 4.56815E-05    | 0.00021   |
| Stratospheric ozone depletions          | DALY       | 1.6E-07 | 1.6E-08 | 4.5E-08 | 5.32536E-09       | 2.7E-09  | 6.17175E-08    | 2.7E-08   |
| Ionizing radiations                     | DALY       | 7.4E-09 | 1.4E-10 | 5E-09   | 1.85239E-09       | 2.4E-11  | 1.17296E-10    | 2.4E-10   |
| Ozone formation, Human healths          | DALY       | 1.7E-06 | 3.3E-07 | 5.4E-07 | 9.08206E-08       | 5.5E-08  | 1.15699E-07    | 5.5E-07   |
| Fine particulate matter formation       | DALY       | 0.0083  | 0.00199 | 0.00148 | 0.000502313       | 0.00033  | 0.000666381    | 0.00332   |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystems | species.yr | 2.4E-07 | 4.8E-08 | 7.8E-08 | 1.3041E-08        | 7.9E-09  | 1.66115E-08    | 7.9E-08   |
| Freshwater eutrophications              | species.yr | 2.6E-07 | 1.2E-07 | 1.5E-08 | 2.90059E-08       | 5.9E-08  | 6.17941E-09    | 2.9E-08   |
| Marine eutrophications                  | species.yr | 4.8E-12 | 4.8E-13 | 2.8E-12 | 1.64511E-13       | 8.1E-14  | 4.09226E-13    | 8.1E-13   |
| Terrestrial ecotoxicity                 | species.yr | 5.9E-09 | 5.7E-10 | 3.8E-09 | 1.71321E-10       | 9.6E-11  | 2.80132E-10    | 9.6E-10   |
| Freshwater ecotoxicity                  | species.yr | 3.4E-10 | 2.8E-11 | 2.4E-10 | 7.91828E-12       | 4.7E-12  | 1.08949E-11    | 4.7E-11   |
| Marine ecotoxicity                      | species.yr | 9.9E-11 | 8.7E-12 | 6.9E-11 | 2.4963E-12        | 1.4E-12  | 3.54327E-12    | 1.4E-11   |
| Human carcinogenic toxicitys            | DALY       | 6.6E-05 | 2.7E-06 | 5.7E-05 | 7.30496E-07       | 4.5E-07  | 1.06903E-06    | 4.5E-06   |
| Human non-carcinogenic toxicitys        | DALY       | 5.1E-05 | 4.5E-06 | 3.5E-05 | 1.30465E-06       | 7.5E-07  | 1.69477E-06    | 7.5E-06   |
| Land uses                               | species.yr | 1.6E-08 | 1.5E-09 | 9.3E-09 | 1.61326E-09       | 2.5E-10  | 6.40746E-10    | 2.5E-09   |
| Mineral resource scarcitys              | USD2013    | 1.05285 | 0.00025 | 1.05047 | 0.000743687       | 4.2E-05  | 0.000921337    | 0.00042   |
| Fossil resource scarcitys               | USD2013    | 23.0596 | 3.80977 | 9.39238 | 1.237957451       | 0.63496  | 1.634943481    | 6.34961   |
| Water consumptions                      | DALY       | 2.6E-05 | 4.2E-06 | 6E-06   | 3.69402E-06       | 3.6E-06  | 3.75416E-06    | 4.7E-06   |

Sumber : Hasil Running Simapro



**Gambar 10. Normalization metode ReCiPe 2016 proses pengolahan air bersih**  
Sumber : Hasil running simapro

Berdasarkan gambar diatas, tiga dampak paling besar yang dihasilkan dari instalasi pengolahan air bersih menggunakan metode ReCiPe 2016 secara berturut-turut adalah *Fine Particulate matter*, *global warming*, dan terakhir *human carcinogenic* yang berasal dari seluruh proses instalasi pengolahan air bersih.

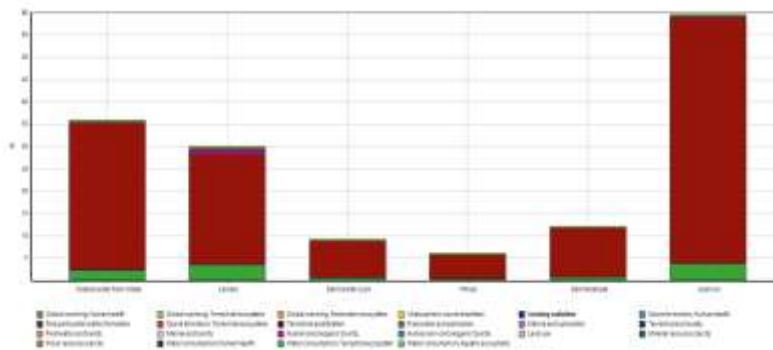
**Tabel 6. Tabel Weighting proses pengolahan air bersih menggunakan metode ReCiPe 2016**

| Impact category                          | Unit | Total   | intake  | Lamela  | bak transfer ozon | Filtrasi | Demineralisasi | reservoir |
|--|------|---------|---------|---------|-------------------|----------|----------------|-----------|
| <b>Total</b>                             | Pt   | 153.352 | 35.9067 | 30.1523 | 9.281053777       | 6.15265  | 12.18557837    | 59.6736   |
| Global warmings                          | Pt   | 10.7531 | 2.14114 | 3.30965 | 0.614931543       | 0.35686  | 0.76196774     | 3.56856   |
| Stratospheric ozone depletions           | Pt   | 0.00263 | 0.00027 | 0.00074 | 8.8827E-05        | 4.5E-05  | 0.001029449    | 0.00045   |
| Ionizing radiations                      | Pt   | 0.00012 | 2.4E-06 | 8.4E-05 | 3.08978E-05       | 4E-07    | 1.95649E-06    | 4E-06     |
| Ozone formation, Human healths           | Pt   | 0.02815 | 0.00554 | 0.00902 | 0.001514888       | 0.00092  | 0.001929865    | 0.00923   |
| Fine particulate matter formations       | Pt   | 138.406 | 33.2347 | 24.7469 | 8.378588951       | 5.53912  | 11.11522736    | 55.3912   |
| Ozone formation, Terrestrial ecosystemss | Pt   | 0.06555 | 0.01287 | 0.02108 | 0.003526275       | 0.00214  | 0.004491736    | 0.02144   |
| Freshwater eutrophications               | Pt   | 0.06913 | 0.03167 | 0.00414 | 0.007843187       | 0.01592  | 0.001670912    | 0.00789   |
| Marine eutrophications                   | Pt   | 1.3E-06 | 1.3E-07 | 7.7E-07 | 4.44837E-08       | 2.2E-08  | 1.10655E-07    | 2.2E-07   |
| Terrestrial ecotoxicity                  | Pt   | 0.00159 | 0.00015 | 0.00103 | 4.63252E-05       | 2.6E-05  | 7.57478E-05    | 0.00026   |
| Freshwater ecotoxicity                   | Pt   | 9.2E-05 | 7.7E-06 | 6.5E-05 | 2.1411E-06        | 1.3E-06  | 2.94598E-06    | 1.3E-05   |
| Marine ecotoxicity                       | Pt   | 2.7E-05 | 2.3E-06 | 1.9E-05 | 6.74998E-07       | 3.9E-07  | 9.58101E-07    | 3.9E-06   |
| Human carcinogenic toxicitys             | Pt   | 1.10379 | 0.04511 | 0.94595 | 0.012184672       | 0.00752  | 0.017831342    | 0.07519   |
| Human non-carcinogenic toxicitys         | Pt   | 0.84813 | 0.07457 | 0.58682 | 0.021761487       | 0.01243  | 0.028268755    | 0.12428   |
| Land uses                                | Pt   | 0.00427 | 0.00041 | 0.00251 | 0.000436226       | 6.8E-05  | 0.000173258    | 0.00068   |
| Mineral resource scarcitys               | Pt   | 0.00752 | 1.8E-06 | 0.0075  | 5.30992E-06       | 3E-07    | 6.57835E-06    | 3E-06     |
| Fossil resource scarcitys                | Pt   | 0.16465 | 0.0272  | 0.06706 | 0.008839016       | 0.00453  | 0.011673496    | 0.04534   |
| Water consumption, Human healths         | Pt   | 0.43199 | 0.06963 | 0.10091 | 0.06161625        | 0.05935  | 0.062619362    | 0.07786   |

Sumber : Hasil Running Simapro



Berdasarkan **Tabel 6** diatas, dapat dilihat bahwa dampak tertinggi yang dihasilkan adalah *fine particulate matter* 138 Pt, lalu *global warming* 10,75 Pt dan *Human Carcinogenic* sebesar 1,10 Pt.



**Gambar 11.** Single Score proses pengolahan air bersih metode ReCiPe  
Sumber : Hasil running simapro

Berdasarkan analisa grafik diatas bahwasannya unit reservoir menyumbang dampak terbesar yang diikuti oleh intake, lamella, demineralisasi, bak transfer ozon, dan filtrasi.

3.4 Perbandingan hasil LCIA antara Metode Impact 2002+ dan Metode ReCiPe 2016

Kedua metode LCIA menunjukkan kesamaan bahwa tiga unit penyumbang dampak terbesar berasal dari Reservoir, Intake, dan Lamella, dilihat dari *single score*. Namun, terdapat perbedaan dampak yang dihasilkan antara metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik masing-masing metode dalam menghasilkan dampak yang berbeda. Oleh karena itu, interpretasi difokuskan pada penilaian endpoint, dengan hasil endpoint dari metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016. Kedua metode menunjukkan dampak utama adalah *human health*, *ecosystem quality*, dan *resources* dengan nilai pada metode Impact 2002+ masing-masing 1,28 Pt, 0,00169 Pt, dan 0,0526 Pt. Sementara itu, metode ReCiPe 2016 menunjukkan nilai masing-masing 138 Pt, 10,75 Pt, dan 1,10 Pt..

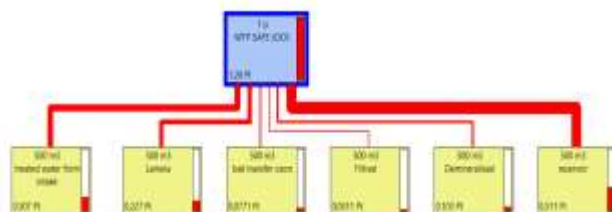
**Tabel 7.** Hasil endpoint dan endpoint dari metode Impact 2002+ dan ReCiPe 2016

| endpoint metode IMPACT 2002 + |      |         | endpoint metode ReCiPe 2016 |      |       |
|-------------------------------|------|---------|-----------------------------|------|-------|
| Damage Category               | Unit | Hasil   | Damage Category             | Unit | Hasil |
| Human Health                  | Pt   | 1,28    | Human Health                | Pt   | 152   |
| Ecosystem Quality             | Pt   | 0,00169 | Ecosystem                   | Pt   | 0,57  |
| Resources                     | Pt   | 0,0526  | Resources                   | Pt   | 0,172 |

3.5 Interpretasi

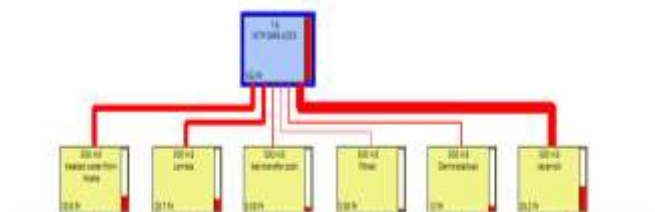
3.5.1 Human Health

Dampak terhadap kesehatan manusia, dikenal sebagai *Human Health*, disebabkan oleh berbagai faktor seperti respiratory inorganics yang dominan dalam metode Impact 2002+ serta *fine particulate matter* dan pemanasan global dalam metode ReCiPe 2016. Faktor utama yang berkontribusi terhadap dampak kesehatan manusia adalah penggunaan bahan kimia seperti koagulan, ozon, larutan regenerasi dan kaporit, serta penggunaan listrik dalam proses pengolahan air bersih. Paparan ozon dan kaporit dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, sementara konsumsi listrik yang tinggi berkontribusi pada pemanasan global melalui produksi listrik yang masih menggunakan bahan bakar fosil di Indonesia. Oleh karena itu, pengelolaan bahan kimia dan penggunaan energi yang lebih ramah lingkungan menjadi penting dalam meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia.



**Gambar 12.** Network result human health metode Impact 2002+

Sumber : Hasil running simapro

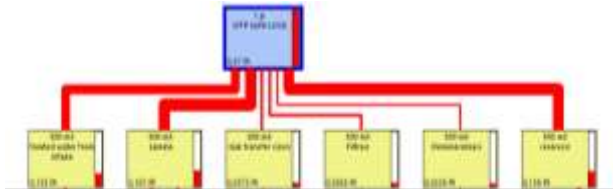


**Gambar 13.** Network Result human health metode ReCiPe 2016

Sumber : Hasil running simapro

### 3.5.2 Ecosystem quality

Ecosystem Quality, yang merupakan dampak terkait kualitas ekosistem, mencakup penurunan keanekaragaman dan kerusakan ekosistem dari proses pengolahan air bersih. Dampak ini berasal dari mid point seperti terrestrial acid nutrification, terrestrial ecotoxicity, dan land use. Metode ReCiPe 2016 menunjukkan dampak dikarenakan eksploitasi bahan baku air sungai yang berhubungan dengan land use, dan lumpur lamella yang mengandung zat kimia. Sementara pada metode Impact 2002+, dampak tersebut disebabkan oleh aquatic dan terrestrial ecotoxicity serta terrestrial acid/nutri. Hasil dari kedua metode menunjukkan ekosistem yang rusak akibat proses pengolahan air bersih, dengan nilai masing-masing 1,61 Pt dan 0,00169 Pt.



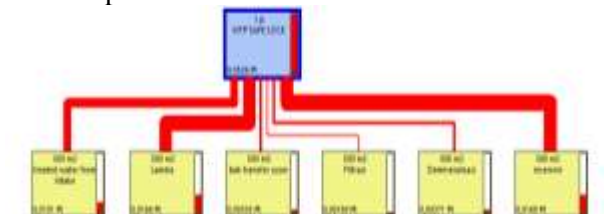
**Gambar 14.** Network Result dampak ecosystem quality metode ReCiPe 2016



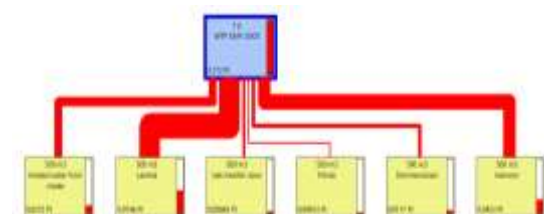
**Gambar 15.** Network Result ecosystem quality metode Impact 2002+

### 3.5.3 Resources

Dampak terhadap sumber daya alam, disebabkan oleh ekstraksi bahan baku dan bahan pendukung, tercermin dalam hasil network dari kedua metode simulasi software SimaPro. Metode Impact 2002+ menunjukkan dampak resources sebesar 0,0526 Pt, disebabkan oleh non-renewable energy dan mineral extraction, terutama karena penggunaan listrik yang tinggi dan penggunaan bahan kimia seperti PAC, kaporit, dan ozon. Sementara itu, metode ReCiPe 2016 menghasilkan dampak sebesar 0,172 Pt, terutama dari fossil resources scarcity dan mineral resource scarcity, dengan unit lamella menjadi penyumbang terbesar karena penggunaan batu bara dan ekstraksi mineral aluminium untuk PAC. Perbedaan hasil antara kedua metode disebabkan oleh perbedaan dampak midpoint dan unit penilaian, seperti dampak global warming yang mempengaruhi dampak endpoint yang berbeda, sehingga menghasilkan nilai dampak yang berbeda pula.



**Gambar 16.** Network Result Resources metode Impact 2002 +



**Gambar 17.** Network Result Resource metode ReCiPe 2016

### 3,6 Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*, ditemukan bahwa unit reservoir menjadi hotspot pada dampak *Human Health*, sementara pada dampak *Ecosystem Quality* dan *Resources*, hotspot terletak pada unit pengolahan lamella. Rekomendasi program perbaikan bertujuan untuk mengurangi penggunaan sumber daya, energi, dampak lingkungan, timbulan limbah, serta memanfaatkan sumber daya yang dapat digunakan kembali. Rekomendasi pertama melibatkan pengurangan dan substitusi bahan kimia serta efisiensi penggunaan listrik. Substitusi koagulan *Poly Aluminium Chloride (PAC)* dengan Aluminium Sulfat (Alum) atau tawas serta pengurangan penggunaan kaporit tablet dan bahan kimia lainnya seperti larutan regenerasi HCl dan NaOH berhasil menurunkan dampak *ecosystem quality* dan *resources* pada kedua metode.

Rekomendasi kedua menekankan efisiensi peralatan untuk mengurangi penggunaan listrik dengan memanfaatkan gravitasi, yang menghasilkan penurunan dampak yang signifikan terutama pada dampak *Human Health*. Sedangkan rekomendasi ketiga, terkait dengan green building, membutuhkan lebih banyak penelitian terkait dampaknya terhadap proses pengolahan air bersih, tetapi memiliki potensi untuk mengurangi dampak terutama pada dampak *Human Health* yang disebabkan oleh *respiratory inorganics* dan *fine particulate matter*.

#### 4. Kesimpulan

Dalam penelitian *Life Cycle Assessment* ini, fokus pada proses produksi air bersih menyoroti dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan listrik dan bahan kimia seperti poly aluminium chloride, ozon, resin kation dan anion, NaOH, dan HCl. Hasil analisis dengan metode Impact 2002 + dan ReCiPe 2016 menunjukkan dampak yang signifikan terhadap kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan ketersediaan sumber daya. Rekomendasi perbaikan termasuk substitusi bahan kimia, pengurangan penggunaan listrik, dan penerapan praktik ramah lingkungan seperti bangunan hijau di sekitar area produksi. Langkah-langkah ini diharapkan dapat mengurangi dampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia yang dihasilkan oleh proses produksi air bersih.

#### 5. Referensi

- [1] F. Ramadhan, L. Siami, and Winarni, "Optimalisasi Instalasi Pengolahan Air Minum Solear, PDAM Tirta Kerta Raharja -Kabupaten Tangerang," *Semin. Nas. Pembang. Wil. Dan Kota Berkelanjutan*, pp. 132–141, 2019.
- [2] R. G. E. Bhaskoro and T. Ramadhan, "Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Karangpilang I Pdam Surya Sembada," vol. 15, no. 2, pp. 62–68, 2018.
- [3] F. Hanun, S. Jannah, R. A. Kusumadewi, and R. Ratnaningsih, "Selection Of Design Criteria For The Coagulation , Flocculation And Sedimentation Unit In The Klapanunggal Drinking Water Treatment Plant," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 01, pp. 3500–3505, 2020.
- [4] C. Abdi, R. M. Khair, and Siti Aisyah, "Pengaruh Ozonisasi Terhadap Penurunan Intensitas Warna Dan Kadar Besi ( Fe ) Pada Air Gambut," *Jukung J. Tek. Lingkung.*, vol. 3, no. 1, pp. 21–29, 2017.
- [5] I. copyright Office, "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework," *Int. Stand. ISO 14040*, vol. 2006, 2006.
- [6] Hermawan, P. F. Marzuki, M. Abduh, and R. Driejana, "Peran Life Cycle Analysis (LCA) Pada Material Konstruksi Dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbon Dioksida Pada Efek Gas Rumah Kaca," *Konf. Nas. Tek. Sipil 7 (KoNTekS 7), Univ. Sebel. Maret - Surakarta, 24-26 Oktober 2013*, vol. 7, no. KoNTekS 7, pp. 47–52, 2013.
- [7] Damiri and I. B. Santoso, "Kajian Dampak Proses Produksi Tapioka Terhadap Lingkungan Dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA)," *J. DARMA AGUNG*, vol. 30, no. 2, pp. 1177–1197, 2022.
- [8] N. Deborah and M. Faiz, "Penilaian Manajemen Rantai Pasok Sustainable Packaging : Studi Literatur," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 12, no. 2, pp. 17–22, 2023.
- [9] M. Starostka-patyk, "New products design decision making support by SimaPro software on the base of defective products management," *Procedia - Procedia Comput. Sci.*, vol. 65, no. Iccmit, pp. 1066–1074, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.09.051.
- [10] H. Santoso and Ronald, "Alat Potong Kuku Dengan Limbah Kayu," *J@ti Undip*, vol. VII, no. 1, pp. 19–26, 2012.
- [11] G. A. Nurbaiti, T. Agung, and A. Ulfah, "Life Cycle Assessment ( LCA ) Sebagai Metode Kajian Dampak Lingkungan Proses Pengolahan Air Bersih Di Instalasi Pengolahan Air (IPA) Siwalanpanji," *EnviroUS*, vol. 2, no. 1, pp. 21–27, 2022.
- [12] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, pp. 138–147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [13] Menteri Kesehatan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017," 2017.
- [14] D. M. Allami, M. T. Sorour, M. Moustafa, A. Elreedy, and M. Fayed, "Life Cycle Assessment of a Domestic Wastewater Treatment Plant Simulated with Alternative Operational Designs," *J. Sustain.*, vol. 15, pp. 1–16, 2023.
- [15] D. Lemos, A. Cláudia, X. Gabarrell, and L. Arroja, "Environmental assessment of an urban water system," *J. Clean. Prod.*, vol. xxx, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.029.