

# Mengevaluasi Dampak Lingkungan Proses Destruksi Basah dan Destruksi Kering Dalam Kimia Analitik Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment*

Malinda Mayanti<sup>1\*</sup>, Rosi Herlianti<sup>2</sup>, Tito Lukito<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Department of Industrial Engineering, Mercu Buana University, Jakarta 11650, Indonesia

Email korespondensi penulis: [malindamayanti@gmail.com](mailto:malindamayanti@gmail.com)

## Abstrak

Isu lingkungan hidup menjadi hal yang sering dibicarakan di kancah global. Laboratorium menjadi sumber penghasil limbah B3 karena laboratorium umumnya menggunakan bahan-bahan kimia yang berbahaya jika dibuang langsung ke lingkungan. Selama beberapa tahun terakhir, kimia “hijau” telah dikembangkan pada praktik berkelanjutan di laboratorium dan industri untuk membatasi penggunaan energi, pelarut, dan bahan habis pakai. Beberapa alat penilaian “kehijauan” telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir, namun tidak memberikan perkiraan kuantitatif mengenai dampak lingkungan dari kimia analitik. Penilaian siklus hidup atau *Life Cycle Assessment* dapat melengkapi alat-alat ini karena merupakan metodologi holistik untuk menilai dampak lingkungan dari berbagai tahapan metode analitik, khususnya langkah preparasi sampel. Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan prosedur pengujian destruksi basah atau destruksi kering yang menghasilkan dampak lingkungan lebih kecil secara keseluruhan menggunakan aplikasi simaPro 9.6.0.1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prosedur pengujian destruksi kering menimbulkan dampak yang lebih kecil dibandingkan prosedur pengujian destruksi basah di seluruh kategori dimana nilai persentasi dampak kerusakan pada kesehatan manusia sebesar 47%, kualitas ekosistem sebesar 48% dan sumber daya sebesar 49%. Berdasarkan nilai dampak kerusakan *global warming potential*, prosedur pengujian destruksi basah sebesar 7,54, hasil ini lebih besar dibandingkan dengan nilai prosedur pengujian destruksi kering sebesar 5,77.

**Kata Kunci:** Dampak Lingkungan, GWP, LCA, Pengujian Laboratorium, Kimia Analitik

## Abstract

*Environmental issues are often discussed in the global arena. Laboratories are a source of hazardous waste generation because laboratories generally use chemicals that are harmful if disposed of directly into the environment. Over the past few years, "green" chemistry has been developed on sustainable practices in laboratories and industries to limit the use of energy, solvents, and consumables. Several "green" assessment tools have been developed in recent years, but they do not provide quantitative estimates of the environmental impact of analytical chemistry. Life cycle assessment can complement these tools as it is a holistic methodology for assessing the environmental impact of different stages of analytical methods, particularly the sample preparation step. The purpose of this study was to compare the wet deconstruction or dry deconstruction testing procedure which resulted in a smaller overall environmental impact using the simaPro 9.6.0.1 application. The results showed that the dry destruction testing procedure caused less impact than the wet destruction testing procedure in all categories where the percentage value of damage to human health was 47%, ecosystem quality was 48% and resources were 49%. Based on the value of global warming potential damage, the wet destruction test procedure is 7.54, this result is greater than the value of the dry destruction test procedure of 5.77.*

**Keywords:** Environmental Impact, GWP, LCA, Laboratory Testing, Analytical Chemistry

## 1. Pendahuluan

Isu lingkungan hidup menjadi hal yang sering dibicarakan di kancah global paska terjadinya Perang Dingin. Berbagai negara akhirnya menyadari betapa pentingnya lingkungan bagi keberlangsungan hidup generasi yang akan datang (Elvania, 2023). Permasalahan lingkungan semakin banyak dengan

seiring bertambahnya jumlah penduduk dan industri. Permasalahan lingkungan ini terjadi dikarenakan banyaknya pencemaran lingkungan yang akan menyebabkan dampak yang besar (Utami, 2019).

Industri makanan dan minuman merupakan salah satu sektor strategis dan memiliki peran penting dalam menopang pertumbuhan ekonomi Indonesia (Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2019). Hal ini dibuktikan dengan kontribusi sektor tersebut terhadap PDB industri nonmigas sebesar 39,10 persen dan menyumbang 6,55 persen terhadap PDB nasional pada tahun 2023 (Badan Pusat Statistik, 2024). Namun, bersama kontribusi ekonominya, industri ini masih meninggalkan masalah terkait keberlanjutan lingkungan dan pengelolaan limbah (Martin-Rios et al., 2022). Proses produksi dalam industri makanan sering kali diiringi oleh limbah yang dihasilkan baik dari limbah sisa produksi maupun limbah dari proses pengujian laboratorium. Menurut Nur Hidayah (2023) limbah adalah buangan yang dihasilkan dari suatu proses produksi baik industri maupun domestik yang kehadirannya pada waktu dan tempat tertentu tidak dikehendaki lingkungan karena tidak ekonomis.

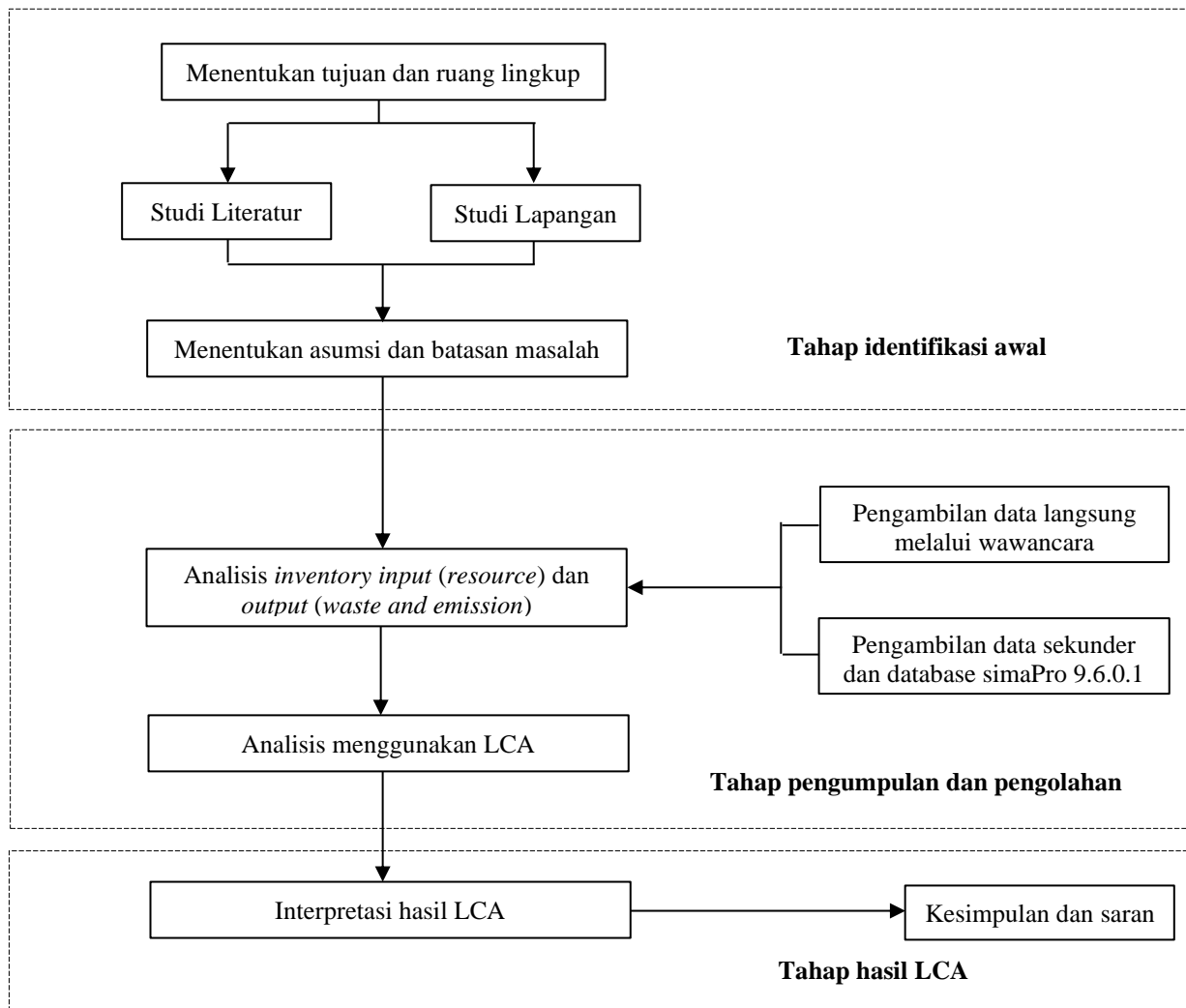
Laboratorium menjadi sumber penghasil limbah B3 karena laboratorium umumnya menggunakan bahan-bahan kimia yang berbahaya jika dibuang langsung ke lingkungan (Ozben & Fragão-Marques, 2023). Artinya limbah laboratorium meskipun volumenya masih relatif kecil dibandingkan dengan limbah dari kegiatan industri, namun memiliki dampak kerusakan yang relatif lebih berbahaya. Menurut Peraturan Menteri LHK no 23 Tahun 2020, laboratorium harus memiliki kebijakan dan prosedur yang terdokumentasi untuk pengelolaan limbah laboratorium. Selain itu, laboratorium harus menerapkan program minimalisasi dampak kerusakan lingkungan mulai dari penerimaan sampel uji, preparasi sampel, dan pengukuran. Preparasi sampel merupakan langkah penting dalam kimia analitik. Selama beberapa tahun terakhir, kimia “hijau” telah dikembangkan praktik berkelanjutan di laboratorium dan industri untuk membatasi penggunaan energi, pelarut, dan bahan habis pakai (Raccary et al., 2022); (Zimmerman et al., 2020); (Ganesh et al., 2021). Kimia analitik ramah lingkungan atau *Green Analytical Chemistry* (GAC) telah muncul sebagai pendekatan baru untuk mengurangi dampak buruk aktivitas analitik terhadap lingkungan, keselamatan manusia, dan kesehatan manusia (Nowak, 2023); (Olivieri & Escandar, 2019). Dari perspektif GAC, menilai kelestarian lingkungan dari berbagai prosedur analitik sangatlah penting (Fertier et al., 2020). Namun, karena beragamnya sifat prosedur analitik dan persyaratan spesifiknya, penerapan universal dari 12 prinsip GAC akan terbatas (Tobiszewski, 2016).

Beberapa alat penilaian “kehijauan” telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir, namun tidak memberikan perkiraan kuantitatif mengenai dampak lingkungan dari kimia analitik (Loubet et al., 2022); (Sajid & Plotka Wasyka, 2022). Penilaian siklus hidup atau *Life Cycle Assessment* (LCA) dapat melengkapi alat-alat ini karena merupakan metodologi holistik untuk menilai dampak lingkungan dari berbagai tahapan metode analitik, khususnya langkah preparasi sampel. LCA adalah metode evaluasi menyeluruh yang digunakan untuk memperkirakan potensi konsekuensi lingkungan dan penggunaan sumber daya yang terkait dengan siklus hidup produk secara menyeluruh (Behrooznia et al., 2020); (Brilliantina et al., 2023). Siklus hidup ini mencakup pengadaan bahan baku, fase bahan baku, fase produksi dan pengolahan, serta pemanfaatan produk, dan akhirnya pembuangan atau daur ulang (Liu et al., 2023). Sebagai cara untuk memperkenalkan penerapan LCA pada kimia analitik, penelitian ini berfokus pada ruang lingkup *cradle to gate*, dimana menilai dampak lingkungan dari penerimaan sampel uji hingga penerbitan sertifikat hasil uji pada pengujian makanan dengan parameter cemaran logam (Ben-Alon et al., 2021). Tujuan penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan dampak kerusakan lingkungan yang dihasilkan dari pengujian cemaran logam dengan dua prosedur pengujian destruksi yaitu dekstrusi basah dan dekstruksi kering. Pendekatan LCA ini dipilih untuk mengetahui angka dan data valid mengenai emisi dan limbah yang dihasilkan selama proses pengujian logam sampai penerbitan sertifikat hasil uji dengan kategori dampak yang sudah ditentukan.

## 2. Metodologi

Metodologi LCA ditentukan oleh serangkaian standar dari *International Organization for Standardization* (ISO) yaitu ISO 14040; ISO 14044; dan ISO 14067 yang menawarkan kerangka kerja, dan peraturan yang sesuai, untuk penentuan jejak karbon dari produk (Terlouw et al., 2021);

(Ahangarnokolaei et al., 2021). Berdasarkan ISO 14040 (2009), pelaksanaan LCA terdiri dari beberapa tahapan yang akan dijelaskan pada Gambar 1, sebagai berikut:



Gambar 1. Langkah Penelitian

### 3. Analisis Hasil dan Pembahasan

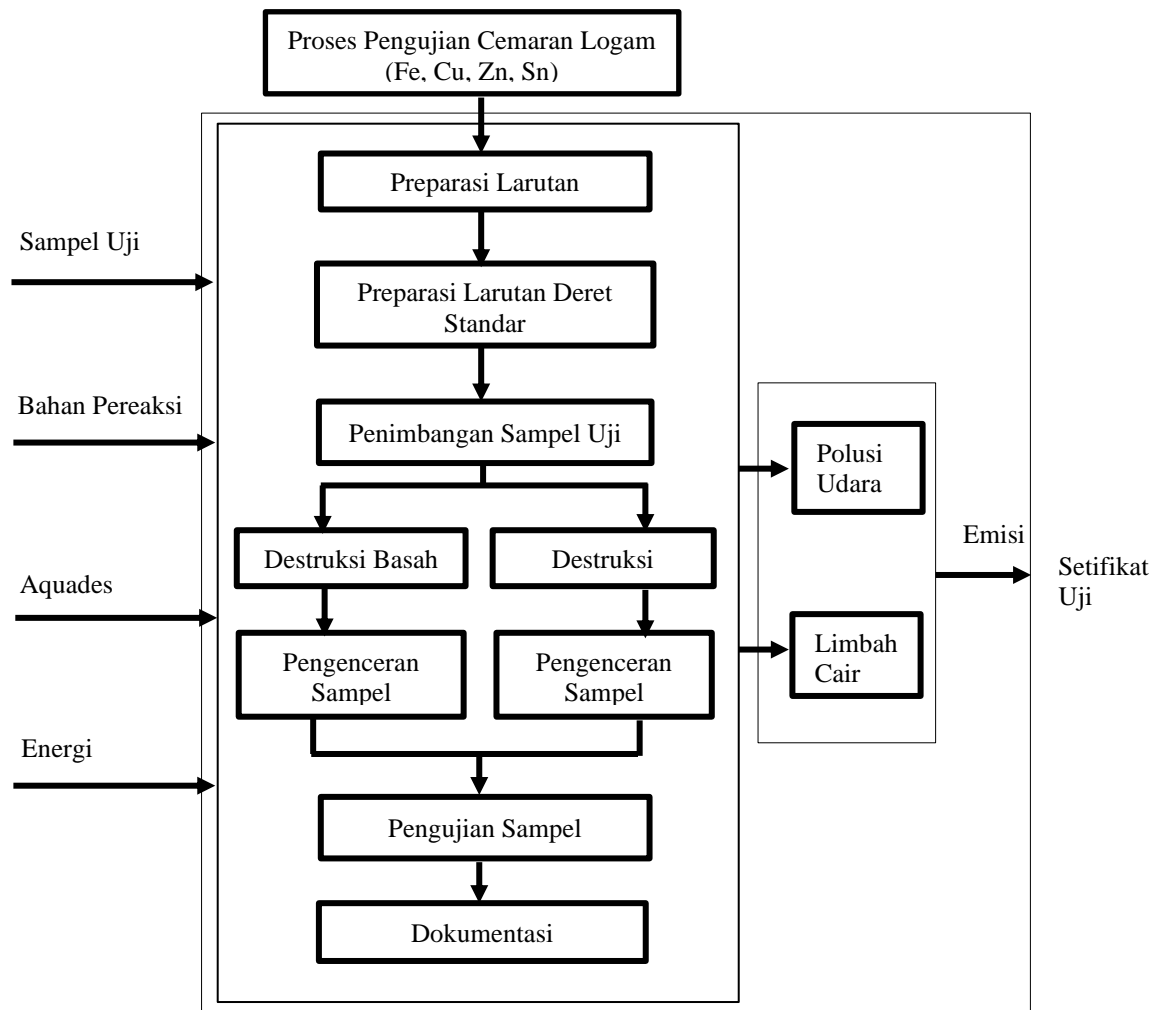
#### 3.1. Analisis Hasil

##### 1. Tujuan dan Ruang Lingkup Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan prosedur pengujian destruksi basah atau destruksi kering yang menghasilkan dampak lingkungan lebih kecil secara keseluruhan menggunakan aplikasi simaPro 9.6.0.1. Penelitian ini berfokus pada ruang lingkup *cradle to gate*, dimana menilai dampak lingkungan dari penerimaan sampel uji hingga penerbitan sertifikat hasil uji pada pengujian makanan dengan parameter cemaran logam. Prosedur pengujian cemaran logam pada makanan mengacu pada SNI 01-2896-1998 (1998) dan ruang lingkup dari penelitian ini ditampilkan pada Gambar 2. Terdapat beberapa batasan sistem pada penelitian ini, diantaranya:

- Bahan habis pakai laboratorium dengan akhir masa pakai dan proses produksinya.
- Bahan kimia dengan akhir masa pakai dan proses produksinya.
- Penggunaan listrik.
- Media pendukung dengan masa pakai dan produksi peralatan laboratorium yang diabaikan karena LCA biasanya tidak menyertakan infrastruktur dalam batasan sistem.
- Penggunaan sumber daya dan emisi yang terkait dengan proses pengujian di ambil dari database *Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification-unit*.

- Konteks data yang digunakan dianggap paling akurat pada situasi indonesia, ketika data indonesia tidak tersedia maka dipilih data global.



Gambar 2. Ruang Lingkup Kajian LCA Pengujian Cemar Logam

## 2. Life Cycle Inventory

Analisis inventori dilakukan dengan cara memasukkan data *input* (raw material, energy, auxiliary materials) serta *output* (product, waste, emissions) untuk menentukan pemakaian bahan apa saja yang menghasilkan dampak bagi lingkungan. Berikut ini penjelasan terkait prosedur pengujian cemaran logam pada makanan yang mengacu pada SNI 01-2896-1998:

- Prosedur pengujian destruksi basah: Buat larutan deret standar Fe, Cu, Zn dan Sn. Timbang 5 g sampel uji dan masukkan kedalam erlenmeyer 250ml, hidrolisis sampel uji dengan 25 ml larutan HCl 8,4N, kemudian panaskan sampai mendidih dan diamkan selama 5 menit. Dinginkan larutan dan pindahkan kedalam labu 200 ml, encerkan dengan aquades hingga tanda batas dan saring larutan menggunakan kertas saring Whatman no 1. Pengukuran dengan alat Atomic Absorption spectrophotometer.
- Prosedur pengujian destruksi kering: Buat larutan deret standar Fe, Cu, Zn dan Sn. Timbang 5 g sampel uji, masukkan ke dalam cawan porselen, tambahkan 10 ml *magnesium nitrat* dalam *ethanol*. Uapkan di atas penangas listrik hingga *ethanol* menguap. Pindahkan cawan porselen kedalam tanur, abukan selama 24 jam pada suhu 500°C. Dinginkan dan tambahkan 5 ml larutan HCl : HNO<sub>3</sub> (1:1). Panaskan diatas penangas hingga abu larut sempurna. Pindahkan ke dalam labu ukur 100 ml, encerkan dengan aquades hingga tanda batas dan saring larutan menggunakan kertas saring Whatman no 540. Pengukuran dengan alat Atomic Absorption Spectrophotometer.

Besaran *input* yang digunakan untuk masing – masing proses ditampilkan pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 dan besaran *output* yang dihasilkan dalam proses pengujian cemaran logam ditampilakn pada Tabel 4.

**Tabel 1.** Input pengujian cemaran logam dengan destruksi basah

Input	Satuan	Jumlah	Proses Ecoinvent
Aquades	L	0,770	<i>Water, cooling, unspecified natural origin, ID</i>
HCl p.a	L	1,750	<i>Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state (ROW)</i>
Larutan Standar Fe	L	0,410	<i>Iron ore concentrate (GLO)</i>
Larutan Standar Cu	L	0,410	<i>Copper concentrate, sulfide ore (GLO)</i>
Larutan Standar Sn	L	0,390	<i>Chemical, inorganic (GLO)</i>
Larutan Standar Zn	L	0,410	<i>Zinc concentrate (GLO)</i>
Sampel	Kg	0,005	<i>Butter, from cow milk, fresh, unripened (GLO)</i>
Gas Acetylene	L	0,200	<i>Acetylene, liquid (ROW)</i>
Compressed Air	L	0,200	<i>Compressed Air (GLO)</i>
Gas Nitrogen	L	0,200	<i>Nitrogen, liquid (ROW)</i>
Gas Argon	L	0,200	<i>Argon, crude, liquid (GLO)</i>
Listrik	KWh	1816,700	<i>Listrik instrument, ID</i>
Tissue	Kg	0,060	<i>Tissue paper (GLO)</i>

**Tabel 2.** Input pengujian cemaran logam dengan destruksi kering

Input	Satuan	Jumlah	Proses Ecoinvent
Aquades	L	0,300	<i>Water, cooling, unspecified natural origin, ID</i>
Magnesium Nitrat	Kg	0,005	<i>Magnesium sulfate (GLO)</i>
HCl p.a	L	0,010	<i>Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state (ROW)</i>
HNO3 p.a	L	0,010	<i>Nitric acid, without water, in 50% solution state (ROW)</i>
Ethanol P.a	L	0,100	<i>Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene (ROW)</i>
Larutan Standar Fe	L	0,410	<i>Iron ore concentrate (GLO)</i>
Larutan Standar Cu	L	0,410	<i>Copper concentrate, sulfide ore (GLO)</i>
Larutan Standar Sn	L	0,390	<i>Chemical, inorganic (GLO)</i>
Larutan Standar Zn	L	0,410	<i>Zinc concentrate (GLO)</i>
Sampel	Kg	0,005	<i>Butter, from cow milk, fresh, unripened (GLO)</i>
Gas Acetylene	L	0,200	<i>Acetylene, liquid (ROW)</i>
Compressed Air	L	0,200	<i>Compressed Air (GLO)</i>
Gas Nitrogen	L	0,200	<i>Nitrogen, liquid (ROW)</i>
Gas Argon	L	0,200	<i>Argon, crude, liquid (GLO)</i>
Listrik	KWh	14816,700	<i>Listrik instrument, ID</i>
Tissue	Kg	0,060	<i>Tissue paper (GLO)</i>

**Tabel 3.** Input Dokumentasi Hasil Pengujian

Input	Satuan	Jumlah	Proses Ecoinvent
Listrik	KWh	250	<i>Listrik instrument, ID</i>
Kertas	Kg	0,75	<i>Printed paper (GLO)</i>
Tinta	Kg	0,0093	<i>Tinta (GLO)</i>
Amplop	Kg	0,05	<i>Kraft paper (ROW)</i>

**Tabel 4.** Output pengujian cemaran logam

Output	Satuan	Jumlah	Proses Ecoinvent
Sertifikat Hasil Uji	Kg	0,75	Waste graphical paper (ROW)
Limbah Cair	L	2,94	Wastewater from wafer fabrication (ROW)
Tissue Bekas	Kg	0,12	Waste graphical paper (ROW)
Kertas Saring Bekas	Kg	0,352	Waste graphical paper (ROW)
Botol Sampel	Kg	0,052	PET (waste treatment) (GLO)
Masker	Kg	0,4	PP (waste treatment) (GLO)
Sarung Tangan	Kg	0,424	Waste polyvinylchloride (GLO)

### 3. Life Cycle Impact Assessment

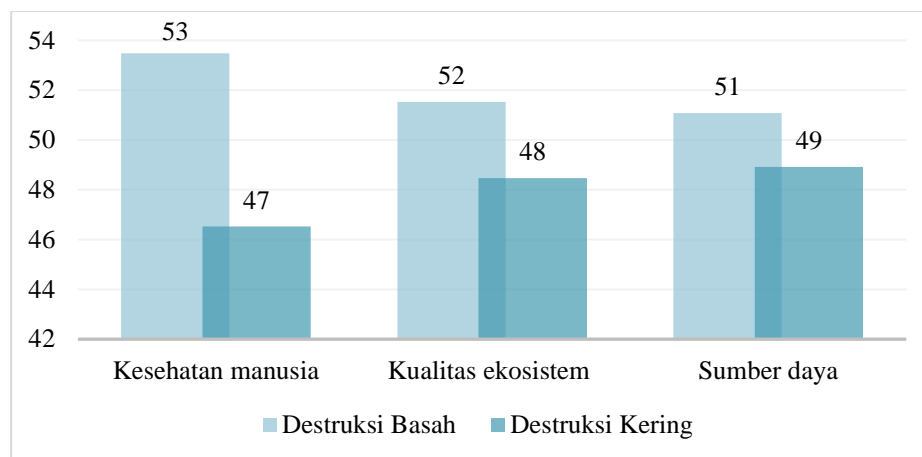
Analisis dampak dilakukan dengan menghitung emisi dari produksi bahan-bahan yang digunakan sebagai input serta emisi yang dihasilkan dari proses pengujian cemaran logam. Dampak lingkungan dikarakterisasi menggunakan *Eco-Indicator 99(H) V2.10*. Metode ini dipilih sebagai salah satu metode yang mengacu pada pengaturan pembobotan yang termasuk dalam perspektif hirarki dimana normalisasi dan pembobotan dilakukan pada tingkat kategori kerusakan (tingkat titik akhir dalam terminologi ISO). Terdapat 3 kategori dampak kerusakan, diantaranya sebagai berikut:

- Kesehatan manusia
- Kualitas ekosistem
- Sumber daya

Hasil dari penilaian LCA adalah *life cycle impact assessment* dari proses pengujian cemaran logam untuk mendapatkan 1 sertifikat hasil uji. Kajian ini menghitung dampak dari *cradle to gate*, yang menghitung dampak lingkungan mulai dari penerimaan sampel uji sampai dengan dihasilkan sertifikat hasil uji. Hasil pengukuran per masing-masing proses ditunjukkan oleh Tabel 5 dan Gambar 3.

**Tabel 5.** Hasil Pengukuran LCA Terhadap Kategori Dampak Kerusakan

Kategori Dampak	Unit Proses		Satuan
	Destruksi Basah	Destruksi Kering	
Ekotoksitas	35,4	33,2	PAF*m2yr
Penggunaan Lahan	0,993	0,967	PAF*m2yr
Bahan Bakar Fosil	0,24	0,18	MJ surplus
Mineral	5,66	5,47	MJ surplus
Pengasaman	0,172	0,144	PAF*m2yr
Penguapan Organik	9,90E-09	8,02E-09	DALY
Penguapan Anorganik	1,03E-05	8,02E-09	DALY
Karsinogenik	1,30E-05	1,19E-05	DALY
Radiasi	1,16E-08	9,05E-09	DALY
Lapisan Ozon	3,00E-10	7,75E-11	DALY
Global Warming Potential	7,54	5,77	Kg CO <sub>2</sub> eq



**Gambar 3.** Diagram Hasil pengukuran LCA Terhadap Dampak Kerusakan

Berdasarkan Tabel 5 terdapat beberapa satuan unit untuk menentukan besaran yang diakibatkan oleh kerusakan dampak lingkungan yaitu  $PAF \cdot m^2 yr$ , DALY,  $Kg CO_2 eq$  dan MJ surplus.  $PAF \cdot m^2 yr$  adalah bagian dari ekosistem yang berpotensi hilang per  $m^2$  per tahun. DALY adalah ukuran yang diterima manusia dari keseluruhan beban penyakit, ditanyakan sebagai jumlah tahun yang hilang akibat gangguan kesehatan cacat atau kematian dini.  $Kg CO_2 eq$  adalah satuan unit dari kategori karakteristik dampak global warming dan efek yang ditimbulkan dari perubahan iklim secara global. MJ surplus adalah jumlah energi dasar yang dibutuhkan untuk mengekstraksi suatu sumber daya alam.

#### 4. Interpretasi

Interpretasi merupakan pandangan terhadap hasil dari penilaian potensi dampak lingkungan yang sudah diperoleh. Interpretasi dilakukan sesuai dengan tujuan dan lingkup yang telah ditetapkan supaya mendapatkan kesimpulan dan dapat memberikan rekomendasi untuk dilakukannya perbaikan pengurangan dampak lingkungan yang disebabkan oleh proses yang diamati. Berdasarkan hasil pengukuran LCA dengan aplikasi simaPro 9.6.0.1 menunjukkan bahwa prosedur pengujian destruksi kering menimbulkan dampak yang lebih kecil dibandingkan prosedur pengujian destruksi basah di seluruh kategori. Karena tidak ada LCA yang dilakukan dalam kimia analitik pada prosedur destruksi, maka tidak mungkin membandingkan hasil penelitian ini dengan literatur. Hasil LCA pada kategori *Global Warming Potensial* (GWP) menunjukkan nilai 5,77 untuk prosedur pengujian destruksi kering. Nilai GWP mengindikasikan bahwa gas tersebut memiliki kemampuan untuk memperburuk pemanasan global sekitar 5,77 kali lebih kuat dibandingkan dengan  $CO_2$  jika diemisikan dengan jumlah dan periode yang sama. Berdasarkan literatur Gschrey & Zeiger (2015) terkait F-Gas Regulation (EU) No 517 / 2014 menyatakan bahwa batasan penggunaan gas – gas dengan GWP lebih besar dari 150 dianggap memiliki dampak pemanasan global yang signifikan.

Nilai ekotoksistas menunjukkan kemampuan suatu senyawa zat kimia dalam memberikan efek bahaya pada lingkungan dan organisme (Papaioannou et al., 2023). Pada prosedur pengujian destruksi basah dan destruksi kering membutuhkan bahan – bahan kimia berbahaya seperti  $HNO_3$ ,  $HCl$ , *ethanol* dan *magnesium nitrat*, sehingga nilai ekotoksistas pada masing – masing pengujian tinggi, meskipun jika dibandingkan prosedur pengujian destruksi kering lebih kecil dibandingkan destruksi basah dengan nilai 33,2  $PAF \cdot m^2 yr$ . nilai ekotoksistas ini mengartikan bahwa ada potensi bahwa 33,2% dari area permukaan per meter persegi per tahun dapat terpengaruh oleh bahan kimia tersebut. Ini mengindikasikan seberapa luas dan seringnya bahan kimia tersebut dapat menyebabkan dampak pada organisme di lingkungan setelah mempertimbangkan sejumlah faktor seperti dosis, waktu paparan, dan *sensitivitas organisme*.

Kategori dampak bahan bakar fosil menunjukkan bahwa untuk setiap unit energi (biasanya megajoule) yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil, ada surplus energi yang tersedia setelah mempertimbangkan seluruh siklus hidup dari ekstraksi, produksi, penggunaan, hingga pembuangan akhirnya. Dalam penelitian ini prosedur pengujian destruksi basah memiliki nilai dampak bahan bakar fosil sebesar 0,24 lebih besar dibandingkan prosedur pengujian destruksi kering yaitu 0,18 MJ surplus.

Penyebab terjadinya dampak bahan bakar fosil yaitu pembakaran yang dilakukan pada tahap pengukuran logam berat dengan Atomic Absorption Spectroscopy, dimana pengukuran ini membutuhkan gas acetylene, nitrogen dan argon sebagai bahan pembakar dan pembentuk atom. Pengasaman ini membahas tentang deposisi asam. Sumber utama deposisi asam adalah *sulfur dioksida* ( $SO_2$ ) dan *nitrogen oksida* ( $NO_x$ ) yang dibebaskan ke atmosfer melalui pembakaran bahan bakar fosil. Pada pengujian destruksi kering menggunakan larutan bahan kimia berupa  $HNO_3$  yang relatif lebih sedikit namun pada pengujian destruksi basah terjadi reaksi kimia yang menyebabkan pengasaman dengan jumlah bahan kimia yang relatif lebih banyak.

Nilai dampak yang diperoleh dari pengukuran LCA ini saling berkaitan sehingga apabila nilai toksisitas, bahan bakar fosil dan pengasaman tinggi berarti nilai dampak yang lainnya juga mengikuti. Pada dampak penguapan organik disebabkan karena bahan kimia organik yang menguap seperti ethanol. Pada dampak penguapan anorganik disebabkan karena proses pemanasan pada pengujian destruksi basah pemanasan dilakukan diatas penangas listrik dengan mereaksikan sampel makanan dengan bahan kimia HCl sehingga terjadi penguapan senyawa anorganik HCl, sedangkan pada pengujian destruksi kering terjadi penguapan pada saat pemanasan dengan campuran HCl :  $HNO_3$ , sehingga terjadi penguapan anorganik HCl dan  $HNO_3$ .

### 3.2 Pembahasan

*Life Cycle Assessment* (LCA) memiliki kaitannya terhadap konsep teknik industri, dimana LCA menyediakan kerangka kerja dalam menganalisis dampak lingkungan dari produk atau proses pada seluruh siklus hidupnya. Dalam upaya mengoptimasi proses produksi, suatu perusahaan dapat mengidentifikasi tahapan produksi yang memiliki dampak lingkungan tinggi sehingga memungkinkan perbaikan proses untuk mengurangi penggunaan energi, limbah dan emisi. Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwasannya prosedur pengujian destruksi kering menimbulkan dampak yang lebih kecil dibandingkan prosedur pengujian destruksi basah di seluruh kategori, sehingga prosedur pengujian destruksi kering lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam proses berkelanjutan pada pengujian logam berat pada industri makanan. Pemilihan material merupakan bagian penting dalam teknik industri. LCA mampu mengevaluasi berbagai material berdasarkan dampak lingkungan, sehingga hasil pengolahan data dapat digunakan untuk memilih material yang paling sesuai dengan kebutuhan fungsional dan berkelanjutan. Seperti halnya pada destruksi kering dimana material bahan kimia yang digunakan lebih sedikit dengan konsentrasi rendah, karena prosedur destruksi kering lebih berfokus pada tahap pengabuan untuk menghancurkan sampel makanan sehingga unsur – unsur logam berat dapat terurai sempurna. LCA juga berperan dalam manajemen rantai pasokan dimana hasil pengolahan data mampu memberikan informasi dampak lingkungan dari bahan baku, transportasi, proses produksi, proses pengujian, dan distribusi produk. Hal ini membantu perusahaan untuk memilih pemasok yang menerapkan praktik berkelanjutan dan mengoptimalkan transportasi untuk mengurangi jejak karbon. Saat ini teknik industri tidak hanya berfokus pada aspek teknik dan ekonomi, tetapi juga sangat mempertimbangkan aspek lingkungan dan sosial. LCA mampu memberikan informasi data empiris dalam pengambilan keputusan berkelanjutan, dimana mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan manusia, kelestarian ekosistem dan sumber daya alam.

## 4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil pengukuran LCA pada proses pengujian destruksi basah dan destruksi kering dapat disimpulkan bahwa pengujian destruksi kering lebih direkomendasikan karena memiliki nilai dampak pada setiap kategori dampak yang lebih rendah dibandingkan dengan pengujian destruksi basah. Kedua pengujian ini menggunakan bahan kimia berbahaya dan gas berbahaya sehingga nilai dampak yang dihasilkan tinggi, namun penelitian ini mampu memberikan solusi prosedur pengujian yang lebih baik, sehingga apabila dilakukan terus menerus dampak lingkungan juga dapat diperkecil. Pada penelitian ini hanya membahas pada pengukuran LCA dengan dampak lingkungan yang dikarakterisasi menggunakan *Eco-Indicator 99(H) V2.10*, sehingga kategori dampak yang dihasilkan belum mencakup hal-hal lainnya. Peneliti menyarankan untuk dilakukan pengkajian lebih dalam dengan berbagai macam karakterisasi dalam mengukur nilai dampak lingkungan dengan metode LCA.



## Daftar Pustaka

- Ahangarnokolaei, M. A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., & Rizzo, L. (2021). Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106251. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106251>
- Badan Pusat Statistik. (2024). Laju Pertumbuhan PBD Industri Manufaktur 2023. In *bps.go.id*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTIXNiMy/laju-pertumbuhan-pdb-industri-manufaktur.html>
- Behrooznia, L., Sharifi, M., & Hosseinzadeh-Bandbafha, H. (2020). Comparative life cycle environmental impacts of two scenarios for managing an organic fraction of municipal solid waste in Rasht-Iran. *Journal of Cleaner Production*, 268(2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122217>
- Ben-Alon, L., Loftness, V., Harries, K. A., & Cochran Hameen, E. (2021). Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144(March), 110951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110951>
- Brilliantina, A., Adhamatika, A., Sari, E. K. N., Wijaya, R., Triardianto, D., & Sucipto, A. (2023). Penerapan Life Cycle Assessment (LCA) Untuk Mengurangi Dampak Lingkungan Pada Proses Produksi Gula Kristal Putih Di Bondowoso. *JUSTER: Jurnal Sains Dan Terapan*, 2(1), 85–96. <https://doi.org/10.57218/juster.v2i1.474>
- Elvania, N. C. (2023). *Isu Lingkungan Global* (E. Damayanti (ed.)). Widina Media Utama.
- Fertier, A., Montarnal, A., Truptil, S., & Bénaben, F. (2020). Green analytical chemistry metrics for evaluating the greenness of analytical procedures. *Decision Support Systems*, January, 113260. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.06.006>
- Ganesh, K. N., Zhang, D., Miller, S. J., Rossen, K., Chirik, P. J., Kozlowski, M. C., Zimmerman, J. B., Brooks, B. W., Savage, P. E., Allen, D. T., & Voutchkova-Kostal, A. M. (2021). Green Chemistry: A Framework for a Sustainable Future. *Organometallics*. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.1c00343>
- Gschrey, B., & Zeiger, B. (2015). F-Gas Regulation: Technical Advice to Member States on implementing Article 7(2). *Öko-Recherche*, 7(517). [http://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/docs/151023\\_hfc23\\_byproduction\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/docs/151023_hfc23_byproduction_en.pdf)
- ISO 14040. (2009). Environmental assessment - Life cycle assessment - Principles and framework. *International Standard Organisation, 1997*, 1–20.
- Kemertian Perindustrian Republik Indonesia. (2019). Industri Makanan dan Minuman Jadi Sektor Kampium. *Kemenperin.Go.Id*. <https://kemenperin.go.id/artikel/20298/Industri-Makanan-dan-Minuman-Jadi-Sektor-Kampiun->
- Liu, F., Shafique, M., & Luo, X. (2023). Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels. *Environmental Technology and Innovation*, 32, 103343. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103343>
- Loubet, P., Peres, C., Sonnemann, G., & Raccary, B. (2022). Evaluating the environmental impacts of analytical chemistry methods: From a critical review towards a proposal using a life cycle approach. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116525>
- Martin-Rios, C., Demen Meier, C., & Pasamar, S. (2022). Sustainable waste management solutions for the foodservice industry: A Delphi study. *Waste Management and Research*, 40(9), 1412–1423. <https://doi.org/10.1177/0734242X221079306>
- Nowak, P. M. (2023). What does it mean that “something is green”? The fundamentals of a Unified Greenness Theory. *Green Chemistry*, 25(12), 4625–4640. <https://doi.org/10.1039/d3gc00800b>
- Nur Hidayah, F. (2023). Perkembangan Pengaturan Hukum Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (Limbah B3) Di Indonesia. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 4(02), 211–225. <https://doi.org/10.59141/jist.v4i02.579>

- Olivieri, A. C., & Escandar, G. M. (2019). Analytical chemistry assisted by multi-way calibration: A contribution to green chemistry. *Talanta*, 204(April), 700–712. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.06.022>
- Ozben, T., & Fragão-Marques, M. (2023). Chemical strategies for sustainable medical laboratories. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 61(4), 642–650. <https://doi.org/10.1515/cclm-2022-1157>
- Papaioannou, C., Geladakis, G., Kommata, V., Batargias, C., & Lagoumintzis, G. (2023). Insights in Pharmaceutical Pollution: The Prospective Role of eDNA Metabarcoding. *Toxics*, 11(11), 1–40. <https://doi.org/10.3390/toxics11110903>
- Raccary, B., Loubet, P., Peres, C., & Sonnemann, G. (2022). Advances in Sample Preparation Life cycle assessment of sample preparation in analytical chemistry : a case study on SBSE and SPE techniques. *Advances in Sample Preparation*, 1(February), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2022.100009>
- Sajid, M., & Plotka Wasyłka, J. (2022). Green Analytical Chemistry Metrics: A Review. *Talanta*, 238(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123046>
- SNI 01-2896-1998. (1998). Cara uji cemaran logam dalam makanan. *Badan Standardisasi Nasional*, 1–20.
- Terlouw, T., Bauer, C., Rosa, L., & Mazzotti, M. (2021). Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: A critical review. *Energy and Environmental Science*, 14(4), 1701–1721. <https://doi.org/10.1039/d0ee03757e>
- Tobiszewski, M. (2016). Metrics for green analytical chemistry. *Analytical Methods*, 8(15), 2993–2999. <https://doi.org/10.1039/c6ay00478d>
- Utami, I. M. (2019). *Analisis Dampak Lingkungan Proses Pengolahan Air di IPAM “X” dengan Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA)*. 173.
- Zimmerman, J. B., Anastas, P. T., Erythropel, H. C., & Leitner, W. (2020). Designing for a green chemistry future. *Science*, 367(6476), 397–400. <https://doi.org/10.1126/science.aay3060>