

Analisis Emisi Gas Rumah Kaca dengan *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) Industri Tahu

Mochamad Erwantyo Nugroho¹, Prabang Setyono¹, dan Siti Rachmawati^{1*}

¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia; e-mail: siti.rachmawati@staff.uns.ac.id

ABSTRAK

Industri tahu dapat membawa dampak negatif karena berpotensi mencemari lingkungan. Permasalahan industri ini yaitu penggunaan kayu bakar, solar, listrik pompa air dan respirasi manusia yang menyumbang terhadap emisi gas rumah kaca. Tujuan penelitian mengidentifikasi dampak emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan pada proses produksi tahu dan menentukan alternatif pengendalian yang menjadi prioritas dalam mereduksi dampak emisi GRK di industri tahu. Analisis data emisi gas rumah kaca menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan software OpenLCA. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan cara observasi dan wawancara. Database yang digunakan Agribalyse, Ecoinvent dan ELCD. Metode penilaian dampak yaitu IPCC 2021 terdapat pada database ELCD. analisis data *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menggunakan software *Expert Choice* untuk mendapatkan alternatif pengendalian emisi gas rumah kaca. Teknik pengumpulan data dengan kuesioner. Industri tahu memiliki dua produk yaitu tahu putih dan tahu goreng bahan tahu bakso. Produk tahu putih memberikan dampak terhadap pemanasan global atau *Global Warming Potential* (GWP) sebesar 0,0704 kg CO₂ eq/kg dan Produk tahu goreng bahan tahu bakso sebesar 0,1346 kg CO₂ eq/kg. Kegiatan penggorengan memberikan kontributor utama dampak GWP sebesar 0,0501 kg CO₂ eq/kg dikarenakan penggunaan kayu bakar sebagai bahan bakar. Alternatif pengendalian menunjukkan pilihan terbanyak yaitu kriteria lingkungan sebesar 65,4% dan alternatif biogas sebesar 58,2%.

Kata kunci: Gas rumah kaca, Penilaian siklus hidup, AHP, potensi pemanasan global

ABSTRACT

The tofu industry can have a negative impact because it has the potential to pollute the environment. The problems with this industry are the use of firewood, diesel fuel, water pump electricity, and human respiration, which contribute to greenhouse gas emissions. The research objective is to identify the impact of greenhouse gas (GHG) emissions produced in the tofu production process and determine control alternatives that are priorities in reducing the impact of GHG emissions in the tofu industry. Analysis of greenhouse gas emissions data using the Life Cycle Assessment (LCA) method with OpenLCA software. Data collection techniques were carried out by means of observation and interviews. The databases used are Agribalyse, Ecoinvent, and ELCD. The impact assessment method, namely IPCC 2021, is found in the ELCD database. Analytical Hierarchy Process (AHP) data analysis using Expert Choice software to obtain alternative greenhouse gas emission controls. Data collection techniques include questionnaires. The tofu industry has two products, namely white tofu and fried tofu, or meatball tofu. White tofu products have an impact on global warming, or Global Warming Potential (GWP), of 0.0704 kg CO₂ eq/kg, and fried tofu products made from meatball tofu are 0.1346 kg CO₂ eq/kg. Frying activities are the main contributor to the GWP impact of 0.0501 kg CO₂ eq/kg due to the use of firewood as fuel. Control alternatives showed the most choices, namely environmental criteria at 65.4% and biogas alternatives at 58.2%.

Keywords: Greenhouse gases, life cycle assessment, analytical hierarchy process, global warming potential

Citation: Nugroho, M. E., Setyono, P., dan Rachmawati, S. (2024). Analisis Emisi Gas Rumah Kaca dengan *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) Industri Tahu. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(6), 1504-1512, doi:10.14710/jil.22.6.1504-1512

1. PENDAHULUAN

Tahu adalah salah satu jenis makanan berbahan dasar kacang kedelai yang keberadaannya mudah terjangkau. Buletin Konsumsi Pangan (2021) menyebutkan bahwa jumlah konsumsi tahu pada tahun 2023 diprediksikan mengalami peningkatan dari tahun sebelumnya. Jumlah konsumsi tahu tersebut per kapita menjadi sebesar 7,95 kg/kapita.

Jumlah industri tahu yang banyak berkembang di lingkungan masyarakat dapat membawa dampak negatif. Dampak negatif karena memiliki potensi mencemari lingkungan. Pada umumnya produk tahu di Indonesia masih dihasilkan dari industri skala kecil atau rumahan. Sebagian besar pengolahan tahu dari industri skala kecil atau rumahan masih menggunakan metode secara tradisional (Susanto

dkk., 2020). Peralatan yang digunakan untuk mengolah tahu tergolong sederhana sehingga memiliki tingkat efisiensi penggunaan sumber daya khususnya bahan bakar dan air masih rendah serta tingkat timbulan limbah yang tinggi (Juriah dan Sari, 2018). Industri tahu skala kecil kebanyakan masih mempunyai banyak kekurangan seperti penggunaan teknologi, sistem pengolahan limbah, keterbatasan dalam pengembangan usaha dan lain-lain (Maukar dkk., 2019).

Kecamatan Ungaran Barat dikenal sebagai sentra industri tahu bakso yang ada di Kabupaten Semarang. Selain memproduksi tahu putih, industri ini juga memproduksi tahu goreng bahan tahu bakso. Industri tahu berlokasi di area yang berdekatan dengan pemukiman warga dan sungai. Permasalahan pada industri tahu yaitu penggunaan kayu bakar, solar dan listrik untuk pompa air yang dapat menyumbang emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Besarnya emisi GRK dapat menjadi penyebab terjadinya peristiwa pemanasan global. Oleh karena itu, dibutuhkan upaya untuk meminimalisir dampak dari emisi GRK tersebut melalui analisis daur hidup suatu produk dan penentuan alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK yang didasarkan pada skala prioritas.

Astuti (2019) menjelaskan bahwa salah satu metode dalam melakukan analisis daur hidup produk suatu industri yaitu dengan menerapkan *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA dapat membantu pelaku industri dalam menilai sustainability, melakukan evaluasi dan menentukan langkah untuk perbaikan secara efektif (Reis et al., 2018).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa proses produksi tahu menghasilkan polutan dengan total 0,1766 kgCO₂eq (Kurniawati dkk., 2019), serta memiliki prakiraan dampak pemanasan global, asidifikasi, penipisan lapisan ozon, dan eutrofikasi (Sari dkk., 2022). Berdasarkan penelitian di atas maka alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK menggunakan kombinasi metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) perlu dilakukan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di industri tahu di Kelurahan Genuk, Kecamatan Ungaran Barat, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah.

2.2. Pengumpulan data

2.2.1. *Life Cycle Assessment* (LCA)

Teknik pengumpulan data pada tahapan *Life Cycle Assessment* dilakukan dengan observasi dan wawancara. Pengumpulan data dilakukan melalui cara tersebut untuk mengetahui input berupa siklus hidup, bahan baku dan pendukung produksi, bahan bakar, energi, air, limbah padat dan limbah cair serta produk yang dihasilkan. Analisis data dengan menggunakan software OpenLCA dapat diketahui output berupa besaran dampak dari emisi Gas Rumah Kaca (GRK).

2.2.2. *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Teknik pengumpulan data pada tahapan *Analytical Hierarchy Process* menggunakan kuesioner. Pengumpulan data dilakukan melalui cara tersebut untuk mengetahui input berupa penilaian kuesioner dengan kriteria dan alternatif pengendalian dampak yang telah ditentukan. Kriteria yang digunakan yaitu keunggulan, operasional dan lingkungan, sedangkan alternatif yang digunakan yaitu biogas, ketel uap dan briket arang. Analisis data dengan menggunakan *software Expert Choice* dapat diketahui output berupa alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK. Responden pada penelitian ini yaitu industri tahu do kelurahan genuk, Ungaran Barat Semarang, Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Semarang dan Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (WALHI) Jawa Tengah. Jumlah total responden pada tahapan AHP yaitu sebanyak 6 orang yang terdiri dari masing-masing kriteria responden sebanyak 2 orang.

2.3. Analisis Data

2.3.1. *Life Cycle Assessment* (LCA)

LCA dapat membantu pelaku industri dalam menilai sustainability, melakukan evaluasi dan menentukan langkah untuk perbaikan secara efektif (Reis et al., 2018). Batasan LCA yang digunakan dalam penelitian ini yaitu gate to gate atau proses produksi. *Life Cycle Inventory*, berupa inventarisasi input dan *output* pada setiap siklus hidup. Inventarisasi dilakukan dengan memasukkan data ke dalam software OpenLCA. *Life Cycle Impact Assessment*, dilakukan menggunakan metode impact assessment berupa IPCC 2021. Interpretation, menjadi dasar pengambilan keputusan dengan memberikan alternatif pengendalian. Alternatif pengendalian tersebut diberikan pada proses produksi dengan nilai emisi GRK tertinggi.

2.3.2. *Analytical Hierarchy Process* (AHP)

Analytical Hierarchy Process (AHP) yaitu suatu metode untuk menentukan pilihan alternatif yang terbaik. Keunggulan metode ini yaitu memiliki kemampuan dalam menyelesaikan masalah *multiobjectives* dengan multikriteria. *Software Expert Choice* merupakan perangkat lunak AHP yang digunakan untuk memilih alternatif masing-masing kriteria dan subkriteria sehingga diperoleh bobot yang didasarkan pilihan responden (Nasution dkk., 2013).

Penentuan kriteria, terdapat 3 kriteria yang digunakan dalam tahapan ini antara lain keunggulan, operasional dan lingkungan. Penyusunan hierarki, digolongkan ke dalam 3 tingkatan. Tingkatan pertama adalah tujuan yaitu penentuan alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK. Tingkatan kedua adalah tingkatan kriteria yang meliputi keunggulan, operasional dan lingkungan. Tingkatan ketiga adalah tingkatan alternatif pengendalian. Pengisian kuesioner, dengan menerapkan skala penilaian intensitas kepentingan dan penilaian perbandingan berpasangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Goal and Scope

Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengidentifikasi dampak emisi GRK pada proses produksi tahu. Alur proses produksi di industri tahu terdapat 8 tahapan yaitu perendaman, pencucian, penggilingan, perebusan, penyaringan, penggumpalan, pencetakan, dan penggorengan. Unit fungsional pada penelitian ini yaitu produksi satu kilogram tahu putih dan tahu goreng bahan tahu bakso dalam satu kali produksi.

Emisi GRK pada proses produksi tahu dapat dilepaskan dari respirasi manusia maupun sektor energi. Seluruh proses produksi tentunya melepaskan emisi GRK dari respirasi manusia karena terdapat aktivitas tenaga kerja. Sektor energi yang melepaskan emisi GRK yaitu pada penggunaan bahan bakar. Bahan bakar berupa listrik digunakan pada proses perendaman, pencucian dan penggilingan. Bahan bakar berupa solar digunakan hanya pada proses penggilingan. Bahan bakar berupa kayu bakar digunakan pada proses perebusan dan penggorengan. Penggunaan bahan bakar seperti listrik, solar dan kayu bakar tentunya akan menghasilkan luaran berupa emisi GRK.

Menurut Rahmadania (2022) konsentrasi GRK yang berlebihan di atmosfer mengakibatkan panas matahari terperangkap dan peningkatan suhu permukaan bumi. Gas rumah kaca dapat terbentuk secara alami maupun antropogenik atau diakibatkan oleh kegiatan manusia.

3.2. Life Cycle Inventory Perendaman

Berdasarkan pada Tabel 1 diketahui *input* proses perendaman antara lain kedelai sebanyak 11,5 kg, air sebanyak 24 L, listrik untuk pompa air sebanyak 0,00323 kWh dan respirasi manusia selama 0,25 jam. *Output* dari proses perendaman antara lain kedelai hasil rendaman sebesar 14 kg, limbah cair sebanyak

21,5 L, emisi CO₂ (listrik) sebesar 0,00191 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebesar 0,0099 kg.

3.3. Life Cycle Inventory Pencucian

Berdasarkan pada Tabel 2 diketahui bahwa input dari proses pencucian antara lain kedelai sebanyak 14 kg, air sebanyak 72 L, listrik untuk pompa air sebanyak 0,00968 kWh dan respirasi manusia selama 0,16667 jam. Output dari proses pencucian antara lain kedelai sebanyak 13,5 kg, limbah cair sebanyak 72 L, limbah padat (kerikil, kulit kedelai) sebanyak 0,5 kg, emisi CO₂ (listrik) sebanyak 0,00571 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,0066 kg.

3.4. Life Cycle Inventory Penggilingan

Dari Tabel 3, diketahui bahwa input pada proses penggilingan yaitu kedelai sebanyak 13,5 kg, solar untuk bahan bakar minyak mesin penggiling sebanyak 0,2 L dan respirasi manusia selama 0,08333 jam. Output proses penggilingan antara lain kedelai halus sebanyak 13,5 kg, emisi CO₂ (solar) sebanyak 0,57991 kg, emisi N₂O (solar) sebanyak 0,0000047 kg, emisi CH₄ (solar) sebanyak 0,0000235 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,0033 kg.

3.5. Life Cycle Inventory Perebusan

Berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa input proses perebusan antara lain kedelai halus sebanyak 13,5 kg, air untuk merebus kedelai sebanyak 72 L, kayu bakar sebanyak 22 kg, listrik untuk pompa air sebanyak 0,00968 kWh dan respirasi manusia selama 0,33333 jam. Output proses perebusan antara lain bubur kedelai sebanyak 18 kg, limbah cair sebanyak 67,5 L, emisi CO₂ (kayu bakar) sebanyak 38,4384 kg, emisi N₂O (kayu bakar) sebanyak 0,001373 kg, emisi CH₄ (kayu bakar) sebanyak 0,01029 kg, emisi CO₂ (listrik) sebanyak 0,00571 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,0132 kg.

Tabel 1. Inventarisasi Input dan Output Perendaman

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Kedelai mentah	11,5	Kg	Kedelai basah	14	Kg
Air	24	L	Limbah cair	21,5	Kg
Pompa air listrik	0,00323	kWh	Emisi CO ₂ (Listrik)	0,00123	kg
Respirasi manusia	0,25	Jam	Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0099	kg

Tabel 2. Inventarisasi Input dan Output Pencucian

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Kedelai basah	14	Kg	Kedelai bersih	13,5	Kg
Air	72	L	Limbah cair	72	Kg
Pompa air listrik	0,00968	kWh	Limbah padat	0,5	Kg
Respirasi manusia	0,16667	Jam	Emisi CO ₂ (Listrik)	0,00571	kg
			Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0066	kg

Tabel 3. Inventarisasi Input dan Output Penggilingan

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Kedelai bersih	13,5	Kg	Kedelai halus	13,5	Kg
Solar	0,2	L	Emisi CO ₂ (Solar)	0,57991	Kg
			Emisi N ₂ O (Solar)	0,0000047	kg
Respirasi manusia	0,08333	Jam	Emisi CH ₄ (Solar)	0,0000235	kg
			Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0033	kg

Tabel 4. Inventarisasi Input dan Output Perebusan

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Kedelai halus	13,5	Kg	Bubur kedelai	18	kg
Air	72	L	Emisi CO ₂ (Kayu bakar)	38,4384	kg
Kayu bakar	22	Kg	Emisi N ₂ O (Kayu bakar)	0,00137	kg
Pompa air listrik	0,00968	kWh	Emisi CH ₄ (Kayu bakar)	0,01029	kg
			Limbah cair	67,5	L
Respirasi manusia	0,33333	Jam	Emisi CO ₂ (Listrik)	0,00571	kg
			Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0132	kg

Tabel 5. Inventarisasi Input dan Output Penyaringan

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Bubur kedelai	18	Kg	Sari kedelai	16	kg
Respirasi manusia	0,08333	Jam	Ampas kedelai	2	kg
			Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0033	kg

Tabel 6. Inventarisasi Input dan Output Penggumpalan

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Sari kedelai	16	Kg	Gumpalan tahu	18,5	Kg
Air asaman	144	L	Limbah cair	125,5	L
Pompa air listrik	0,01936	kWh	Emisi CO ₂ (Listrik)	0,01142	kg
Respirasi manusia	0,16667	Jam	Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0066	kg

Tabel 7. Inventarisasi Input dan Output Pencetakan

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Gumpalan tahu	18,5	kg	Limbah cair	0,5	L
			Tahu putih	3	kg
Respirasi manusia	0,25	Jam	Tahu putih bahan tahu bakso	15	kg
			Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,0099	kg

Tabel 8. Inventarisasi Input dan Output Penggorengan

Input			Output		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Tahu putih bahan tahu bakso	15	Kg	Tahu goreng bahan tahu bakso	15	kg
Minyak goreng	6	L	Limbah cair migor	6	L
Kayu bakar	25	kg	Emisi CO ₂ (Kayu bakar)	43,68	Kg
			Emisi N ₂ O (Kayu bakar)	0,00156	kg
Respirasi manusia	0,41667	Jam	Emisi CH ₄ (Kayu bakar)	0,0117	kg
			Emisi CO ₂ (Respirasi manusia)	0,033	kg

3.6. Life Cycle Inventory Penyaringan

Berdasarkan Tabel 5, diketahui bahwa input dari proses penyaringan yaitu bubur kedelai sebanyak 18 kg dan respirasi manusia selama 0,08333 jam. *Output* pada proses penyaringan antara lain sari kedelai hasil dari penyaringan sebanyak 16 kg, ampas kedelai sebanyak 2 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,0033 kg.

3.7. Life Cycle Inventory Penggumpalan

Berdasarkan Tabel 6, diketahui bahwa input dari proses penggumpalan antara lain sari kedelai sebanyak 16 kg, air asaman sebanyak 144 L, listrik untuk pompa air sebanyak 0,01936 kWh dan respirasi manusia selama 0,16667 jam. *Output* dari proses penggumpalan antara lain gumpalan tahu sebanyak 18,5 kg, limbah cair sebanyak 125,5 L, emisi CO₂ (listrik) sebanyak 0,01142 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,0066 kg.

3.8. Life Cycle Inventory Pencetakan

Berdasarkan Tabel 7, diketahui bahwa input pada proses pencetakan yaitu gumpalan tahu sebanyak 18

kg dan respirasi manusia selama 0,25 jam. *Output* dari proses pencetakan antara lain limbah cair sebanyak 0,5 L, tahu putih sebanyak 3 kg dalam 1 papan, tahu putih bahan tahu bakso sebanyak 15 kg dalam 5 papan dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,0099 kg. Potongan tahu putih dalam 1 papan sebanyak 81 biji dan potongan tahu putih bahan tahu bakso dalam 1 papan sebanyak 126 biji. Potongan tahu tersebut menunjukkan bahwa tahu putih sebanyak 81 biji dan tahu putih bahan tahu bakso sebanyak 630 biji.

3.9. Life Cycle Inventory Penggorengan

Berdasarkan Tabel 8, diketahui bahwa input dari proses penggorengan antara lain tahu putih bahan tahu bakso sebanyak 15 kg, minyak goreng sebanyak 6 L, kayu bakar sebanyak 25 kg dan respirasi manusia selama 0,41667 jam. *Output* dari proses penggorengan yaitu tahu goreng bahan tahu bakso sebanyak 15 kg, limbah cair minyak goreng 6 L, emisi CO₂ (kayu bakar) sebanyak 43,68 kg, emisi N₂O (kayu bakar) sebanyak 0,00156 kg, emisi CH₄ (kayu bakar) sebanyak 0,0117 kg dan emisi CO₂ (respirasi manusia) sebanyak 0,033kg.

3.10. Analisis Dampak GWP

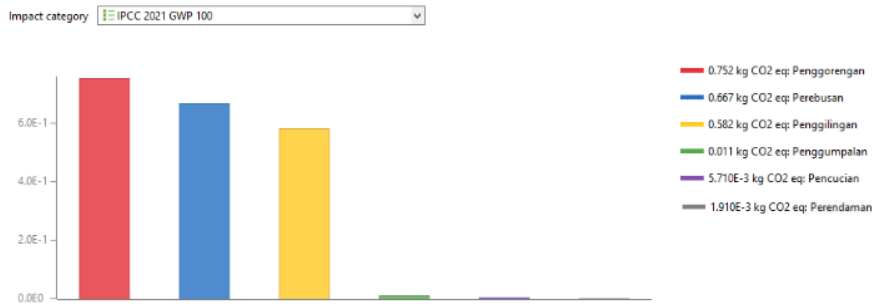
Berdasarkan Tabel 9, diketahui bahwa hasil impact GWP 100 tahu putih kuantitas 1 kali proses produksi menghasilkan sebesar 1,2677 kg CO₂ eq dari perhitungan *software* OpenLCA, Kuantitas 1 kg sebesar 0,0704 kg CO₂ eq dari perhitungan *software* OpenLCA dibagi 18 kg / total tahu dalam 1 kali proses produksi. Kuantitas 1 hari terdapat 50 kali proses produksi sebesar 10,56 kg CO₂ eq dari perhitungan hasil impact GWP 1 kg tahu putih dikalikan dengan 150 kg / total tahu putih dalam 50 kali proses produksi. Besaran nilai dampak GWP 100 tersebut diakibatkan dari penggunaan solar pada proses penggilingan, penggunaan kayu bakar pada proses perebusan dan respirasi manusia dari proses perendaman hingga pencetakan.

Hasil impact GWP 100 tahu goreng bahan tahu bakso kuantitas 1 kali proses produksi menghasilkan impact GWP sebesar 2,02 kg CO₂ eq dari perhitungan *software* OpenLCA, Kuantitas 1 kg sebesar 0,1346 kg CO₂eq dari perhitungan *software* OpenLCA dibagi dengan 15 kg / total tahu dalam 1 kali proses produksi. Kuantitas 1 hari terdapat 50 kali proses produksi sebesar 100,95 kg CO₂ eq dari perhitungan hasil impact GWP 1 kg tahu goreng bahan tahu bakso dikalikan dengan 750 kg/total tahu goreng bahan tahu bakso dalam 50 kali proses produksi. Besaran nilai dampak GWP 100 tersebut diakibatkan dari penggunaan solar pada proses penggilingan, penggunaan kayu bakar pada proses perebusan dan penggorengan serta respirasi manusia dari proses perendaman hingga penggorengan. Nilai *Global Warming Potential* (GWP 100) pada kedua produk tahu di industri tahu menunjukkan nilai yang berbeda. Hal ini selaras dengan penelitian terdahulu yaitu nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang besar di industri tahu dengan terdapat 6 tahapan antara lain perendaman, pencucian, penggilingan, perebusan, penyaringan dan pembentukan tahu. Menurut Sutanto dkk (2015) besarnya kebutuhan energi listrik dapat meningkatkan emisi GRK yang menyebabkan *climate change* atau perubahan iklim global.

3.11. Interpretasi

Identifikasi Hotspot atau Titik Kritis

Berdasarkan Gambar 1, diketahui bahwa penggorengan merupakan kontributor utama dampak GWP 100 yaitu sebesar 0,752 kg CO₂ eq, sehingga untuk memproduksi 1 kg tahu goreng bahan tahu bakso memberikan dampak sebesar 0,0501 kg CO₂ eq. Proses penggorengan menjadi kontributor utama karena akibat penggunaan kayu bakar sebagai bahan bakar untuk menggoreng. Reyes dkk (2015) menyebutkan bahwa pembakaran kayu bakar dapat menghasilkan emisi *Methane* (CH₄), *Carbon dioxide* (CO₂) dan *Dinitrogen monoxide* (N₂O) yang tinggi. Kayu bakar yang digunakan yaitu sebanyak 25 kg. Proses perebusan menjadi kontributor kedua yaitu sebesar 0,667 kg CO₂ eq. Bahan bakar yang digunakan terdapat dua jenis yaitu kayu bakar dan listrik. Kayu bakar yang digunakan yaitu sebanyak 22 kg. Listrik untuk memompa air dengan sebesar 0,00968 kWh. Proses penggilingan menjadi kontributor ketiga yaitu sebesar 0,582 kg CO₂ eq. Proses penggilingan menjadi kontributor ketiga karena akibat penggunaan solar sebagai sumber energi mesin penggiling. Solar yang digunakan yaitu sebanyak 0,2 L. Proses penggumpalan menjadi kontributor keempat yaitu sebesar 0,011 kg CO₂ eq. Besaran nilai tersebut diakibatkan dari penggunaan listrik untuk memompa air. Energi yang digunakan yaitu sebesar 0,01936 kWh. Proses pencucian menjadi kontributor kelima yaitu sebesar 0,00571 kg CO₂ eq. Besaran nilai tersebut diakibatkan dari penggunaan listrik untuk memompa air. Energi yang digunakan yaitu sebesar 0,00968 kWh. Proses perendaman menjadi kontributor keenam yaitu sebesar 0,00191 kg CO₂ eq. Besaran nilai tersebut diakibatkan dari penggunaan listrik untuk memompa air. Energi yang digunakan yaitu sebesar 0,00323 kWh. Hal ini sejalan dengan penelitian Lolo dkk (2021) yang menyatakan bahwa serbuk gergaji berbahan kayu menghasilkan tinggi gas emisi. Peristiwa ini terjadi karena proses pembakaran serbuk gergaji tidak sempurna yang kemudian menghasilkan debu dan jelaga. Proses penyaringan dan pencetakan menjadi proses produksi yang tidak menghasilkan dampak terhadap *global warming potential* (GWP). Proses-proses produksi tahu tersebut tidak menghasilkan dampak GWP dikarenakan tidak menggunakan sektor energi dalam keberlangsungannya.

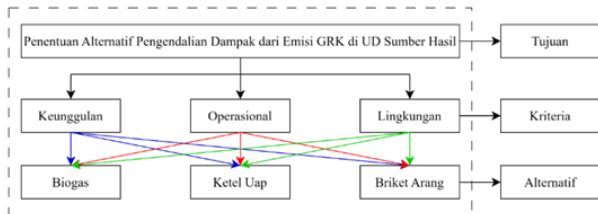


Gambar 1. Hasil Impact GWP 100 Setiap Proses

Tabel 9. Hasil Impact GWP 100

Hasil	Satuan	Kuantitas	Perhitungan Hasil	Keterangan
Tahu Putih				
1,2677	kg CO ₂ eq	18 kg	OpenLCA	1 kali proses produksi (3 kg tahu putih dan 15 kg tahu putih bahan tahu bakso)
0,0704	kg CO ₂ eq	1 kg	1,2677 kg CO ₂ eq 18 kg	1 kg tahu putih
10,56	kg CO ₂ eq	3 kg tahu putih x 50 kali proses = 150 kg	0,0704 kg CO ₂ eq x 150 kg	1 hari (50 kali proses produksi)
Tahu Goreng Bahan Tahu Bakso				
2,02	kg CO ₂ eq	15 kg	OpenLCA	1 kali proses produksi
0,1346	kg CO ₂ eq	1 kg	2,02 kg CO ₂ eq 15 kg	1 kg tahu goreng bahan tahu bakso
100,95	kg CO ₂ eq	15 kg x 50 kali proses = 750 kg	0,1346 kg CO ₂ eq x 750 kg	1 hari (50 kali proses produksi)

3.12. Analisis Alternatif Pengendalian Dampak dari Emisi GRK



Gambar 2. Hierarki Alternatif Pengendalian Dampak dari Emisi GRK

Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa tingkatan pertama hierarki yaitu untuk penentuan alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK Industri Tahu. Tingkatan hierarki kedua yaitu kriteria keunggulan, operasional dan lingkungan. Kriteria keunggulan, suatu kelebihan yang dimiliki oleh alternatif yang akan diterapkan. Kriteria operasional didasarkan pada tingkat kemudahan penggunaan dalam penerapan alternatif pengendalian. Kriteria lingkungan didasarkan pada seberapa besar pengaruh alternatif pengendalian dapat mengurangi dampak dari emisi GRK yang ditimbulkan. Setelah itu, pada tingkatan ketiga hierarki terdapat tiga alternatif pengendalian yang meliputi biogas, ketel uap dan briket arang.

Biogas berdasarkan kriteria keunggulan, biogas dapat menghasilkan produk samping berupa sludge atau bio-slurry. Produk samping tersebut mempunyai kandungan bahan organik cukup tinggi yang mampu memperbaiki struktur tanah (Windiyasmarana dan Gamayanti, 2017). Berdasarkan kriteria operasional, Industri tahu telah memiliki biogas namun menghasilkan bau tidak sedap pada digester. Kondisi tersebut dapat diatasi dengan dilakukan absorpsi atau penyerapan gas H₂S dengan menambahkan NaOH (Mara, 2012). Soda kaustik memiliki bentuk padat, bersifat lembab cair dan dapat menyerap gas CO₂ dari udara bebas sehingga biogas lebih murni (Widhiyanuriyawan dan Nurkholis, 2013). Berdasarkan kriteria lingkungan, biogas dapat mengubah material-material organik yang terkandung dalam limbah cair tahu menjadi gas CH₄. Gas metana pada biogas memiliki nilai kalor yang tinggi yaitu sebesar 4.785 kkal/m³ sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Nisrina dan Pertiwi, 2018). Biogas mengurangi pencemaran udara dengan mengurangi gas polutan, pencemaran air

dengan mengurangi limbah cair ke badan air dan pencemaran tanah dengan mengurangi limbah cair yang masuk ke dalam tanah (Nisrina dkk., 2020).

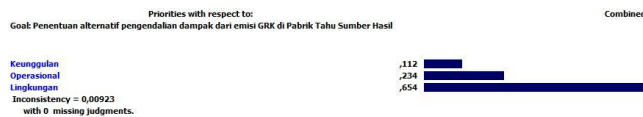
Ketel uap berdasarkan kriteria keunggulan, dapat mengatasi bau sangat pada tahu akibat asap pembakaran karena ketel uap dapat diletakkan secara terpisah jauh dengan proses pemasakan tahu (Sudarman dkk., 2015). Berdasarkan kriteria operasional, ketel uap membutuhkan mekanisme pemasangan dan pembongkaran tungku pembakaran. Ketel uap perlu adanya pemeliharaan mesin secara rutin untuk mengurangi kerusakan yang terjadi pada mesin ketel uap (Pau dan Asngadi, 2021). Berdasarkan kriteria lingkungan, telah banyak pabrik-pabrik yang telah menggunakan bahan bakar alternatif untuk bahan bakar ketel uap (Hasibuan dan Napitupulu, 2013). Salah satu bahan bakar alternatif yaitu wood pellet yang bahan bakunya berupa limbah gergaji dan limbah industri kayu lainnya. Penelitian Arsad (2014) menyebutkan bahwa jenis limbah kayu menghasilkan nilai kalor yang berbeda seperti nilai kalor wood pellet kayu akasia sebesar 4.022,29 – 4.254 kal/gram dan wood pellet kayu tarap sebesar 3.920 – 4.125,28 kal/gram. Ketel uap yang dapat digunakan untuk pabrik tahu yaitu ketel uap tipe pipa api. Ketel uap adalah alat pemanas dengan bejana yang dapat menghasilkan uap air panas. Salah satu bahan bakar yang dapat digunakan pada ketel yaitu berupa kayu bakar. Uap yang dihasilkan pada ketel dialirkan ke bak pemasak melalui jalur suplai uap. Uap tersebut termasuk ke dalam uap panas lanjut dengan suhu hingga 25°C. Mesin ketel juga telah terdapat katup pengaman tekanan tinggi dan katup pengaman vakum. Penggunaan ketel uap pada proses produksi tahu bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, menghindarkan bau sangat tahu akibat pembakaran langsung dan meningkatkan kapasitas produksi.

Briket arang berdasarkan kriteria keunggulan, mempunyai beberapa keunggulan. Pratiwi (2021) menyebutkan bahwa memiliki masa bakar yang relatif lebih lama dibandingkan dengan kayu bakar. Briket arang akan lebih fleksibel disimpan dan dipindah-pindahkan. Berdasarkan kriteria operasional, penggunaan briket arang sama halnya dengan kayu bakar yaitu dengan pembakaran secara langsung. Briket dengan tipe berongga mempunyai ruang aliran oksigen sehingga pembakaran mudah terjadi (Thabuot dkk., 2015). Berdasarkan kriteria lingkungan, briket arang termasuk bahan bakar

biomassa yang dibuat dari bagian tumbuhan maupun limbah proses pengolahan agroindustri. Menurut Vachlepi dan Suwardin (2013) briket arang mempunyai nilai kalor yang cukup tinggi yaitu sebesar 5.800 - 6.300 kal/gram. Qistina dkk (2016) menyebutkan bahwa briket menjadikan proses pembakaran lebih ramah lingkungan karena sekali kandungan sulfur di dalamnya.

3.13. Profil Responden AHP

Terdapat tiga jenis responden yang ditentukan yaitu terdiri dari Industri tahu, DLH Kabupaten Semarang dan WALHI Jawa Tengah. Total responden yang digunakan yaitu sebanyak 6 orang dengan masing-masing jenis responden sebanyak 2 orang. Industri tahu memiliki pengaruh sebagai pihak pemilik industri yang akan menerapkan alternatif pengendalian dampak. DLH Kabupaten Semarang memiliki pengaruh sebagai pihak pemerintah yang melaksanakan monitoring dan evaluasi penerapan pengendalian dampak lingkungan hidup. WALHI Jawa Tengah memiliki pengaruh sebagai pihak *Non Governmental Organization* (NGO) yang bergerak di lingkungan hidup sebagai sosial kontrol.



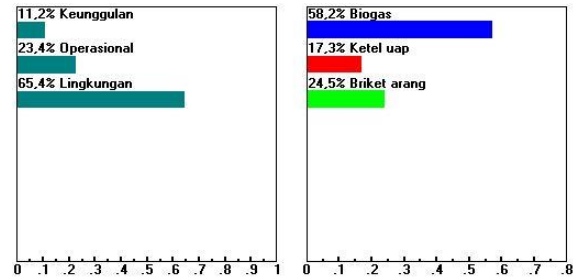
Gambar 3. Nilai Bobot Perbandingan antar Kriteria

Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa kriteria lingkungan menjadi kriteria prioritas sebagai alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK di industri tahu dengan nilai bobot tertinggi sebesar 0,654. Setelah itu, terdapat pilihan berikutnya dengan nilai kedua yaitu kriteria operasional memiliki nilai bobot sebesar 0,234 dan nilai ketiga yaitu kriteria keunggulan memiliki nilai bobot sebesar 0,112. Hasil dari penilaian bobot perbandingan antar kriteria memiliki nilai inkonsistensi sebesar 0,00923. Hal ini menunjukkan bahwa penilaian perbandingan antar kriteria dapat diterima dan valid karena memiliki nilai inkonsistensi dibawah $\leq 0,1$ atau 10%.



Gambar 4. Nilai Bobot Perbandingan antar Alternatif

Berdasarkan Gambar 4, diketahui bahwa alternatif biogas menjadi alternatif prioritas sebagai alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK di industri tahu dengan nilai bobot tertinggi sebesar 0,582. Setelah itu, terdapat pilihan berikutnya dengan nilai kedua yaitu alternatif briket arang memiliki nilai bobot sebesar 0,245 dan nilai ketiga yaitu alternatif ketel uap memiliki nilai bobot sebesar 0,173. Hasil dari penilaian bobot perbandingan antar alternatif memiliki nilai inkonsistensi sebesar 0,01.



Gambar 5. Persentase Pemilihan Responden

Berdasarkan Gambar 5, diketahui bahwa persentase pemilihan responden baik pada penilaian kriteria maupun alternatif. Kriteria lingkungan menjadi pilihan terbanyak responden dengan jumlah persentase sebesar 65,4%. Kriteria operasional dan keunggulan menjadi pilihan berikutnya dengan masing-masing persentase sebesar 23,4% dan 11,2%. Jumlah persentase pilihan kriteria lingkungan menunjukkan bahwa kriteria tersebut mewakili tujuan yang ingin dicapai yaitu menentukan alternatif pengendalian dampak dari emisi GRK. Setelah itu, terdapat alternatif biogas menjadi pilihan terbanyak atau prioritas responden dengan jumlah persentase sebesar 58,2%. Alternatif briket arang dan ketel uap menjadi pilihan berikutnya dengan masing-masing persentase sebesar 24,5% dan 17,3%.

4. KESIMPULAN

Produk tahu putih di industri tahu menghasilkan dampak *Global Warming Potential* (GWP) sebesar 0,0704 kg CO₂ eq/kg. Produk tahu goreng bahan tahu bakso menghasilkan dampak GWP sebesar 0,1346 kg CO₂ eq/kg. Proses penggorengan merupakan kontributor utama dampak GWP sebesar 0,0501 kg CO₂ eq/kg karena penggunaan kayu bakar sebagai bahan bakar penggorengan. Hasil nilai bobot kriteria menunjukkan bahwa yang menjadi pilihan terbanyak yaitu kriteria lingkungan dengan jumlah responden yang memilih sebanyak 65,4%. Hasil nilai bobot alternatif menunjukkan bahwa alternatif yang menjadi pilihan terbanyak atau prioritas yaitu alternatif biogas dengan jumlah responden yang memilih sebanyak 58,2%.

Perlunya dilakukan prakiraan dampak lingkungan menggunakan batasan lebih luas seperti *cradle to gate* atau *cradle to grave*, sehingga akan dapat diperoleh penilaian dampak emisi GRK pada industri tahu yang lebih menyeluruh. Analisis kriteria seperti ekonomi, sosial dalam penentuan alternatif pengendalian sehingga pengendalian dampak dapat ditinjau berbagai sisi.

DAFTAR PUSTAKA

Aitor P. Acero, Cristina Rodriguez dan Andreas Citroth. 2017. Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and their Impact Categories. *GreenDelta* 1.5.6: 1-23.

- Nugroho, M. E., Setyono, P., dan Rachmawati, S. (2024). Analisis Emisi Gas Rumah Kaca dengan *Life Cycle Assessment (LCA)* dan *Analytical Hierarchy Process (AHP)* Industri Tahu. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(6), 1504-1512, doi:10.14710/jil.22.6.1504-1512
- Arsad, Effendi. 2014. Sifat Fisik dan Kimia Wood Pellet dari Limbah Industri Perakayuan sebagai Sumber Energi Alternatif. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 6(1): 1-8.
- Astuti, Juli, dan Erika Fatma. 2018. Evaluasi Pemilihan Penyedia Jasa Kurir berdasarkan Metode *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. *Jurnal Manajemen Industri dan Logistik*. 1(1): 14-26.
- Badan Pusat Statistik. 2020. Catalog : 1101001. *Statistik Indonesia 2020* 1101001: 790. <https://www.bps.go.id/publication/2020/04/29/e9011b3155d45d70823c141f/statistik-indonesia-2020.html>.
- Bagaswara, Moch. Esa Adin, dan Yuswono Hadi. 2017. Analisis dan Rekayasa Proses Produksi Untuk Mengendalikan Environmental Impact Menggunakan Metode LCA. *Jurnal METRIS*. 18(2): 95-104.
- Budi Nining Widarti, Purnamasari Sihotang, Edhi Sarwono. 2016. Penggunaan Tongkol Jagung akan Meningkatkan Nilai Kalor pada Briket. 6(1): 16-21.
- Buletin Konsumsi Pangan. 2021. Kementerian Pertanian Republik Indonesia - Buletin Konsumsi Pangan - Volume 12 Nomor 1 Tahun 2021. *Kementerian Pertanian Republik Indonesia* 12(1): 32-43. <http://epublikasi.setjen.pertanian.go.id/arsip-buletin/53-buletin-konsumsi/772-buku-buletin-konsumsi-pangan-semester-i-2021>.
- Colomb, Vincent et al. 2015. AGRIBALYSE®, the French LCI Database for agricultural products: High quality data for producers and environmental labelling. *OCLE - Oilseeds & fats Crops and Lipids* 22(1): 1-6.
- Cooney, Greg. 2022. Best Practices for Life Cycle Assessment (LCA) of Direct Air Capture With Storage (DACs). *In United States Department of Energy*, 1-36.
- Denny Widhiyanuriyawan dan Nurkholis Hamidi. 2013. Variasi Temperatur Pemanasan Zeolite alam-NaOH untuk Pemurnian Biogas. *Jurnal Energi dan Manufaktur*. 6(1): 53-63.
- Djayanti, Silvy. 2015. Kajian Penerapan Produksi Bersih di Industri Tahu di Desa Jimbaran, Bandung, Jawa Tengah. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. 6(2): 75-80.
- Dwi, Astuti. 2019. Analisis Potensi Dampak Lingkungan dari Budidaya Tebu Menggunakan Pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)*. *Jurnal Litbang*. XV(1): 51-64.
- GreenDelta GmbH. 2020. "Basic Modelling of a Plastic Bottle." : 1-50
- Gustiana, Elia Giska dan Tri Widayatno. 2020. Penurunan Kadar COD BOD dan Tss Limbah Cair Pabrik Tahu. *The 11th University Research Colloquium 2020 Universitas Aisyiyah Yogyakarta*: 72-78.
- Hamonangan, Simon Pieter, Naniek Utami Handayani dan Arfan Bakhtiar. 2017. Evaluasi Dampak Proses Produksi dan Pengolahan Limbah Minuman Isotonik Mizon terhadap Lingkungan dengan Metode *Life Cycle Assessment*. *Industrial Engineering Online Journal*. 6(2): 1-14.
- Handayani dan Rani Irma. 2015. Pemanfaatan Aplikasi Expert Choice sebagai Alat Bantu dalam Pengambilan Keputusan (Studi Kasus: PT. Bit Teknologi Nusantara). 11(1): 53-59.
- Hasibuan, Harry Christian dan Farel H Napitupulu. 2013. Analisa Pemakaian Bahan Bakar dengan Melakukan Pengujian Nilai Kalor terhadap Performansi Ketel Uap Tipe Pipa Air dengan Kapasitas Uap 60 Ton/Jam. *e-Dinamis*. 4(4): 239-43.
- IPCC. 2006. "CHAPTER 1." : 1-21.
- Juriah, Siti dan Wulan Puspa Sari. 2018. Jurnal Analisis Kesehatan Klinikal Sains. *Klinikal Sains* 6(1): 24-29.
- KLHK. 2012. *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional, Buku 1 Pedoman Umum*. : 1-116.
- KLHK. 2021. "Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA)." Direktorat Jendral Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan : 1-82.
- Kurniawati, S. D., W. Supartono dan A. Suyantohadi. 2019. Life cycle assessment on a small scale tofu industry in Baturetno village - Bantul District - Yogyakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 365(1-6).
- Lolo, Elvis Umbu, Richardus Indra Gunawan, Agerippa Yanuranda Krismani dan Yonathan Suryo Pambudi. 2021. Penilaian Dampak Lingkungan Industri Tahu Menggunakan *Life Cycle Assessment (Studi Kasus: Pabrik Tahu Sari Murni Kampung Krajan, Surakarta)*. *Jurnal Serambi Engineering*. 6(4): 2337-47.
- Lu, Bingxiong, Xiangyuan Du dan Simin Huang. 2017. The Economic and Environmental Implications of Wastewater Management Policy in China: From the LCA Perspective. *Journal of Cleaner Production* 142: 3544-57.
- Maukar, Anastasia Lidya, Johan K. Runtuk dan Andira Andira. 2019. Perancangan Alat Produksi Tahu yang Higienis pada Industri Rumah Tangga. *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri* 3(1): 31.
- Muhammad, Katon, dan Yudi Syahrullah. 2022. Penerapan Life Cycle Assessment (LCA) untuk Mengurangi Dampak Lingkungan pada Proses Produksi IKM Knalpot Purbalingga. *SPECTA Journal of Technology*. 6(1): 1-9.
- Narti, Narti -, Sriyadi Sriyadi, Nur Rahmayani, dan Mahmud Syarif. 2019. Pengambilan Keputusan Memilih Sekolah dengan Metode AHP. *Jurnal Informatika*. 6(1): 143.
- Rahmadania. 2022. Pemanasan Global Penyebab Efek Rumah Kaca dan Penanggulangannya. : 1-13.
- Sari, Indah Permata, Ferren Liling Sia, Anik Nur Habyba dan Wawan Kurniawan. 2022. Penilaian Dampak Lingkungan Proses Produksi Tahu di Jakarta Barat Menggunakan Metode Life Cycle Assessment. *EnviroScienteeae* 18(3): 110.
- Sasongko, Aji, Indah Fitri Astuti dan Septya Maharani. 2017. Pemilihan Karyawan Baru dengan Metode AHP (Analytic Hierarchy Process). *Informatika Mulawarman : Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*. 12(2): 88.
- Sudarman, Suwahyo dan Sunyoto. 2015. Penerapan Ketel Uap (Steam Boiler) pada Industri Pengolahan Tahu untuk Meningkatkan Efisiensi dan Kualitas Produk. *Saintekno*. 13(1): 71-78.
- Sulaiman, Angga, Bhakti Nur Avianto, Ahmad Muksin dan Ian Zulfikar. 2021. Strategi Membangun Ketahanan Home Industry Unggulan Pariwisata di Destinasi Super Prioritas Mandalika. *ASSET: Jurnal Manajemen dan Bisnis*. 4(1).
- Susanto, Herdi, Jepri Yanto dan Wahyudin. 2020. Rancangan Alat Potong Tahu Tradisional untuk Industri Rumahan di Kabupaten Nagan Raya. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*. 6(1): 20.
- Sutanahaji, Alexander Tunggul, Fajri Anugroho dan Putri Ghassani Ramadhina. 2018. Pemetaan Distribusi Emisi Gas Karbon Dioksida (CO₂) dengan Sistem

Informasi Geografis (SIG) pada Kota Blitar. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 5(1): 34-42.
Windyasmara, Ludfia dan Kunty Novi Gamayanti. 2017. Pengaruh Penambahan Eceng Gondok dan Limbah Cair Pengolahan Tahu pada Produksi Biogas Terhadap Kualitas Fisik dan Kimia Sludge.

AGRISAINTELIKA: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian. 1(1): 9-14.
Zulhadi, Teuku, Sofyan M Saleh dan Renni Anggraini. 2017. Analisis Laik Fungsi Jalan Nasional Batas Kota Sigli - Beureuneun Menggunakan Metode *Analytic Hierarchy Process*. *Jurnal Teknik Sipil*. 1(1): 251-62.