

UNIVERSITAS GUNADARMA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI



**ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN DAN USULAN STRATEGI
PENANGANAN LIMBAH PRODUKSI KANCING LOGAM DENGAN
METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* DAN *ANALYTICAL NETWORK*
PROCESS BERBASIS BOCR**

Disusun Oleh:

Nama : Rudi Ikfan Maulana
NPM : 31421365
Program Studi : Teknik Industri
Pembimbing : Maulida Boru Butar Butar, S.T., M.Sc., Ph.D.

Diajukan Guna Melengkapi Sebagian Syarat
Dalam Mencapai Gelar Sarjana Strata Satu (S1)

JAKARTA

2025

PERNYATAAN ORIGINALITAS DAN PUBLIKASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini adalah mahasiswa Program Sarjana Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma:

Nama : Rudi Ikfan Maulana

NPM : 31421365

Judul Tugas Akhir : Analisis Dampak Lingkungan Dan Usulan Strategi Penanganan Limbah Produksi Kancing Logam Dengan Metode *Life Cycle Assessment* Dan *Analytical Network Process* Berbasis *Bocr*.

Tanggal Sidang : 14 Agustus 2025

Lulus Sidang : 14 Agustus 2025

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat adalah:

1. Dibuat dan diselesaikan sendiri dengan menggunakan hasil kuliah, tinjauan lapangan, dan bantuan buku-buku serta jurnal acuan yang tertera dalam referensi karya tugas akhir saya.
2. Bukan merupakan duplikasi karya tulis yang sudah dipublikasikan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana atau magister di universitas lain, kecuali pada bagian-bagian sumber informasi dicantumkan dengan referensi yang semestinya.
3. Bukan merupakan karya terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera di dalam referensi pada karya tugas akhir saya.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya dan dengan penuh kesadaran.

Jakarta, 28 Juli 2025



(Rudi Ikfan Maulana)

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : Analisis Dampak Lingkungan Dan Usulan Strategi
Penanganan Limbah Produksi Kancing Logam Dengan
Metode *Life Cycle Assessment* Dan *Analytical Network
Process* Berbasis BOCR

Nama Mahasiswa : Rudi Ikfan Maulana

NPM : 31421365

Tanggal Lulus : 14 Agustus 2025

PANITIA UJIAN

NO	NAMA	KEDUDUKAN
1.	Dr. Ravi Ahmad Salim	Ketua
2.	Prof. Dr. Wahyudi Priyono	Sekretaris
3.	Maulida Boru Butar Butar S.T. M.Sc. Ph.D.	Anggota
4.	Dr. Rakhma Oktavina, S.T., M.T.	Anggota
5.	Anita, S.T., M.T.	Anggota

Menyetujui,

Pembimbing

Bagian Sidang Ujian

(Maulida Boru Butar Butar, S.T., M.Sc., Ph.D.)

(Dr. Edi Sukirman, S.Si., MM., M.I.Kom.)

ABSTRAK

Rudi Ikfan Maulana/ 31421365

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN DAN USULAN STRATEGI PENANGANAN LIMBAH PRODUKSI KANCING LOGAM DENGAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* DAN *ANALYTICAL NETWORK PROCESS* BERBASIS BOCR

Penulisan Tugas Akhir. Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma, 2025.

Kata Kunci: Produk Kancing Logam, *Life Cycle Assessment*, *Analytical Network Process*, BOCR.

(xvi+88+Lampiran)

PT. XYZ adalah sebuah perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur pembuatan kancing logam. Perusahaan tersebut memiliki sebuah permasalahan di mana sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) belum dapat mereduksi logam berat secara optimal. Sehingga limbah yang dihasilkan dari proses produksi tersebut berpotensi berdampak terhadap ekosistem lingkungan. Selain itu, perusahaan juga belum dapat menemukan cara yang efektif dalam penanganan limbah tersebut. Permasalahan tersebut dapat diselesaikan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) di mana metode tersebut memungkinkan perusahaan dapat mengidentifikasi potensi dampak lingkungan yang mungkin terjadi dari proses produksi yang berlangsung. Selain itu, pemilihan strategi penanganan limbah dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Analytical Network Process* berbasis BOCR. Berdasarkan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) yang dilakukan, didapatkan bahwa potensi dampak lingkungan terbesar dari proses produksi yang dijalankan adalah *terrestrial ecotoxicity* dengan nilai *weighting* sebesar $6,2E+07$ pt. *Terrestrial ecotoxicity* adalah kategori dampak lingkungan yang mengukur potensi zat berbahaya yang mencemari dan membahayakan ekosistem daratan, termasuk tanah, organisme tanah, dan makhluk hidup lainnya. berdasarkan potensi dampak lingkungan tersebut dirumuskan tiga alternatif solusi penanganan limbah. Pertama adalah penambahan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) ke dalam limbah. Kalsium hidroksida berguna untuk meningkatkan pH limbah menjadi basa kuat. Kadar pH yang kuat dapat meleburkan kromium menjadi $Cr(OH)_3$. Kedua adalah dengan menambahkan bakteri *indigenous* ke dalam limbah yang mana dapat menurunkan atau mereduksi Pb, Hg, Cu, dan Cr. Ketiga adalah dengan mengubah *sludge* atau endapan lumpur limbah menjadi pupuk dengan menambahkan kotoran hewan, kapur, dan kompos. Berdasarkan metode ANP – BOCR didapatkan bahwa solusi alternatif kedua menjadi prioritas untuk diaplikasikan dengan nilai *additive* dan *multiple* tertinggi dibandingkan alternatif lain yaitu 0,1636 dan 1,8739. Alternatif pertama menempati posisi kedua dengan nilai *additive* dan *multiple* adalah sebesar 0,0674 dan 0,9550. Alternatif ketiga menempati posisi ketiga dengan nilai *additive* dan *multiple* sebesar 0,0350 dan 0,5607. Nilai *additive* dan *multiple* mengartikan bahwa alternatif tersebut dapat diproyeksikan ke dalam kebijakan jangka pendek maupun jangka panjang. Alternatif kedua dilihat sebagai alternatif yang paling memunculkan banyak manfaat dan peluang, dan paling memunculkan sedikit resiko dan biaya.

Daftar Pustaka (1982-2023)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya dalam penulisan Tugas Akhir yang berjudul **“ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN DAN USULAN STRATEGI PENANGANAN LIMBAH PRODUKSI KANCING LOGAM DENGAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* DAN *ANALYTICAL NETWORK PROCESS* BERBASIS BOCR”**. Penulisan Tugas Akhir ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Strata 1 (S1). Penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan sangat baik berkat doa, dukungan, bantuan, dan bimbingan dari banyak pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. E.S Margianti., SE., MM., selaku Rektor Universitas Gunadarma.
2. Prof. Dr. Ing Adang Suhendar, S.Si., Skom., MSc. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Gunadarma.
3. Dr. Ir. Rakhma Oktavina, MT. selaku Ketua Jurusan Program Studi Teknik Industri Universitas Gunadarma.
4. Dr. Edi Sukirman S.Si., M.M., M.I.Kom., selaku Kepala Bagian Sidang Ujian Skripsi Universitas Gunadarma.
5. Maulida Boru Butar Butar, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan petunjuk yang sangat bermanfaat hingga selesainya penulisan tugas akhir ini.
6. Orang tua penulis yang telah memberikan doa dan semangat sehingga penulis mampu menyelesaikan penulisan tugas akhir ini.
7. Bapak Anang dan Mas Yoga selaku mentor dalam menulis tugas akhir ini.
8. Keluarga besar Laboratorium Teknik Industri Dasar yang selalu memberikan dukungan dan bantuan.
9. Teman-teman angkatan 2021 yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
10. Seluruh pihak terkait yang telah memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian penulisan tugas akhir ini.

Penulis menyadari adanya kekurangan dalam penyusunan penulisan Tugas Akhir ini. Penulis berharap agar penulisan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis maupun pembaca secara umum.

Jakarta, 28 Juli 2025

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized 'R' followed by a series of loops and a final horizontal stroke.

Rudi Ikfan Maulana

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORIGINALITAS DAN PUBLIKASI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Perumusan Masalah	I-2
1.3 Pembatasan Masalah	I-2
1.4 Tujuan Penulisan.....	I-3
1.5 Sistematika Penulisan	I-3
 BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Definisi Industri	II-1
2.2 Definisi Logam.....	II-1
2.3 Proses Produksi	II-1
2.4 Definisi <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA).....	II-2
2.5 <i>Framework Life Cycle Assessment</i> (LCA).....	II-2
2.6 Standar dan Kebijakan Lingkungan	II-3
2.6.1 <i>International Standard Organization</i> (ISO)	II-3
2.6.2 Standar Nasional Indonesia (SNI).....	II-4
2.7 Karakteristik Spesifik Dari <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) ..	II-6
2.8 Metodologi <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA).....	II-6
2.8.1 <i>Goal and Scope Definition</i>	II-7
2.8.2 <i>Life Cycle Inventory</i> (LCI).....	II-8

2.8.3	<i>Life Cycle Impact Assessment (LCIA)</i>	II-8
2.8.4	<i>Interpretation</i>	II-9
2.9	<i>Software LCA</i>	II-9
2.10	Definisi <i>Analytical Network Process (ANP)</i>	II-10
2.11	Klasifikasi Hierarki	II-11
2.12	Supermatriks dan Pembobotan.....	II-12
2.13	Landasan <i>Analytical Network Process (ANP)</i>	II-13
2.14	Prinsip Dasar <i>Analytical Network Process (ANP)</i>	II-14
2.15	Metodologi <i>Analytical Network Process (ANP)</i>	II-15
2.16	ANP Dalam Pendekatan BOCR.....	II-15
2.17	Penelitian Terdahulu	II-16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Tahapan Penelitian	III-1
3.2	Penjelasan <i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian	III-2
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Pengumpulan Data	IV-1
4.1.1	Proses Produksi	IV-1
4.1.2	Kondisi Eksisting Sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah	IV-2
4.1.3	<i>Input dan Output</i> Proses Produksi.....	IV-3
4.1.4	Alternatif Usulan Penanganan Limbah	IV-5
4.2	Pengolahan Data.....	IV-7
4.2.1	<i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	IV-7
4.2.1.1	<i>Goal and Scope</i>	IV-7
4.2.2.2	<i>Life Cycle Inventory (LCI)</i>	IV-8
4.2.2.3	<i>Life Cycle Impact Assessment (LCIA)</i>	IV-11
4.2.2.4	<i>Interpretation</i>	IV-14
4.2.2	<i>Analytical Network Process - BOCR</i>	IV-14
4.2.2.1	Model ANP BOCR	IV-14
4.2.2.2	Daftar Responden.....	IV-15
4.2.2.3	Menentukan Eigen Vektor Merit dengan	

	Merit.....	IV-16
4.2.2.4	Menentukan Eigen Vektor Kriteria dengan Kriteria	IV-18
4.2.2.5	Menentukan Eigen Vektor Sub Kriteria dengan Sub Kriteria	IV-24
4.2.2.6	Menentukan Eigen Vektor Alternatif dengan Alternatif	IV-36
4.2.2.7	Supermatriks	IV-58
4.2.2.8	Menentukan Prioritas Alternatif Berdasarkan Tabel BOCR.....	IV-59

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	V-1
5.2	Saran.....	V-2

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Skala Penilaian dan Skala Numerik	II-14
Tabel 2.2 Tenaga Kerja Tidak Langsung Non-Perkantoran	II-16
Tabel 4.1 Mutu Air Limbah di PT. XYZ	IV-3
Tabel 4.2 <i>Life Cycle Inventory</i> Proses Peleburan (<i>Melting</i>)	IV-8
Tabel 4.3 <i>Life Cycle Inventory</i> Proses Pencetakan (<i>Die Casting</i>)	IV-9
Tabel 4.4 <i>Life Cycle Inventory</i> Proses Pengkasaran (<i>Polishing Rough - Edges</i>).....	IV-9
Tabel 4.5 <i>Life Cycle Assessment</i> Proses Penghalusan (<i>Finishing - Polishing</i>)	IV-9
Tabel 4.6 <i>Life Cycle Inventory</i> Proses Pembilasan (<i>Washing</i>)	IV-10
Tabel 4.7 <i>Life Cycle Inventory</i> Proses Pengeringan (<i>Drying</i>).....	IV-10
Tabel 4.8 <i>Life Cycle Inventory</i> Proses Pelapisan (<i>Electroplating</i>)	IV-10
Tabel 4.9 <i>Characterization</i> Tahap LCIA	IV-12
Tabel 4.10 <i>Normalization</i> Tahap LCIA	IV-13
Tabel 4.11 <i>Weighting</i> Tahap LCIA.....	IV-13
Tabel 4.12 Eigen Vektor Merit – Merit Responden Pertama.....	IV-16
Tabel 4.13 Eigen Vektor Merit – Merit Responden Kedua	IV-16
Tabel 4.14 Kesimpulan Prioritas Merit.....	IV-17
Tabel 4.15 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Benefits</i> Responden Pertama	IV-18
Tabel 4.16 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Opportunities</i> Responden Pertama.....	IV-19
Tabel 4.17 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Costs</i> Responden Pertama	IV-19
Tabel 4.18 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Risks</i> Responden Pertama.....	IV-20
Tabel 4.19 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Benefits</i> Responden Kedua.....	IV-20
Tabel 4.20 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Opportunities</i> Responden Kedua..	IV-21
Tabel 4.21 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Costs</i> Responden Kedua.....	IV-21
Tabel 4.22 Eigen Vektor Kriteria Pada <i>Risks</i> Responden Kedua	IV-22
Tabel 4.23 Kesimpulan Prioritas <i>Benefits</i>	IV-22

Tabel 4.24	Kesimpulan Prioritas <i>Opportunities</i>	IV-23
Tabel 4.25	Kesimpulan Prioritas <i>Costs</i>	IV-23
Tabel 4.26	Kesimpulan Prioritas <i>Risks</i>	IV-23
Tabel 4.27	Eigen Vektor <i>Benefits</i> – Faktor Ekonomi Responden Pertama.....	IV-24
Tabel 4.28	Eigen Vektor <i>Benefits</i> – Faktor Lingkungan Responden Pertama.....	IV-25
Tabel 4.29	Eigen Vektor <i>Benefits</i> – Faktor Sosial Responden Pertama	IV-25
Tabel 4.30	Eigen Vektor <i>Opportunities</i> – Manajerial Responden Pertama.....	IV-26
Tabel 4.31	Eigen Vektor <i>Opportunities</i> – Regulasi Responden Pertama ...	IV-26
Tabel 4.32	Eigen Vektor <i>Costs</i> – Operasional Responden Pertama	IV-27
Tabel 4.33	Eigen Vektor <i>Costs</i> – Administrasi Responden Pertama.....	IV-27
Tabel 4.34	Eigen Vektor <i>Risks</i> – SDM Responden Pertama	IV-28
Tabel 4.35	Eigen Vektor <i>Risks</i> – Sistem Responden Pertama	IV-28
Tabel 4.36	Eigen Vektor <i>Risks</i> – Manajerial Responden Pertama.....	IV-28
Tabel 4.37	Eigen Vektor <i>Benefits</i> – Faktor Ekonomi Responden Kedua... ..	IV-29
Tabel 4.38	Eigen Vektor <i>Benefits</i> – Faktor Lingkungan Responden Kedua	IV-29
Tabel 4.39	Eigen Vektor <i>Benefits</i> – Faktor Sosial Responden Kedua.....	IV-30
Tabel 4.40	Eigen Vektor <i>Opportunities</i> – Manajerial Responden Kedua ..	IV-30
Tabel 4.41	Eigen Vektor <i>Opportunities</i> – Regulasi Responden Kedua.....	IV-31
Tabel 4.42	Eigen Vektor <i>Costs</i> – Operasional Responden Kedua.....	IV-31
Tabel 4.43	Eigen Vektor <i>Costs</i> – Administrasi Responden Kedua	IV-32
Tabel 4.44	Eigen Vektor <i>Risks</i> – SDM Responden Kedua	IV-32
Tabel 4.45	Eigen Vektor <i>Risks</i> – Sistem Responden Kedua.....	IV-33
Tabel 4.46	Eigen Vektor <i>Risks</i> – Manajerial Responden Kedua	IV-33
Tabel 4.47	Kesimpulan Prioritas <i>Benefits</i> – Faktor Ekonomi.....	IV-33
Tabel 4.48	Kesimpulan Prioritas <i>Benefits</i> – Faktor Lingkungan	IV-34
Tabel 4.49	Kesimpulan Prioritas <i>Benefits</i> – Faktor Sosial.....	IV-34
Tabel 4.50	Kesimpulan Prioritas <i>Opportunities</i> – Manajerial	IV-34

Tabel 4.51	Kesimpulan Prioritas <i>Opportunities</i> – Regulasi	IV-35
Tabel 4.52	Kesimpulan Prioritas <i>Costs</i> – Operasional.....	IV-35
Tabel 4.53	Kesimpulan Prioritas <i>Costs</i> – Administrasi	IV-35
Tabel 4.54	Kesimpulan Prioritas <i>Risks</i> – SDM.....	IV-35
Tabel 4.55	Kesimpulan Prioritas <i>Risks</i> – Sistem	IV-36
Tabel 4.56	Kesimpulan Prioritas <i>Risks</i> – Manajerial	IV-36
Tabel 4.57	Alternatif Berdasarkan Efisiensi Sumber Daya Produksi Menurut Responden 1 dan 2	IV-37
Tabel 4.58	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Efisiensi Sumber Daya Produksi	IV-37
Tabel 4.59	Alternatif Berdasarkan Penghematan Biaya Operasional Menurut Responden 1 dan 2	IV-38
Tabel 4.60	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Penghematan Biaya Operasional	IV-38
Tabel 4.61	Alternatif Berdasarkan Efektivitas Reduksi Logam Berat Menurut Responden 1 dan 2	IV-39
Tabel 4.62	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Efektivitas Reduksi Logam Berat	IV-39
Tabel 4.63	Alternatif Berdasarkan Pengurangan Dampak Lingkungan Menurut Responden 1 dan 2	IV-40
Tabel 4.64	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pengurangan Dampak Lingkungan	IV-40
Tabel 4.65	Alternatif Berdasarkan Memperbagus Citra Perusahaan Menurut Responden 1 dan 2	IV-40
Tabel 4.66	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Memperbagus Citra Perusahaan.....	IV-41
Tabel 4.67	Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Kesadaran Lingkungan Menurut Responden 1 dan 2	IV-41
Tabel 4.68	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Kesadaran Lingkungan	IV-42

Tabel 4.69	Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Keselamatan Kerja Menurut Responden 1 dan 2	IV-42
Tabel 4.70	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Keselamatan Kerja.....	IV-43
Tabel 4.71	Alternatif Berdasarkan Inovasi Teknologi Menurut Responden 1 dan 2.....	IV-43
Tabel 4.72	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Inovasi Teknologi.....	IV-44
Tabel 4.73	Alternatif Berdasarkan Peluang Produk Baru Menurut Responden 1 dan 2	IV-44
Tabel 4.74	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pertimbangan Kriteria Peluang Produk Baru	IV-44
Tabel 4.75	Alternatif Berdasarkan Pertimbangan Sub Kriteria Pasar Yang Lebih Besar Menurut Responden 1 dan 2	IV-45
Tabel 4.76	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pasar Yang Lebih Besar..	IV-45
Tabel 4.77	Alternatif Berdasarkan Sertifikasi Menurut Responden 1 dan 2.....	IV-46
Tabel 4.78	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Sertifikasi	IV-46
Tabel 4.79	Alternatif Berdasarkan <i>Eco-Innovation</i> Menurut Responden 1 dan 2	IV-47
Tabel 4.80	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan <i>Eco-Innovation</i>	IV-47
Tabel 4.81	Alternatif Berdasarkan Biaya Investasi Awal Menurut Responden 1 dan 2.....	IV-48
Tabel 4.82	Alternatif Berdasarkan Biaya Investasi Awal	IV-48
Tabel 4.83	Alternatif Berdasarkan Biaya Pemeliharaan Menurut Responden 1 dan 2	IV-49
Tabel 4.84	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Pemeliharaan.....	IV-49
Tabel 4.85	Alternatif Berdasarkan Biaya Pelatihan SDM Menurut Responden 1 dan 2	IV-49
Tabel 4.86	Kesimpulan Alternatif Pertimbangan Biaya Pelatihan SDM....	IV-50
Tabel 4.87	Alternatif Berdasarkan Biaya Resiko Tak Terduga Menurut Responden 1 dan 2	IV-50

Tabel 4.88	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Resiko Tak Terduga	IV-50
Tabel 4.89	Alternatif Berdasarkan Biaya perizinan Menurut Responden 1 dan 2	IV-51
Tabel 4.90	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya perizinan.....	IV-51
Tabel 4.91	Alternatif Berdasarkan Biaya Audit Menurut Responden 1 dan 2	IV-52
Tabel 4.92	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Audit	IV-52
Tabel 4.93	Alternatif Berdasarkan Pelatihan Baru Menurut Responden 1 dan 2	IV-53
Tabel 4.94	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pelatihan Baru	IV-53
Tabel 4.95	Alternatif Berdasarkan Pekerja Tidak Paham Menurut Responden 1 dan 2	IV-53
Tabel 4.96	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pertimbangan Pekerja Tidak Paham.....	IV-54
Tabel 4.97	Alternatif Berdasarkan Residu Berbahaya Baru Menurut Responden 1 dan 2	IV-54
Tabel 4.98	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Residu Berbahaya Baru...	IV-55
Tabel 4.99	Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis Menurut Responden 1 dan 2	IV-55
Tabel 4.100	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis.....	IV-56
Tabel 4.101	Alternatif Berdasarkan Pembuatan SOP Baru Menurut Responden 1 dan 2	IV-56
Tabel 4.102	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pembuatan SOP Baru.....	IV-56
Tabel 4.103	Alternatif Berdasarkan <i>Monitoring</i> Menurut Responden 1 dan 2	IV-57
Tabel 4.104	Kesimpulan Alternatif Berdasarkan <i>Monitoring</i>	IV-57
Tabel 4.105	Supermatriks ANP – BOCR	IV-58
Tabel 4.106	Sintesis Prioritas Akhir BOCR	IV-59

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema <i>Life Cycle Assessment</i>	II-7
Gambar 2.2 Struktur Jaringan Umpan Balik Pada ANP	II-10
Gambar 2.3 Jaringan Supermatriks	II-12
Gambar 2.4 Contoh Jaringan ANP – BOCR.....	II-16
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian	III-1
Gambar 4.1 <i>Flowchart</i> Proses Produksi	IV-1
Gambar 4.2 Tahapan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA).....	IV-3
Gambar 4.3 Diagram <i>Input-Output</i>	IV-4
Gambar 4.4 Model ANP – BOCR.....	IV-14

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Hasil Kuesioner	L-1
Lampiran 2 Lembar Bimbingan	L-2
Lampiran 3 Langkah – Langkah OpenLCA	L-3
Lampiran 4 CV Responden	L-4
Lampiran 5 Contoh Perhitungan Eigen Vektor	L-5

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri logam merupakan salah satu industri yang semakin meningkat pesat perkembangannya di Indonesia, bahkan dalam pasar global. Indonesia memiliki berbagai sektor industri yang memanfaatkan logam sebagai bahan baku utamanya, salah satunya adalah industri *fashion*. Pada industri *fashion*, logam dimanfaatkan untuk membuat dekorasi atau aksesoris yang berguna untuk menambah nilai estetika atau fungsional pada pakaian. Logam-logam seperti tembaga, aluminium, atau seng, digunakan untuk membuat produk seperti kancing, resleting, atau hiasan pakaian. Salah satu perusahaan manufaktur yang bergerak di industri tersebut adalah PT. XYZ yang memanfaatkan logam sebagai bahan baku utama dalam pembuatan kancing. PT. XYZ memproduksi 947000 pcs kancing dengan berbagai jenis pada periode ini. Kegiatan produksi tersebut berpotensi menghasilkan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang dapat memberikan dampak negatif terhadap ekosistem serta menimbulkan risiko terhadap kesehatan manusia.

Dalam proses produksinya, perusahaan menghasilkan limbah cair yang berpotensi mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3), terutama logam berat seperti timbal (Pb), nikel (Ni), dan seng (Zn). Penanganan limbah cair tersebut menjadi isu krusial mengingat *volume* yang dihasilkan cukup signifikan dan kandungannya dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan apabila tidak ditangani secara tepat. Perusahaan telah memiliki Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) untuk menangani limbah B3 cair, akan tetapi proses penanganan limbah pada sistem tersebut masih belum optimal, sehingga masih terdapat kandungan logam berbahaya dalam buangan air limbah. Masalah yang dihadapi perusahaan saat ini adalah perusahaan belum memahami apa dampak lingkungan yang dapat terjadi dari proses produksi yang dilakukan dan perbaikan penanganan limbah yang lebih optimal.

Permasalahan yang dihadapi perusahaan tersebut dapat diselesaikan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) yang digunakan sebagai upaya untuk memahami dampak lingkungan secara menyeluruh dari aktivitas produksi di PT. XYZ. Metode LCA dilakukan dengan mengidentifikasi masukan (*input*) dan luaran (*output*) dari seluruh proses produksi yang dilakukan. Selanjutnya, dalam merumuskan alternatif usulan penanganan limbah B3 yang lebih efektif dan berkelanjutan, digunakan metode *Analytical Network Process* dengan pendekatan *Benefits, Opportunities, Costs, and Risks* (ANP – BOCR). Metode ini diharapkan dapat memungkinkan pengambilan keputusan yang komprehensif dengan mempertimbangkan berbagai aspek strategis dan operasional, sehingga solusi yang dipilih tidak hanya ramah lingkungan, namun dapat diterapkan dalam jangka panjang.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah merupakan dasar pertanyaan yang menjadi fokus penelitian untuk dicari jawabannya. Berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian di PT. XYZ.

1. Bagaimana dampak lingkungan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ?
2. Bagaimana strategi penanganan limbah yang dihasilkan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ?
3. Bagaimana usulan perbaikan penanganan limbah di PT. XYZ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah merupakan penjelasan mengenai ruang lingkup penelitian yang digunakan sebagai pedoman dalam penulisan. Berikut merupakan batasan masalah dari penulisan tugas akhir.

1. Pengambilan data dilakukan di PT. XYZ.
2. Metode yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan adalah ReCiPe 2016 H/H.

3. *Database Life Cycle Impact Assessment* yang digunakan adalah *ILCD Database Systems*.
4. Pengolahan data *Life Cycle Assessment* menggunakan *software openLCA 2.4.1*.
5. Batasan sistem yang digunakan dalam *Life Cycle Assessment* adalah *gate to gate*.
6. Pengolahan data metode *Analytical Network Process* - BOCR menggunakan Microsoft Excel.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian merupakan pernyataan yang menggambarkan sasaran akhir atau capaian yang diharapkan dari suatu kegiatan penelitian. Berikut merupakan tujuan penulisan yang ingin dicapai.

1. Mengidentifikasi dampak lingkungan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ.
2. Menganalisa strategi penanganan limbah yang dihasilkan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ.
3. Memberikan usulan perbaikan penanganan limbah di PT. XYZ.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan merupakan susunan atau struktur bab dan subbab yang disusun secara sistematis untuk memudahkan pembaca dalam memahami alur logis dari suatu penulisan. Berikut merupakan sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini.

BAB I PENDAHULUAN

Pendahuluan merupakan bab yang berisi latar belakang, rumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penulisan, dan sistematika penulisan

BAB II LANDASAN TEORI

Landasan teori merupakan bab yang berisi teori-teori terdahulu yang relevan dengan penelitian yang dilakukan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan bab yang berisi *flowchart* metodologi penelitian yang menjelaskan tahapan dalam melakukan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan merupakan bab yang berisi aliran produksi dan pembahasan mengenai analisis dampak lingkungan yang menggunakan metode *Life Cycle Assessment* dan penentuan strategi penanganan limbah yang menggunakan metode *Analytical Network Process* (ANP) dengan pendekatan *Benefits, Opportunities, Costs and Risks* (BOCR).

BAB V PENUTUP

Penutup merupakan bab yang berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran yang berisi rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Definisi Industri

Menurut UU Perindustrian No. 5 Tahun 1984 menjelaskan bahwa industri adalah kegiatan ekonomi yang mengelola bahan mentah, bahan baku, dan barang setengah jadi, dan atau barang dengan nilai yang lebih tinggi untuk penggunaannya termasuk kegiatan rancangan bangun dan perekayasaan industri.

Menurut Dumairy (1996), istilah "industri" memiliki dua makna utama. Pertama, industri merujuk pada kelompok perusahaan yang memproduksi jenis barang yang sama, seperti industri tekstil yang terdiri dari berbagai perusahaan penghasil produk tekstil. Kedua, industri juga dapat diartikan sebagai sektor ekonomi yang mencakup aktivitas produktif dalam mengolah bahan mentah menjadi barang setengah jadi atau barang jadi, yang prosesnya dapat dilakukan secara manual, mekanis, atau menggunakan teknologi listrik.

2.2 Definisi Logam

Logam adalah zat dengan konduktivitas tinggi listrik, kelenturan, dan kilau, yang kehilangan elektron mereka untuk membentuk kation (Khlif & Hamza-Chaffai dalam Adhani, 2017). Sistem informasi B3 & POPs, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mendefinisikan logam sebagai unsur kimia yang siap membentuk ion (kation) dan memiliki ikatan logam. Logam merupakan salah satu dari tiga kelompok unsur yang dibedakan oleh sifat ionisasi dan ikatan, bersama dengan metaloid dan nonlogam.

2.3 Proses Produksi

Menurut Assauri (2008) berpendapat bahwa proses produksi adalah cara, metode dan teknik untuk menciptakan atau menambah kegunaan suatu barang atau jasa dengan menggunakan sumber-sumber seperti tenaga kerja, bahan-bahan,

dan dana yang ada. Produksi adalah proses di mana bahan mentah diubah menjadi barang jadi melalui serangkaian operasi (

2.4 Definisi *Life Cycle Assessment* (LCA)

Life Cycle Assessment (LCA) adalah sebuah mekanisme untuk menganalisa dan memperhitungkan dampak lingkungan dari suatu produk dalam setiap tahapan daur hidupnya. Dimulai dari persiapan bahan mentah, proses produksi, penjualan dan transportasi, serta pembuangan produk (ISO, 14040:1997). *Life Cycle Assessment* (LCA) adalah metode sistematis untuk menilai dampak lingkungan suatu produk atau sistem dengan melakukan evaluasi kuantitatif terhadap semua aliran masuk dan keluar (*exchange flow*) yang terjadi dalam setiap tahap siklus hidupnya. Proses ini mencakup pengumpulan dan analisis data terkait input dan output material serta energi, mulai dari ekstraksi bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga pembuangan akhir produk. LCA adalah suatu metode yang menggunakan alat manajemen lingkungan di dalam berbagai penelitian dan pembuatan kebijakan. LCA menyediakan pendekatan ilmiah yang sistematis untuk mengukur konsumsi sumber daya dan emisi lingkungan ke udar, air, dan tanah yang terkait produk, proses, dan layanan. LCA mempertimbangkan semua tahap siklus hidup produk dari pengambilan dan pemrosesan bahan mentah, manufaktur, transportasi dan distribusi, penggunaan atau pemakaian ulang, serta daur ulang dan pengelolaan limbah untuk mengakses dampak lingkungan. LCA adalah alat pengambilan keputusan bagi pemerintah dan bisnis. Sebagian besar pengukuran LCA akan dilakukan dengan menjumlahkan unit energi yang dikonsumsi dalam pengambilan bahan mentah, transportasi, manufaktur, distribusi, dan pembuangan akhir suatu produk atau layanan (Narayana Pati, 2023).

2.5 *Famework Life Cycle Assessment* (LCA)

Prinsip LCA adalah pendekatan ilmiah untuk mencakup semua aktivitas yang terlibat dalam pembuatan produk atau layanan. Implementasi LCA dapat diadopsi dalam berbagai studi sebagai berikut (Narayana Pati, 2023).

1. Desain

Semua fase dalam siklus hidup produk diintegrasikan sejak awal, sehingga desain mempertimbangkan total dampak lingkungan dari ekstraksi bahan mentah hingga akhir pakai.

2. Pabrik

Pabrik merupakan pusat kegiatan transformasi bahan baku menjadi produk jadi, sehingga menjadi salah satu titik dengan potensi dampak lingkungan yang tinggi

3. Rantai Pasok

Rantai pasok melibatkan seluruh perjalanan produk dari bahan baku, manufaktur, distribusi, ke tangan konsumen.

4. Pemasaran

Departemen pemasaran bertugas mengkomunikasikan nilai produk ke konsumen, termasuk nilai keberlanjutan.

2.6 Standar dan Kebijakan Lingkungan

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) standar merupakan ukuran tertentu yang dipakai sebagai patokan atau baku. Standar kebijakan lingkungan adalah seperangkat pedoman dan prinsip yang ditetapkan oleh organisasi untuk mengelola dampak lingkungan dari aktivitasnya secara sistematis dan berkelanjutan. Standar ini terbagi menjadi dua, yaitu standar internasional dan standar nasional. Berikut merupakan pembahasan mengenai standar kebijakan lingkungan.

2.6.1 International Standard Organization (ISO)

ISO 14000 mengacu pada standar dan panduan yang digunakan untuk membantu dalam menangani masalah lingkungan. Standar internasional ini adalah spesifikasi dari apa yang diperlukan agar sistem manajemen lingkungan menerima sertifikasi atau pendaftaran di bawah ISO. Berikut merupakan jenis seri ISO 14040 tentang *Life Cycle Assessment* tercantum sebagai berikut (Narayana Pati, 2023).

1. ISO 14001–1996, 2004, *and* 2016 EMS.
2. ISO 14004–2016 *provides guidance and implementation of EMSs.*
3. ISO 14040–1997 *and* 2006 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework.*
4. ISO 14041–1998 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—goal and scope definition and inventory analysis (withdrawn).*
5. ISO 14042–2000 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Life Cycle Impact Assessment (withdrawn).*
6. ISO 14043–2000 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Life Cycle Interpretation (withdrawn).*
7. ISO 14044–2006 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—requirements and guidelines.*

2.6.2 Standar Nasional Indonesia (SNI)

Standar nasional menetapkan persyaratan suatu sistem manajemen lingkungan yang memungkinkan suatu organisasi untuk mengembangkan dan melaksanakan kebijakan dan tujuan yang memperhatikan persyaratan hukum dan informasi tentang aspek lingkungan yang penting. Standar ini telah disusun agar dapat diterapkan pada semua jenis dan ukuran organisasi dan juga dengan kondisi geografis, budaya, dan sosial yang beragam (SNI, 2012). Berikut merupakan kebijakan pemerintah dalam manajemen lingkungan.

1. Undang-Undang Republik Indonesia

Berbagai ketentuan tentang penegakan hukum sebagaimana tercantum dalam UU Lingkungan Hidup, maka dalam UU Pengelolaan Lingkungan Hidup diadakan berbagai perubahan untuk memudahkan penerapan ketentuan yang berkaitan dengan penegakan hukum yaitu UU No. 4 Tahun 1982 diganti dengan UU No. 23 Tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup dan kemudian diatur lebih lanjut dalam peraturan pelaksanaannya. Undang-undang No.23 Tahun 1997 merupakan salah satu alat yang kuat dalam melindungi lingkungan hidup dan ditunjang dengan peraturan perundang-undangan sectoral. Hal ini mengingat pengelolaan

lingkungan hidup memerlukan koordinasi secara sectoral dilakukan oleh departemen dan Lembaga pemerintahan non-departemen sesuai dengan bidang tugas dan tanggungjawab masing-masing, seperti undang-undang No. 22 Tahun 1992 tentang Penataan Ruang dan diikuti pengaturan lebih lanjut dengan Peraturan Pemerintah, Keputusan Presiden, Keputusan Menteri, Peraturan Daerah, maupun Keputusan Gubernur (UURI, 1997).

2. Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL)

AMDAL diperkenalkan pertama kali tahun 1969 oleh National Environmental Policy Act di Amerika Serikat. Menurut UU No. 23/1997 tentang pengelolaan lingkungan hidup dan PP No. 27/1999 tentang Analisis mengenai dampak lingkungan hidup (AMDAL) adalah kajian mengenai dampak besar dan penting suatu usaha dan/atau kegiatan yang direncanakan pada lingkungan hidup yang diperlukan bagi proses pengambilan keputusan tentang penyelenggaraan usaha dan/atau kegiatan. AMDAL merupakan kajian dampak besar dan penting terhadap lingkungan hidup, dibuat pada tahap perencanaan, dan digunakan untuk pengambilan keputusan. Hal-hal yang dikaji dalam proses AMDAL: aspek fisik-kimia, ekologi, sosial ekonomi, sosial budaya, dan kesehatan masyarakat sebagai pelengkap studi kelayakan suatu rencana usaha dan/atau kegiatan. Analisis mengenai dampak lingkungan hidup di satu sisi merupakan bagian studi kelayakan untuk melaksanakan suatu rencana usaha dan/atau kegiatan, di sisi lain merupakan syarat yang harus dipenuhi untuk mendapatkan izin melakukan usaha dan/atau kegiatan. Berdasarkan analisis ini dapat diketahui secara lebih jelas dampak besar dan penting terhadap lingkungan hidup, baik dampak negatif maupun dampak positif yang akan timbul dari usaha dan/atau kegiatan sehingga dapat dipersiapkan langkah untuk menanggulangi dampak negatif dan mengembangkan dampak positif. Untuk mengukur atau menentukan dampak besar dan penting tersebut di antaranya digunakan kriteria.

- a. Besarnya jumlah manusia yang akan terkena dampak rencana usaha dan/atau kegiatan.

- b. Luas wilayah penyebaran dampak.
- c. Intensitas dan lamanya dampak berlangsung.
- d. Banyaknya komponen lingkungan hidup lain yang akan terkena dampak.
- e. Sifat kumulatif dampak.
- f. Berbalik (*reversible*) atau tidak berbaliknya (*irreversible*) dampak.

2.7 Karakteristik Spesifik Dari *Life Cycle Assessment* (LCA)

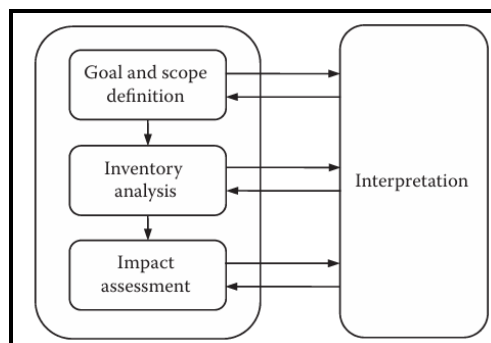
Life Cycle Assessment (LCA) adalah metode sistematis untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk, proses, atau layanan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga pembuangan akhir. Metode ini memiliki karakteristik dan batasan tertentu yang perlu dipahami untuk penerapannya yang efektif. Berikut merupakan karakteristik dari *Life Cycle Assessment* (LCA) menurut Jolliet (2016).

1. *Life Cycle Assessment* (LCA) memiliki karakteristik utama berupa pendekatan holistik yang mencakup seluruh siklus hidup produk atau proses, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga pembuangan akhir. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi komprehensif terhadap dampak lingkungan.
2. *Life Cycle Assessment* (LCA) menghubungkan dampak lingkungan ini dengan fungsi sistem, yang memfasilitasi perbandingan antara alternatif.
3. Pengukuran dibuat sepanjang siklus hidup produk atau layanan, dari buaian hingga kuburan, dari akuisisi bahan baku hingga pengelolaan limbah..
4. LCA mencakup semua masalah lingkungan utama yang dikenal saat ini (pemanasan global, ekstraksi sumber daya, dampak zat beracun pada manusia dan ekosistem, penggunaan lahan, dll.).

2.8 Metodologi *Life Cycle Assessment* (LCA)

Berdasarkan definisi yang diberikan dalam standar internasional (ISO) dan oleh *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), LCA terdiri dari empat tahap utama, yaitu penetapan tujuan dan ruang lingkup (*goal and scope definition*), analisis inventaris daur hidup (*life cycle inventory analysis*),

penilaian dampak daur hidup (*life cycle impact assessment*), dan interpretasi. Berikut merupakan Gambar 2.1 Skema *Life Cycle Assessment*.



Gambar 2.1 Skema *Life Cycle Assessment*
(Sumber: Jolliet, 2016)

Life Cycle Assessment (LCA) semakin banyak digunakan untuk melakukan meta-analisis, yaitu dengan meninjau seluruh studi LCA yang tersedia terkait suatu topik tertentu, seperti opsi pengolahan limbah padat dan pemanfaatan biomassa guna menyediakan rentang indikator lingkungan utama dalam siklus hidup. Berikut merupakan pembahasan mengenai tahapan dalam *Life Cycle Assessment* (LCA).

2.8.1 *Goal and Scope Definition*

Dalam tahap ini, permasalahan dijelaskan serta tujuan dan ruang lingkup ditentukan. Sejumlah elemen penting ditetapkan pada tahap ini, seperti fungsi sistem, unit fungsional yang akan menjadi dasar perhitungan emisi dan ekstraksi, serta batasan sistem. Selain itu, scenario dasar dan alternatif-alternatifnya dijelaskan secara rinci (Jolliet, 2016). Tahap *goal and scope* dalam *life cycle assessment* adalah fase awal yang sangat penting karena menetapkan dasar dan arah dari seluruh studi. Berikut merupakan peran dari tahapan ini.

1. Menjelaskan peran utama dari produk atau proses yang dianalisis.
2. Ukuran acuan kuantitatif yang digunakan untuk membandingkan sistem secara adil.
3. Menentukan sejauh mana siklus hidup produk akan dianalisis, seperti apakah hanya sampai tahap penggunaan (*cradle to gate*) atau hingga tahap pembuangan akhir (*cradle to grave*)

4. Skenario dasar dalam menentukan alternatif usulan perbaikan yang dianalisis untuk dampak lingkungan.

2.8.2 Life Cycle Inventory (LCI)

Pada tahap ini, emisi pencemaran ke udara, air, dan tanah dikuantifikasi, begitu pula dengan pengambilan bahan baku terbarukan dan tidak terbarukan. Penggunaan sumber daya yang diperlukan untuk menjalankan fungsi sistem juga ditentukan pada tahap ini. Berikut merupakan peran tahap ini dalam *life cycle assessment* (LCA).

1. Mengumpulkan penggunaan sumber daya termasuk penggunaan energi, air, listrik, dan bahan baku lainnya yang dibutuhkan untuk menjalankan fungsi sistem.
2. Mengumpulkan data mengenai jumlah polutan yang dilepaskan ke udara (seperti CO₂, NO_x), air (logam berat), dan tanah (limbah padat berbahaya).
3. Menghitung penggunaan sumber daya alam, baik yang terbarukan maupun tidak terbarukan, seperti batu bara.

2.8.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) merupakan tahap ketiga dalam LCA yang merupakan sebuah metodologi untuk mengubah data input-output dari tahap inventarisasi menjadi indikator dampak lingkungan yang bermakna. Berikut merupakan langkah-langkah dari LCIA (Jolliet, 2016).

1. Klasifikasi (*Classification*)
Mengelompokkan emisi dan konsumsi sumber daya ke dalam kategori dampak, seperti pemanasan global, keasaman, eutrofikasi, dan lain-lain. Pada tahap ini metode *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) ditentukan, seperti *eco-indicator 99*, ReCiPe 2016, CML, atau TRACI.
2. Karakterisasi (*Characterization*)
Mengkuantifikasi kontribusi setiap zat terhadap kategori dampak dalam satuan standar, seperti kg CO₂-ekuivalen.

3. Normalisasi (*Normalization*)

Membandingkan dampak yang dihasilkan dengan rata-rata dampak regional/global agar lebih mudah dipahami.

4. Pembobotan (*Weighting*)

Pada tahap ini, bobot kepentingan diberikan pada tiap kategori dampak untuk menghasilkan nilai agregat yang memudahkan pengambilan keputusan. Bobot kepentingan dilakukan dengan memberikan prioritas utama pada nilai sosial, ekonomi, fisik, dan sebagainya, tergantung pada metode LCIA yang digunakan.

2.8.4 Interpretation

Tahap interpretasi merupakan tahap di mana hasil-hasil yang telah diperoleh sebelumnya dianalisis dan ketidakpastian dalam studi dievaluasi. Parameter-parameter kunci serta opsi perbaikan dapat diidentifikasi melalui studi sensitivitas dan propagasi ketidakpastian. Selain itu, dilakukan analisis kritis untuk menilai pengaruh dari batas sistem dan asumsi yang digunakan. Pada akhirnya dampak lingkungan dapat dibandingkan dengan dampak ekonomi atau sosial. Berikut merupakan fungsi dari tahap interpretasi (Jolliet, 2016).

1. Meninjau hasil analisis dari tahap LCI dan LCIA untuk memastikan bahwa hasilnya sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup studi.
2. Mengevaluasi ketidakpastian yang muncul dari asumsi, batas, dan kualitas data dianalisis.
3. Analisis kritis untuk menguji apakah batas sistem yang dipilih dan asumsi metodologis dapat berdampak signifikan pada hasil.
4. Perbandingan multidimensi dampak lingkungan secara kualitatif maupun kuantitatif dengan dampak ekonomi atau sosial.

2.9 Software LCA

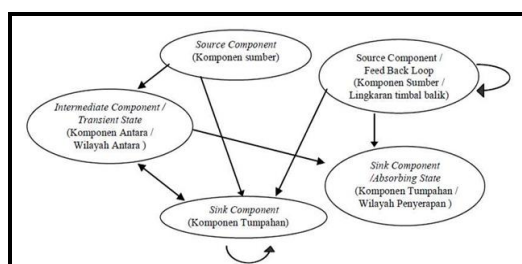
Software komersial utama yang tersedia untuk melakukan LCA adalah SimaPro. SimaPro dirancang dengan baik untuk menyajikan dan menginterpretasikan hasil inventaris dan penilaian dampak secara sederhana, serta

untuk meninjau kontribusi rinci dari setiap proses unit. Selain itu, beberapa software gratis juga tersedia. *Software opensource* yang tersedia yaitu openLCA yang digunakan untuk mengukur dampak lingkungan berdasarkan *database* yang digunakan. Open-IO telah merilis basis data untuk *input-output* khusus LCA (Jolliet, 2016).

2.10 Definisi *Analytical Networking Process*

Analytical Network Process (ANP) adalah pengukuran multikriteria yang digunakan untuk menurunkan skala prioritas relative angka absolut dari penilaian individual (dari pengukuran aktual yang dinormalisi ke bentuk relative) yang juga termasuk dalam skala fundamental angka absolut. Penilaian ini merepresentasikan pengaruh relative salah satu dari elemen terhadap elemen lainnya dalam matriks perbandingan berpasangan, sehubungan dengan kriteria control yang mendasarinya (Saaty, 2013).

ANP menyediakan kerangka kerja umum untuk menangani keputusan tanpa membuat asumsi tentang independensi elemen tingkat yang lebih rendah dan tingkat yang lebih tinggi seperti dalam hierarki. Berbeda dengan AHP, ANP menggunakan jaringan tanpa perlu menentukan tingkatan. Berikut merupakan Gambar 2.2 Struktur Jaringan Umpan Balik Pada ANP.



Gambar 2.2 Struktur Jaringan Umpan Balik Pada ANP
(Sumber: Saaty, 2013)

Analytical Network Process (ANP) merupakan metode yang mampu menggambarkan hubungan ketergantungan (*dependence*) dan umpan balik (*feedback*) antar elemen dalam sistem secara sistemik dan menyeluruh. Proses pengambilan keputusan dalam pendekatan ANP didasarkan pada pertimbangan logis yang divalidasi melalui pengalaman empiris. Struktur jaringan yang digunakan yaitu *benefit, opportunities, cost, and risk* (BOCR) membuat metode

ini memungkinkan untuk mengidentifikasi, mengklasifikasi dan menyusun semua faktor yang mempengaruhi output atau keputusan yang dihasilkan.

Dalam struktur *Analytical Network Process* (ANP), suatu jaringan terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu titik sumber (*source node*), titik antara (*intermediate node*) yang merupakan turunan dari titik sumber, titik siklik (*cyclical node*), serta titik akhir atau tumpahan (*sink node*) sebagai tujuan akhir aliran pengaruh dalam sistem. Berbeda dengan metode AHP yang bersifat linier dan hierarkis, ANP memungkinkan ketergantungan internal (*inner dependence*) antar elemen dalam satu klaster dan ketergantungan eksternal (*outer dependence*) antar elemen di klaster yang berbeda. Salah satu komponen utama dalam ANP adalah supermatriks, yaitu matriks berdimensi besar yang tersusun atas sejumlah submatriks yang merepresentasikan hubungan antar elemen dalam sistem. Supermatriks ini akan secara otomatis menghitung bobot prioritas untuk setiap kriteria dan alternatif, selama data yang digunakan berasal dari vektor prioritas hasil perbandingan berpasangan (Saaty, 2013).

2.11 Klasifikasi Hierarki

Jaringan merupakan kumpulan dari dua atau lebih objek yang saling terhubung satu sama lain. Dalam konteks metode *Analytical Network Process* (ANP) jaringan didefinisikan sebagai bentuk hierarki yang mempunyai hubungan antar elemen internal maupun eksternal. Struktur hierarki dibagi menjadi empat jenis menurut Saaty (2013).

1. *Suparchy*

Suparchy merupakan hierarki yang mempunyai siklus umpan balik pada kedua *level* paling atas.

2. *Intarchy*

Intarchy merupakan sebuah hierarki dengan siklus umpan balik pada dua *level* tengah secara berurutan.

3. *Synarchy*

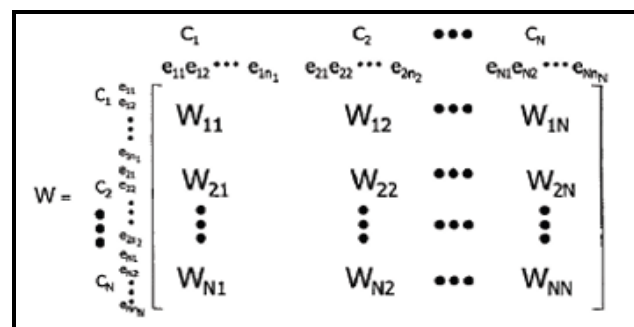
Synarchy merupakan sebuah hierarki dengan siklus umpan balik pada dua *level* bawah.

4. Hiernet

Hiernet merupakan sebuah hierarki yang disusun secara vertikal untuk memfasilitasi keanggotaan pada semua level-levelnya.

2.12 Supermatriks dan Pembobotan

Pembobotan dalam ANP diperlukan suatu model yang merepresentasikan keterkaitan antar kriteria/subkriteria atau alternatif. Nilai dari supermatriks diberikan sebagai hasil penilaian dari skala prioritas yang diturunkan dari perbandingan berpasangan seperti pada AHP. Matriks disusun untuk menggambarkan aliran kepentingan antara komponen baik secara inner dependence maupun outer dependence. Berikut merupakan Gambar 2.3 Jaringan Supermatriks



Gambar 2.3 Jaringan Supermatriks
(Sumber: Saaty, 2013)

Masing-masing kolom dalam W_{ij} adalah *eigen vector* yang menunjukkan kepentingan dari elemen pada komponen ke- i dari jaringan pada sebuah elemen pada komponen ke j . Jika nilai $W_{ij} = 0$ menunjukkan tidak terdapat kepentingan pada elemen tersebut. Jika hal tersebut terjadi maka elemen tersebut tidak digunakan dalam perbandingan berpasangan untuk menurunkan eigen vector. Jadi yang digunakan adalah elemen yang menghasilkan kepentingan bukan nol. Berikut merupakan tahapan penyusunan supermatriks (Saaty, 2022).

1. Tahap supermatriks tanpa bobot (*unweighted supermatrix*)

Pada tahap ini, supermatriks memuat hasil perbandingan berpasangan antar elemen berdasarkan pengaruhnya satu sama lain. Setiap submatriks dalam supermatriks mewakili pengaruh elemen dalam satu klaster terhadap elemen dalam klaster lain, termasuk dirinya sendiri.

2. Tahap supermatriks terbobot (*weighted supermatrix*)

Pada tahap ini, submatriks dikalikan dalam supermatriks dengan bobot dari klaster tempat elemen-elemen itu berada. Bobot klaster ini diperoleh dari hasil perbandingan berpasangan antar klaster.

3. Tahap supermatriks batas (*limit supermatrix*)

Pada tahap ini, supermatriks terbobot dipangkatkan berulang-ulang hingga mencapai kondisi stabi (konvergen). Setelah beberapa kali iterasi, nilai dalam supermatriks tidak berubah secara signifikan, sehingga nilai tersebut menunjukkan prioritas akhir atau *ranking* keseluruhan dari semua elemen dalam jaringan.

2.13 Landasan *Analytical Network Process* (ANP)

Aksioma merupakan pernyataan yang menjadi landasan dalam memahami metode *Analytical Network Process* (ANP). Berikut merupakan empat aksioma metode ANP menurut Saaty (2013).

1. Resiprokal

Resiprokal merupakan perbandingan berpasangan dari dua elemen yang berbeda, dilihat dari elemen induknya. Jika elemen A dibandingkan dengan B dan hasilnya adalah 2, maka jika elemen B dibandingkan dengan A hasilnya adalah $\frac{1}{2}$.

2. Homogenitas

Homogenitas adalah membandingkan dua elemen dengan tingkat kepentingan yang tidak terlalu jauh berbeda agar menghasilkan nilai perbandingan yang masuk akal dan dapat dipercaya.

3. Prioritas

Prioritas adalah pilihan akhir yang harus mencerminkan harapan dan tujuan pengambilan keputusan.

4. Ketergantungan

Ketergantungan adalah hubungan antar elemen baik dalam satu klaster (*inner dependence*) maupun antar klaster (*outer dependence*).

Terdapat banyak situasi di mana elemen-elemen memiliki ukuran yang sama atau hampir sama, dan perbandingan perlu dilakukan bukan untuk menentukan seberapa banyak satu elemen lebih besar dari yang lain, tetapi seberapa sedikit lebih besar dari yang lain. Dengan kata lain, terdapat perbandingan yang dilakukan antara angka 1 dan 2 yang ingin diperkirakan secara verbal. Berikut merupakan Tabel 2.1 Skala Penilaian dan Skala Numerik (Saaty, 2006).

Tabel 2.1 Skala Penilaian dan Skala Numerik

<i>Intensity of Importance</i>	<i>Definition</i>
1	<i>Equal Importance</i>
2	<i>Weak</i>
3	<i>Moderate Importance</i>
4	<i>Moderate Plus</i>
5	<i>Strong Importance</i>
6	<i>Strong Plus</i>
7	<i>Very Strong or Demonstrated Importance</i>
8	<i>Very very Strong</i>
9	<i>Extreme Importance</i>

Sumber: Saaty, 2006

Berdasarkan Tabel 2.1 Skala Fundamental di atas, angka-angka genap sebenarnya tidak kosong, tetapi tidak diberi label khusus karena angka tersebut hanyalah nilai perantara yang membantu memberi penilaian lebih halus atau fleksibel dalam perbandingan berpasangan.

2.14 Prinsip Dasar *Analytical Network Process* (ANP)

Terdapat 3 prinsip-prinsip dasar ANP yaitu dekomposisi, penilaian komparasi (*comparative judgments*) dan komposisi hierarkis atau sintetis dan prioritas (Ascarya, 2005).

1. Prinsip Dekomposisi

Prinsip Dekomposisi adalah sebuah prinsip yang diterapkan untuk menyusun masalah yang kompleks menjadi jaringan ANP yang terdiri dari beberapa klaster.

2. Prinsip Penilaian Komparasi

Prinsip penilaian komparasi adalah sebuah prinsip yang diterapkan untuk membuat matriks perbandingan pasangan (*pairwise comparison*) dari semua kombinasi elemen-elemen dalam cluster.

3. Prinsip Komposisi Hierarkis atau Sintesis

Prinsip komposisi hierarkis atau sintesis adalah sebuah prinsip untuk mengalikan prioritas lokal dari elemen-elemen dalam cluster dengan prioritas global dari elemen induk.

2.15 Metodologi *Analytical Network Process* (ANP)

Analytical Network Process (ANP) merupakan metode pengambilan keputusan yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty untuk mengatasi kompleksitas dalam sistem yang saling berkaitan. Prosedur *Analytical Network Process* terdapat beberapa langkah menurut Saaty (2013).

1. Membuat Model *Analytical Network Process* (ANP).

Langkah pertama dalam ANP adalah menyusun struktur masalah ke dalam bentuk jaringan (*network*). Model ini mencerminkan interdependensi dan *feedback* antar elemen, baik dalam satu klaster (*inner dependence*) maupun antar klaster (*outer dependence*).

2. Membuat Matriks Perbandingan Berpasangan

Matriks perbandingan berpasangan merupakan matriks yang digunakan dalam metode pengambilan keputusan seperti *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan *Analytical Network Process* (ANP) untuk membandingkan dua elemen sekaligus berdasarkan tingkat kepentingan suatu kriteria tertentu.

3. Menghitung Supermatriks

Supermatriks merupakan matriks yang menggambarkan keseluruhan hubungan dalam model jaringan.

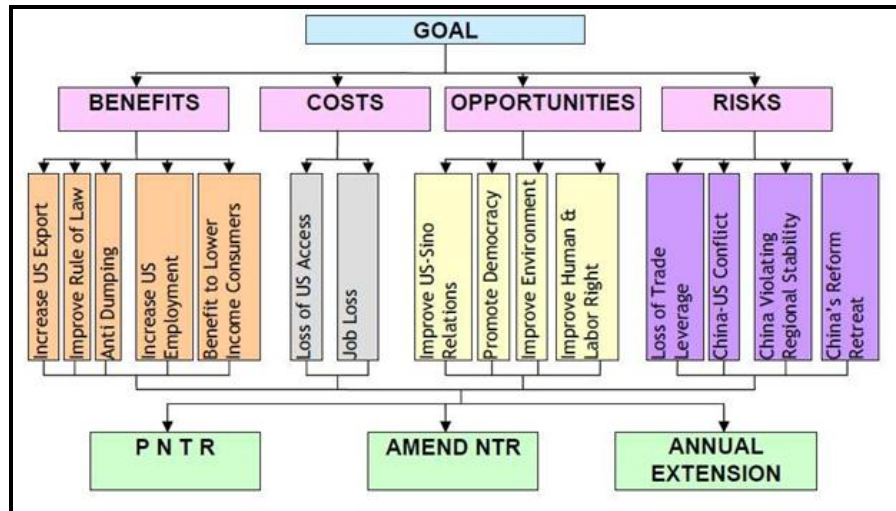
4. Membuat Bobot Kepentingan dari *Clusters* dan *Nodes*

Bobot digunakan untuk mengkonversi *unweighted supermatrix* menjadi *weighted supermatrix* dengan menyesuaikan kontribusi relatif setiap klaster.

2.16 ANP Dalam Pendekatan BOCR

BOCR adalah singkatan dari *benefits, opportunities, costs, and risks* yang merupakan bentuk jaringan dalam metode *Analytical Network Process* (ANP) yang memungkinkan peneliti untuk mempertimbangkan suatu keputusan

berdasarkan pengaruh (*impact*) dari jaringan tersebut. Berikut merupakan contoh struktur jaringan BOCR (Rusdiyana, 2013).



Gambar 2.4 Contoh Jaringan ANP – BOCR

Sumber: Rusdiyana, 2013

2.17 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan kajian terhadap hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh peneliti yang memiliki keterkaitan dengan topik yang sedang diteliti saat ini. berikut merupakan Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
Vargas, L. G., Guiora, A. N., & Minutolo, M. C., 2021	<i>Report on an Analytic Network Process (ANP) Model to Estimate the Benefit, Opportunities, Costs, and Risks (BOCR) that Gun Policies and Violence Prevention Interventions Have on Legal Users of Firearms</i>	Penelitian oleh Guiora, Minutolo, dan Vargas (2021) mengembangkan model <i>Analytic Network Process</i> (ANP) untuk mengevaluasi dampak kebijakan kontrol senjata terhadap pemilik senjata api legal dengan menggunakan kerangka <i>Benefits, Opportunities, Costs, and Risks</i> (BOCR). Model ini mengakomodasi elemen-elemen yang saling terkait dan menilai baik dampak nyata maupun potensial, termasuk faktor - faktor <i>intangible</i> seperti rasa aman, identitas, dan kebebasan pribadi. Studi ini mengevaluasi kebijakan fiktif “ <i>Single Shot</i> ” yang membatasi senjata hanya pada satu peluru terhadap empat tipe pemilik senjata: aktivis anti – senjata, kolektor, petugas hukum, dan individu proteksionis. Hasilnya menunjukkan bahwa kebijakan tersebut paling menguntungkan kolektor (skor BO/CR tertinggi), sementara paling berdampak negatif pada kelompok proteksionis.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
Widiastuti, et al., 2023	<i>Optimizing the Intermediary Function of Zakat Institution Using Analytical Network Process Benefit Opportunity Cost Risk (ANP BOCR) Approach</i>	Hasil penelitian dari jurnal ini menunjukkan bahwa optimalisasi fungsi intermediasi ogisti zakat dapat dilakukan dengan mengidentifikasi masalah utama dalam pengelolaan zakat, baik dalam aspek pengumpulan maupun pendistribusian dana zakat, melalui empat perspektif: ogisti zakat, muzakki, mustahiq, dan aspek legal. Menggunakan pendekatan ANP BOCR, penelitian ini menemukan bahwa peningkatan transparansi dan akuntabilitas laporan menjadi solusi prioritas dalam pengelolaan pengumpulan zakat jangka pendek dan panjang, sementara dalam aspek distribusi, solusi utama adalah optimalisasi dana zakat produktif, kemitraan, dan dukungan pemerintah. Strategi dengan prioritas tertinggi untuk kedua aspek adalah penguatan regulasi zakat wajib.
Peker, Iskander, et al., 2016	<i>Logistic Center Site Selection by ANP/BOCR Analysis: A Case Study of Turkey</i>	Hasil penelitian dalam jurnal ini menunjukkan bahwa pendekatan ANP/BOCR efektif digunakan untuk menentukan lokasi pusat ogistic yang optimal, dengan studi kasus pada kota Trabzon di Turki. Penelitian ini mempertimbangkan berbagai kriteria dalam empat aspek utama yaitu manfaat (<i>benefits</i>), peluang (<i>opportunities</i>), biaya (<i>costs</i>), dan risiko (<i>risks</i>), serta melibatkan pandangan dari berbagai pemangku kepentingan seperti akademisi, ogisti ogist, penyedia layanan ogistic, ogist industri manufaktur, dan organisasi non-pemerintah. Dari hasil analisis, Alternatif A dinyatakan sebagai lokasi pusat ogistic paling tepat berdasarkan aspek manfaat dan peluang, karena memiliki akses dekat ke ogistic , jalan raya pantai Laut Hitam, bandara, dan Gerbang Zigana. Sementara itu, Alternatif B lebih unggul dalam aspek biaya dan risiko karena memiliki area pengembangan yang luas dan kedekatan dengan pusat produksi. Meskipun terjadi perbedaan preferensi antar kelompok, hasil akhir yang diperoleh melalui metode <i>subtractive</i> menunjukkan bahwa Alternatif A tetap menjadi lokasi terbaik secara keseluruhan.
Widiastuti, et al., 2022	<i>Integrating Sustainable Islamic Social Finance: An Analytical Network Process Using the Benefit Opportunity Cost Risk (ANP BOCR) Framework: The Case of Indonesia</i>	Penelitian ini menemukan bahwa aspek paling prioritas dalam integrasi adalah peningkatan kualitas sumber daya manusia (nilai 0.97), regulasi (0.86), dan dukungan teknologi (0.76). Meskipun penggunaan teknologi dianggap penting, investasi yang besar dan risiko <i>ciber</i> membuat peningkatan SDM lebih diprioritaskan dalam jangka pendek.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
El-Sabbagh., 2023	<i>Adoption of Emerging Technology Tools in Logistics Industri: Prioritization Using ANP and BOCR Methods</i>	Penelitian ini memfokuskan pada empat teknologi utama: <i>Augmented Reality</i> (AR), <i>Internet of Things</i> (IoT), Big Data, serta <i>Robotics and Automation</i> (R&A). Melalui pelibatan lima pakar logistic dan teknologi, dilakukan pembobotan kriteria strategis seperti efisiensi dan produktivitas, keamanan dan keselamatan, serta investasi sumber daya, kemudian dilakukan perbandingan berpasangan terhadap sub-kriteria di bawah perspektif BOCR. Hasil analisis menunjukkan bahwa IoT dan Big Data memiliki skor prioritas tertinggi, terutama karena memberikan manfaat efisiensi operasional dan peluang kolaborasi baru. Sementara itu, AR dan R&A cenderung menimbulkan risiko dan biaya tinggi, terutama terkait kebutuhan infrastruktur dan pelatihan karyawan.
Petrillo, A., Cooper, O., & De Felice, F. (2011).	<i>Supply Chain Design by Integrating Multicriteria Decision Analysis and a Sustainability Approach</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan integratif yang menggabungkan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA), <i>Environmental Performance Evaluation</i> (EPE), dan <i>Analytic Network Process</i> (ANP) dengan kerangka BOCR (<i>Benefits, Opportunities, Costs, and Risks</i>) mampu secara efektif mengevaluasi dan meningkatkan keberlanjutan lingkungan dalam rantai pasok. Studi kasus pada industri TV dan Audio Video mengungkap bahwa intervensi paling optimal untuk keberlanjutan adalah instalasi panel surya, karena menawarkan manfaat lingkungan dan ekonomi terbesar. Selain itu, model ini berhasil mengidentifikasi prioritas tindakan berdasarkan parameter keberlanjutan yang relevan, seperti emisi CO ₂ , konsumsi energi, limbah, dan penggunaan bahan mentah. Pendekatan ini terbukti fleksibel dan dapat diterapkan pada berbagai jenis industri untuk mendukung pengambilan keputusan strategis yang berorientasi pada pengurangan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk.
Şahin, U., & Büke, T. (2016)	<i>Evaluation of Alternative Fuels for Electricity Production in Turkey Using Analytic Network Process</i>	Penelitian ini mengevaluasi lima jenis bahan bakar utama yaitu gas alam, tenaga air, batu bara, minyak, dan nuklir yang digunakan untuk pembangkitan listrik skala besar di Turki, dengan menggunakan pendekatan <i>Analytic Network Process</i> (ANP) berbasis BOCR (<i>Benefits, Opportunities, Costs, Risks</i>). Berdasarkan perhitungan metode aditif dan multiplikatif, hasil penelitian menunjukkan bahwa tenaga air (hydropower) memiliki prioritas tertinggi dalam hal keberlanjutan dan kinerja keseluruhan, diikuti oleh energi nuklir, batu bara, gas alam, dan terakhir minyak bumi.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

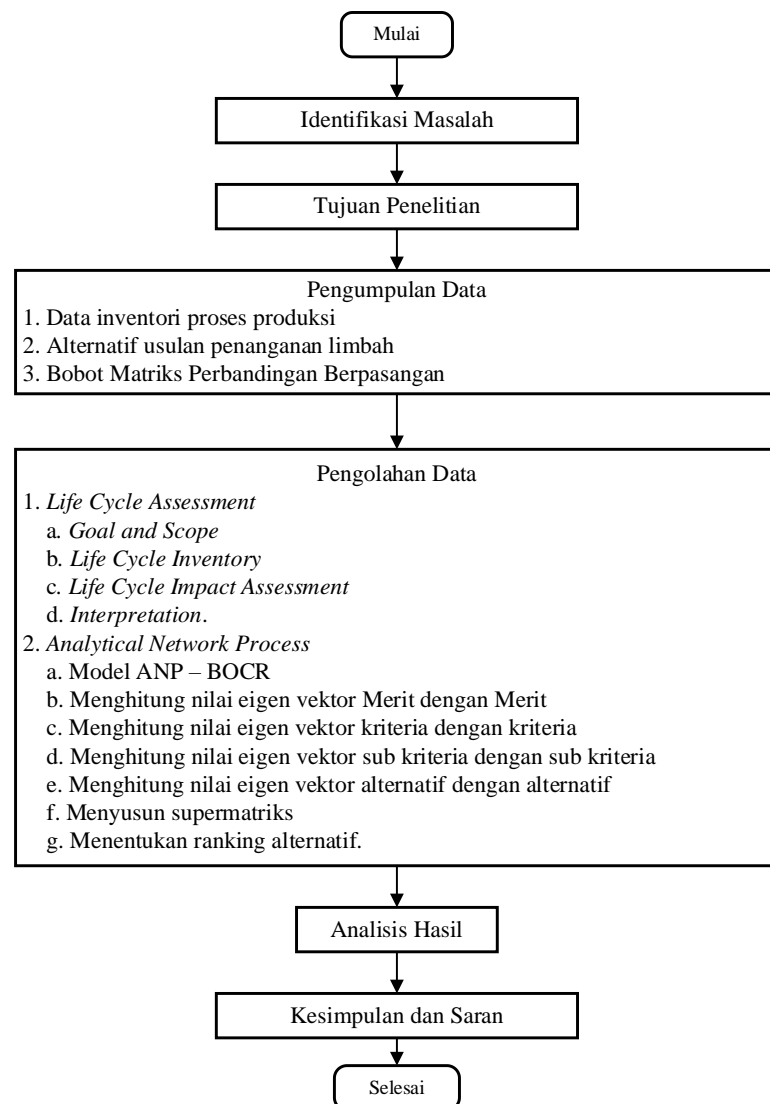
Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
Kautzar, G. Z., Sumantri, Y., & Yuniarti, R. (2015)	<i>Analisis Dampak Lingkungan Pada Aktivitas Supply Chain Produk Kulit Menggunakan Metode LCA Dan ANP</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa dari keseluruhan aktivitas <i>supply chain</i> di PT XYZ, proses produksi kulit merupakan sumber utama dampak lingkungan terbesar, terutama dalam kategori <i>ecotoxicity water acute</i> , <i>ecotoxicity water chronic</i> , dan <i>human toxicity soil</i> . Proses tanning teridentifikasi sebagai aktivitas paling berkontribusi terhadap pencemaran karena tingginya penggunaan senyawa kromium yang tidak sepenuhnya terserap dan akhirnya menjadi limbah cair berbahaya. Sebagai solusi, metode <i>Analytical Network Process</i> (ANP) digunakan untuk mengevaluasi alternatif perbaikan, dan hasilnya menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah lumpur penyamakan kulit sebagai bahan baku kompos merupakan opsi terbaik berdasarkan kriteria manfaat, peluang, biaya, dan risiko.
Mariia Rochikashvili dan Jan C. Bongaerts (2016)	<i>Multi-criteria Decision-making for Sustainable Wall Paints and Coatings Using Analytic Hierarchy Process</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan cat dinding dekoratif yang berkelanjutan dapat dilakukan secara efektif dengan pendekatan <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP) dan <i>Analytic Network Process</i> (ANP), yang mempertimbangkan empat kriteria utama: manfaat, peluang, biaya, dan risiko (BOCR). Hasil model menyimpulkan bahwa cat akrilik bebas VOC menjadi pilihan terbaik dalam jangka pendek berdasarkan formula multiplikatif, karena menyeimbangkan keamanan lingkungan dan kesehatan manusia dengan harga dan kualitas yang wajar. Namun, dalam jangka panjang berdasarkan formula aditif negatif, minyak Tung muncul sebagai alternatif terbaik karena rendah biaya dan risiko.
Amandha Harnaningtyas Palupi, Ishardita Pambudi Tama, Ratih Ardia Sari, 2014.	Evaluasi Dampak Lingkungan Produk Kertas dengan Menggunakan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) dan <i>Analytic Network Process</i> (ANP) (Studi Kasus: PT X Probolinggo)	Berdasarkan hasil penelitian ditemukan bahwa dampak lingkungan terbesar berasal dari pengadaan bahan baku, proses produksi, dan distribusi produk. Pengadaan bahan baku yang paling berdampak adalah distribusi batu bara dengan truk muatan 40 ton, sedangkan dalam proses produksi, penggunaan bahan pemutih <i>Optical Brightening Agent</i> (OBA) memberikan kontribusi signifikan terhadap pencemaran. Selain itu, distribusi produk menggunakan truk berat juga berpengaruh besar. Melalui metode ANP, alternatif terbaik yang diusulkan untuk mengurangi dampak tersebut adalah mengganti alat transportasi truk dengan kereta api untuk pengadaan bahan baku dan menggunakan bahan baku LBKP (Long Leaf Bleached Kraft Pulp) berkualitas tinggi pada proses produksi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian merupakan langkah-langkah sistematis yang dilakukan oleh peneliti untuk memperoleh jawaban atas suatu permasalahan penelitian. Tahapan penelitian akan digambarkan melalui diagram aliran (*flowchart*) yang bertujuan agar mudah dipahami. Berikut merupakan Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian.



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian

3.2 Penjelasan *Flowchart* Metodologi Penelitian

Flowchart merupakan diagram yang digunakan untuk membantu memvisualisasikan bagaimana suatu proses berjalan. *Flowchart* menampilkan aliran untuk merepresentasikan sistem berpikir yang disusun secara sistematis dan terstruktur. Berdasarkan Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian di atas, terdapat beberapa tahapan yang akan dilakukan, yaitu identifikasi masalah, tujuan penelitian, pengumpulan data, pengolahan data, analisis data, serta kesimpulan dan saran. Berikut merupakan penjelasan dari setiap tahapan penelitian.

Tahapan pertama adalah melakukan identifikasi masalah. Tahap identifikasi masalah merupakan tahap awal dalam proses penelitian yang bertujuan untuk mengenali dan merumuskan permasalahan yang ada di lapangan secara jelas. Dalam konteks penelitian ini, masalah yang diidentifikasi adalah bagaimana dampak lingkungan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ, bagaimana strategi penanganan limbah yang dihasilkan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ, dan bagaimana usulan perbaikan penanganan limbah di PT. XYZ.

Tahapan kedua adalah tujuan penelitian. Tujuan penelitian adalah sebuah tahapan yang diarahkan untuk menemukan jawaban dari rumusan masalah yang telah diidentifikasi. Dalam konteks penelitian ini, tujuan penelitiannya adalah untuk mengidentifikasi dampak lingkungan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ, menganalisa strategi penanganan limbah yang dihasilkan dari proses produksi kancing logam di PT. XYZ, dan memberikan usulan perbaikan penanganan limbah di PT. XYZ.

Tahapan ketiga adalah pengumpulan data. Pengumpulan data merupakan sebuah proses untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan guna mencapai tujuan penelitian. Dalam konteks penelitian ini, data yang dikumpulkan berupa data inventori yang didapatkan melalui observasi, data alternatif-alternatif penanganan limbah yang didapatkan melalui studi literatur dan saran ahli, dan data pembobotan untuk matriks perbandingan berpasangan.

Tahapan keempat adalah pengolahan data. Pada tahap ini, data yang telah dikumpulkan diolah menggunakan beberapa metode. Data inventori diolah menggunakan metode LCA untuk mengidentifikasi dampak lingkungan. Metode

LCA dilakukan dengan menggunakan *software* openLCA versi 2.4.1. Selain itu, dari data solusi alternatif, dirumuskan ke dalam tiga rumusan alternatif yang *feasible*. Kemudian, bobot yang didapatkan dari kuesioner diolah menggunakan metodologi *analytical network process* berbasis BOCR.

Tahap kelima adalah analisis hasil. Analisis hasil dilakukan dengan mengevaluasi setiap *output* pada tahap *Life Cycle Assessment* (LCA) berdasarkan data inventori yang telah diolah sebelumnya. Selanjutnya, analisis setiap hasil dari tahapan metode *analytical network process* yaitu dimulai dari model ANP – BOCR, nilai *eigen vector*, supermatriks, dan *ranking* alternatif. Alternatif-alternatif tersebut kemudian dinilai berdasarkan pendekatan BOCR (*Benefit, Opportunity, Cost, Risk*) untuk memperoleh solusi terbaik.

Tahap keenam adalah kesimpulan dan saran. Pada tahap ini, kesimpulan ditarik berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan sebelumnya, serta merumuskan saran yang relevan. Kesimpulan mencerminkan pemecahan masalah utama yang telah diidentifikasi di awal penelitian, sedangkan saran ditujukan untuk implementasi praktis atau untuk pengembangan penelitian di masa depan.

BAB IV

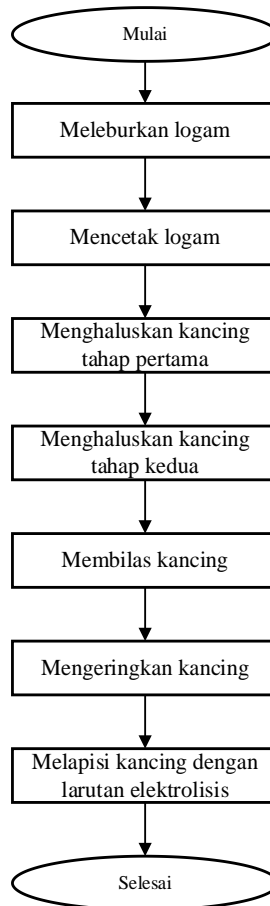
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahapan sistematis untuk memperoleh informasi atau fakta yang relevan dengan tujuan tertentu. Pada konteks penelitian ini, data yang dikumpulkan adalah data proses produksi, data kondisi eksisting sistem instalasi pengolahan air limbah, data input dan output proses produksi, dan data alternatif usulan penanganan limbah. Berikut masing-masing pembahasannya.

4.1.1 Proses Produksi

Proses produksi kancing logam pada PT. XYZ dapat dilihat pada Gambar 4.1 *Flowchart* Proses Produksi.



Gambar 4.1 *Flowchart* Proses Produksi

Berdasarkan Gambar 4.1 *Flowchart* Proses Produksi di atas, proses produksi diawali dengan pelelehan batang kuningan, yang kemudian dilanjutkan dengan proses pencetakan logam cair ke dalam cetakan sesuai dengan bentuk yang telah ditentukan. Setelah proses pencetakan, tahapan berikutnya adalah penghalusan tahap pertama, yaitu pengasahan sisi kancing yang masih kasar menggunakan batu asah khusus. Proses ini dilanjutkan dengan penghalusan tahap kedua, yang bertujuan untuk menyempurnakan permukaan kancing menggunakan batu asah berbeda yang dirancang khusus untuk tahap akhir (*finishing*). Setelah melalui kedua tahap penghalusan tersebut, kancing kemudian dibilas dan dipisahkan dari batu asah. Proses selanjutnya adalah pengeringan menggunakan mesin pengering (*dryer*). Tahap akhir dalam proses produksi ini adalah pelapisan permukaan kancing dengan metode *electroplating*.

4.1.2 Kondisi Eksisting Sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah

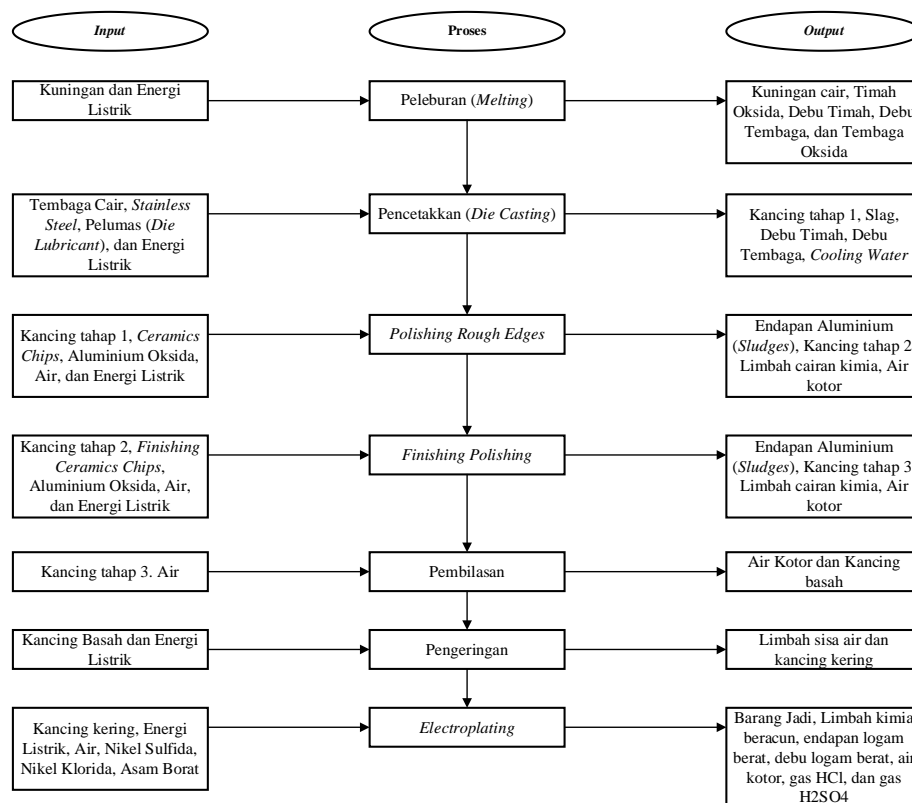
Kondisi eksisting sistem pengolahan air limbah (IPAL) di PT XYZ saat ini menggunakan rangkaian unit pengolahan berupa *pretreatment tank*, *equalization basin*, *neutralization basin*, *coagulation tank*, *flocculation tank*, *clarifier tank*, *intermediate basin*, *sand filter/carbon filter*, *clear water tank*, serta *sludge drying bed*. Berdasarkan hasil analisis kualitas *effluent*, diketahui bahwa beberapa parameter air limbah belum memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Proses koagulasi-flokulasi yang berfungsi untuk mengendapkan partikel logam berat belum berjalan secara optimal, meskipun sistem telah dilengkapi dengan unit filtrasi pasir. Beberapa parameter logam berat seperti perak (Ag), kadmium (Cd), serta sianida (CN⁻) telah menunjukkan hasil yang sesuai dengan ambang batas yang diizinkan. Namun, parameter lainnya seperti total padatan tersuspensi (TSS), pH, kebutuhan oksigen biologis (BOD), kebutuhan oksigen kimiawi (COD), nikel (Ni), seng (Zn), tembaga (Cu), kromium (Cr dan Cr⁶⁺), dan timbal (Pb) masih melebihi batas baku mutu yang berlaku. Oleh karena itu, diperlukan strategi optimasi dalam proses reduksi konsentrasi logam berat untuk meminimalkan potensi pencemaran lingkungan. Berikut merupakan kondisi mutu air limbah saat pengambilan data.

Tabel 4.1 Mutu Air Limbah di PT. XYZ

Parameter	Baku Mutu	Mutu Air Limbah PT XYZ	Satuan	Parameter	Baku Mutu	Mutu Air Limbah PT XYZ	Satuan
Suhu	0	27,17±0,29	°C	Cr	0,5	0,6±0,01	mg/L
TSS	20	21,33±0,58	mg/L	Cr ⁺⁶	0,1	0,4±0,01	mg/L
Ph	6 - 9	7,17±0,42	-	Ni	1,0	2,98±0,19	mg/L
Ag	0,5	0,02±0,01	mg/L	Zn	1,0	3,10±0,64	mg/L
Cd	0,1	0,02±0,02	mg/L	CN	0,2	0,1±0,01	mg/L
BOD	50,0	110,90±9,75	mg/L	Cu	0,5	0,82±0,16	mg/L
COD	100,0	167±25,87	mg/L	Pb	0,1	0,58±0,12	mg/L

4.1.3 Input dan Output Proses Produksi

Pada bagian ini, dilakukan perumusan dan definisi diagram *input-output* yang berfungsi untuk mengidentifikasi dan menggambarkan berbagai jenis masukan (*input*) serta keluaran (*output*) dari setiap tahapan proses produksi. Masukan dalam diagram ini mencakup bahan baku maupun energi yang diperlukan untuk mengoperasikan mesin produksi. Sementara itu, keluaran mencakup produk yang dihasilkan dari proses serta limbah yang ditimbulkan. Berikut merupakan Gambar 4.3 Diagram *Input-Output*.

Gambar 4.3 Diagram *Input-Output*

Berdasarkan Gambar 4.3 Diagram *Input-Output* di atas, *input* pada proses pertama, yaitu peleburan (*melting*), adalah kuningan dan energi listrik, sementara *output* yang dihasilkan adalah kuningan cair dan limbah berupa timah oksida, debu timah (*zinc dust*), tembaga oksida, dan debu tembaga (*copper dust*). *Input* pada proses kedua, yaitu pencetakan (*die casting*), adalah tembaga cair, *stainless steel* yang digunakan sebagai campuran agar hasil pencetakan lebih padat, pelumas (*die lubricant*), dan energi listrik, sementara *output* yang dihasilkan berupa kancing tahap 1, yaitu kancing yang memiliki sisi yang masih kasar, serta limbah berupa *slag*, yaitu partikel kuningan yang mengeras lebih awal, debu timah, debu tembaga, dan air pendingin (*cooling water*). *Input* pada proses ketiga, yaitu pengkasaran (*polishing rough edges*), adalah kancing tahap 1, *ceramics chips* yang digunakan sebagai batu asahan, aluminium oksida, air, dan energi listrik, sementara *output* yang dihasilkan adalah kancing tahap 2 serta limbah berupa endapan aluminium (*sludges*), limbah kimia cair, dan air kotor. *Input* pada proses keempat, yaitu penghalusan (*finishing polishing*), adalah kancing tahap 2, *finishing ceramics chips* yang merupakan batuan asah yang berbeda dari proses sebelumnya, aluminium oksida, air, dan energi listrik, sementara *output* yang dihasilkan adalah kancing tahap 3 serta limbah berupa endapan aluminium, limbah kimia cair, dan air kotor. *Input* pada tahap kelima, yaitu pembilasan (*washing*), adalah kancing tahap 3 dan air bersih, sementara *output* yang dihasilkan adalah kancing basah dan air kotor. *Input* pada tahap keenam, yaitu pengeringan (*drying*), adalah kancing basah dan energi listrik, sementara *output* yang dihasilkan adalah kancing kering dan air sisa kotor sisa pengeringan. *Input* pada tahap ketujuh, yaitu pelapisan (*electroplating*), adalah kancing kering, energi listrik, air, nikel sulfida, nikel klorida, dan asam borat, sementara *output* yang dihasilkan adalah barang jadi dan limbah berupa endapan logam berat, limbah kimia beracun, debu logam berat, air kotor, gas HCl, dan gas H₂SO₄.

4.1.4 Alternatif Usulan Penanganan Limbah

Alternatif penanganan limbah merupakan tahapan pada penelitian ini di mana penulis berfokus pada usulan-usulan perbaikan untuk mengurangi limbah yang diperkirakan berdampak pada lingkungan. Pada tahap ini, usulan alternatif penanganan limbah ditentukan berdasarkan pertimbangan dampak lingkungan terbesar pada tahap LCIA. Berikut merupakan alternatif-alternatif yang dipilih untuk dimasukkan sebagai input dalam metode ANP-BOCR.

1. Aplikasi kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalam reduksi logam berat pada limbah cair. Penggunaan kalsium hidroksida dalam pengolahan limbah cair bertujuan untuk meningkatkan pH. Secara teoritis pemisahan logam berat bisa dilakukan dengan cara pengendapan berbentuk hidroksida pada pH yang tepat, dan biasanya dalam kondisi basa. Untuk mendapatkan pH yang tepat digunakan senyawa alkali. Berbagai jenis senyawa alkali yang dapat digunakan dalam pengolahan limbah cair proses produksi antara lain, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, NaOH , dan NaHCO_3 . Senyawa alkali dapat digunakan untuk proses pengendapan kromium sebagai $\text{Cr}(\text{OH})_3$, karena senyawa alkali adalah bersifat basa kuat bila bereaksi dengan air, dan zat pereduksi yang sangat kuat, sehingga mudah kehilangan elektron. $\text{Cr}(\text{OH})_3$ adalah senyawa yang bersifat amfoter yang akan melarut dengan minimum pada pH 7,5 – 10, dan kelarutan kromium melalui proses reduksi dan netralisasi mendekati 0 pada pH 8,5 - 9,0. Kondisi optimal pengendapan $\text{Cr}(\text{OH})_3$ dipengaruhi oleh unsur-unsur lain yang terdapat dalam larutan. $\text{Cr}(\text{OH})_3$ merupakan bentuk senyawa dari proses pengendapan Cr_2O_3 menggunakan senyawa alkali yang dianggap sudah stabil dan tidak menimbulkan bahaya terhadap lingkungan dibandingkan dengan senyawa kromat (krom valensi 6). Krom valensi 3 dengan adanya oksidator tertentu dan kondisi lingkungan yang memungkinkan akan teroksidasi menjadi krom valensi 6. Oleh karena itu untuk menjaga hal-hal yang tidak diinginkan dikemudian hari maka perlu segera dilakukan penanganan lanjut terhadap endapan $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ini (Asmadi, 2009). Dalam menunjang pembuatan model ANP – BOCR, alternatif ini akan disimbolkan dengan A1.

2. Bioremediasi menggunakan bakteri *indigenous* untuk reduksi logam berat dalam limbah cair. Bioremediasi merupakan teknik remediasi lingkungan yang memanfaatkan mikroorganisme lokal (*indigenous*) untuk mendekomposisi atau menstabilkan kontaminan logam berat. Mikroorganisme yang mampu melakukan remediasi logam berat di antaranya adalah bakteri (*Bacillus sp*, *Pseudomonas sp*, dan *Escherichia coli*); *chrysogenum*, kapang *Rhizopus* (*Penicillium stolonifera*, *Aspergillus oryzae*), dan *khamir* (*Saccharomyces cerevisiae*). Penggunaan mikroba *indigenous* untuk menurunkan atau mereduksi logam timbal perlu diuji sebagai alternatif untuk pemulihan tanah ataupun air tercemar tergantung kondisi lingkungan di tanah tersebut. Selain mereduksi timbal, bakteri *indigenous* juga dapat mereduksi kromium, tembaga, dan merkuri. Salah satu metode bioremediasi yang menggunakan bakteri adalah metode lumpur aktif. Lumpur aktif dibuat menggunakan tanah sawah sebagai sumber massa mikrobial. Pengolahan limbah proses *etching* PCB dengan memanfaatkan bakteri *indigenous* dalam sistem lumpur aktif ini diharapkan dapat menurunkan substrat-substrat berbahaya tertentu yang terkandung dalam air limbah. Dalam menunjang pembuatan model ANP-BOCR, alternatif ini akan disimbolkan dengan A2.
3. Pemanfaatan limbah lumpur (*sludge*) yang mengandung logam berat sebagai bahan baku pupuk menggunakan bakteri *thiobacillus* melalui mekanisme *bioleaching*. Kandungan unsur di dalam *sludge* segar maupun kering mengandung unsur Mg masuk dalam kriteria rendah sampai sedang. Adapun untuk unsur Ca untuk kedua jenis *sludge* masuk dalam kriteria sangat rendah. Sedangkan untuk unsur Cu, Fe dan Zn di dalam *sludge*, ternyata semuanya melebihi nilai kritis. Hal ini diperkuat dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Murtika, D, (1999) bahwa pemanfaatan *sludge* untuk penanaman jagung manis (*Zea mays*. L cv. *Sachanata Sturt*) menunjukkan hasil baik apabila digunakan komposisi *sludge* di bawah 50 %, sedangkan jika digunakan *sludge* di atas 50 % justru akan menghambat pertumbuhan tanaman tersebut. Penghambatan pertumbuhan tanaman tersebut diduga karena kandungan unsur Fe, Zn dan Cu tersebut yang melampaui nilai kritisnya sehingga akan

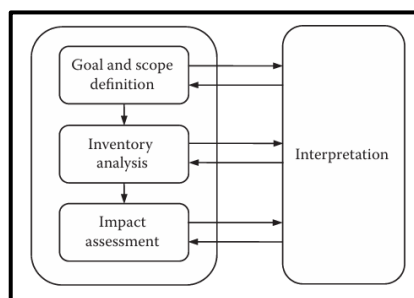
bersifat racun terhadap pertumbuhan tanaman jagung tersebut. Karena banyak mengandung logam berat, maka sebelum digunakan limbah *sludge* harus diberi *treatment* terlebih dahulu salah satu nya dengan pemberian pupuk kandang, kapur, dan pengomposan dengan teknologi mikrobial. Dalam menunjang pembuatan model ANP-BOCR, alternatif ini disimbolkan A3.

4.2 Pengolahan Data

Pengolahan data adalah suatu proses mengubah data mentah yang telah dikumpulkan menjadi informasi yang lebih terstruktur, bermakna, dan siap dianalisis. Pengolahan data pada penelitian kali ini adalah setiap tahapan dalam metode yang digunakan. Berikut merupakan pembahasan mengenai metode LCA dan ANP – BOCR.

4.2.1 Life Cycle Assessment (LCA)

Dalam penerapannya, terdapat empat pendekatan utama dalam menentukan batasan sistem yang diidentifikasi, yaitu *cradle to grave*, *cradle to gate*, *gate to grave*, dan *gate to gate*. Adapun tahapan-tahapan dalam LCA disajikan sebagai berikut.



Gambar 4.2 Tahapan Life Cycle Assessment (LCA)
(Sumber: Jolliet, et al., 2016)

4.2.1.1 Goal and Scope

Tahapan *goal and scope* merupakan fase awal dalam LCA yang berfungsi untuk merumuskan tujuan studi serta menetapkan batasan sistem yang akan dianalisis. Pada tahap ini, permasalahan utama yang menjadi fokus kajian dijelaskan secara rinci, dan ruang lingkup analisis, termasuk batas sistem dan unit fungsional didefinisikan secara sistematis sesuai dengan kebutuhan studi (Jolliet et

al., 2016). Tujuan dari analisis lingkungan menggunakan LCA pada proses produksi kancing logam adalah menilai dan mengevaluasi titik-titik kritis dalam proses produksi dengan memetakan seluruh alur produksi. LCA membantu mengungkap tahapan yang memberikan dampak lingkungan paling signifikan, seperti proses peleburan logam atau pelapisan *electroplating*. Selain itu, informasi yang diperoleh dari LCA dapat digunakan sebagai masukan dalam menentukan keputusan penanganan limbah dengan metode *Analytical Network Process* dengan pendekatan *Benefit, Opportunities, Cost, dan Risk* (ANP-BOCR). Dalam penelitian ini, batasan sistem yang diterapkan adalah *gate to gate*, yaitu pendekatan yang membatasi analisis hanya pada tahapan proses produksi kancing logam. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi dampak lingkungan difokuskan secara spesifik pada aktivitas-aktivitas yang terjadi di dalam sistem produksi, tanpa mempertimbangkan tahap hulu (pengadaan bahan baku) maupun hilir (penggunaan dan pembuangan produk).

4.2.1.2 Life Cycle Inventory (LCI)

LCI merupakan tahapan yang bertujuan untuk mengumpulkan data secara rinci mengenai konsumsi bahan baku, penggunaan energi, serta emisi dan limbah yang dihasilkan dari setiap proses dalam sistem yang ditinjau. Di bawah ini merupakan data inventori pada proses peleburan (*melting*).

Tabel 4.2 Life Cycle Inventory Proses Peleburan (*Melting*)

Peleburan (<i>Melting</i>)						
<i>Input</i>			<i>Output</i>			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kuningan	1900	kg	Kuningan Cair	1871,8	kg	Produk
Energi Listrik	935,9	kWh	Timah Oksida	10,55	kg	Limbah
			Debu Timah	2,5	kg	
			Tembaga Oksida	9,35	kg	
			Debu Tembaga	5,8	kg	

Berdasarkan Tabel 4.2 di atas, dalam pembuatan 947000 pcs kancing logam memerlukan kuningan sebanyak 1900 kg dan energi listrik sebesar 935,9 kWh, sementara dari proses peleburan tersebut dihasilkan kuningan cair sebanyak 1871,8 kg serta limbah berupa timah oksida sebanyak 10,55 kg, debu timah sebanyak 2,5 kg, tembaga oksida sebanyak 9,35 kg, dan debu tembaga sebanyak 5,8 kg.

Tabel 4.3 Life Cycle Inventory Proses Pencetakan (Die Casting)

Pencetakan (Die Casting)						
<i>Input</i>			<i>Output</i>			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kuningan cair	1871,8	kg	Kancing tahap 1	950000	buah	Produk
Logam tambahan	467,95	kg	Slag	25	kg	Limbah
Pelumas (<i>die lubricant</i>)	93,59	kg	Debu timah	12,67	kg	
Energi listrik	1872	kWh	Debu tembaga	11	kg	
			Cooling water	31,9	L	

Berdasarkan Tabel 4.3 di atas, proses pencetakan memerlukan kuningan cair sebanyak 1871,8 kg, logam tambahan sebanyak 467,95 kg, pelumas (*die lubricant*) sebanyak 93,59 kg, dan energi listrik sebesar 1872 kWh, sementara dari proses pencetakan tersebut dihasilkan kancing tahap 1 sebanyak 950000 buah serta limbah berupa slag sebanyak 25 kg, debu timah sebanyak 12,67 kg, debu tembaga sebanyak 11 kg, dan *cooling water* sebanyak 31,9 L.

Tabel 4.4 Life Cycle Inventory Proses Pengkasaran (Polishing Rough Edges)

Pengkasaran (Polishing Rough Edges)						
<i>Input</i>			<i>Output</i>			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kancing tahap 1	950000	buah	Kancing tahap 2	947000	buah	Produk
<i>Ceramics chips</i>	950500	buah	Endapan aluminium	14	kg	Limbah
Aluminium Oksida	30	kg	Limbah kimia, stabil	14,37	L	
Air	2000	L	Air kotor	1970	L	
Energi Listrik	85,5	kWh				

Berdasarkan Tabel 4.4 di atas, proses pengkasaran memerlukan kancing tahap 1 sebanyak 950000 buah, *ceramics chips* sebanyak 950500 buah, aluminium oksida sebanyak 30 kg, air sebanyak 2000 L dan energi listrik sebesar 85,5 kWh, sementara dari proses pengkasaran tersebut dihasilkan kancing tahap 2 sebanyak 947000 buah serta limbah berupa endapan aluminium sebanyak 14 kg, limbah kimia stabil sebanyak 14,37 L, dan air kotor sebanyak 1970 L.

Tabel 4.5 Life Cycle Inventory Proses Penghalusan (Finishing Polishing)

Penghalusan (Finishing Polishing)						
<i>Input</i>			<i>Output</i>			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kancing tahap 2	947000	buah	Kancing tahap 3	947000	buah	Produk
<i>Finishing Ceramics chips</i>	947500	buah	Endapan aluminium	14	kg	Limbah
Aluminium Oksida	15	kg	Limbah kimia, stabil	14,37	L	
Air	1990	L	Air kotor	1950	L	
Energi Listrik	85,5	kWh				

Berdasarkan Tabel 4.5 di atas, proses penghalusan memerlukan kancing tahap 2 sebanyak 947000 buah, *finishing ceramics chips* sebanyak 947500 buah, aluminium oksida sebanyak 15 kg, air sebanyak 1990 L dan energi listrik sebesar 95,5 kWh, sementara dari proses penghalusan tersebut dihasilkan kancing tahap 3 sebanyak 947000 buah serta limbah berupa endapan aluminium sebanyak 14 kg, limbah kimia stabil sebanyak 14,37 L, dan air kotor sebanyak 1950 L.

Tabel 4.6 Life Cycle Inventory Proses Pembilasan (Washing)

Pembilasan (Washing)						
Input			Output			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kancing tahap 3	947000	buah	Kancing basah	947000	buah	Produk
Air	500	L	Air kotor	500	L	Limbah

Berdasarkan Tabel 4.6 di atas, proses pembilasan memerlukan kancing tahap 3 sebanyak 947000 buah dan air sebanyak 500 L, sementara dari proses pembilasan tersebut dihasilkan kancing basah sebanyak 947000 buah serta limbah berupa air kotor sebanyak 500 L.

Tabel 4.7 Life Cycle Inventory Proses Pengeringan (Drying)

Pengeringan (Drying)						
Input			Output			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kancing basah	947000	buah	Kancing kering	947000	buah	Produk
Energi listrik	171	kWh	Air kotor	3,9	L	Limbah

Berdasarkan Tabel 4.7 di atas, proses pengeringan memerlukan kancing basah sebanyak 947000 buah dan energi listrik sebanyak 171 kWh, sementara dari proses pengeringan tersebut dihasilkan kancing kering sebanyak 947000 buah serta limbah berupa air kotor sebanyak 3,9 L.

Tabel 4.8 Life Cycle Inventory Proses Pelapisan (Electroplating)

Pelapisan (Electroplating)						
Input			Output			
Material	Jumlah	Satuan	Material	Jumlah	Satuan	Keterangan
Kancing Kering	947000	buah	Barang Jadi	947000	buah	Produk
Energi Listrik	2500	kWh	Limbah Kimia Beracun	40	L	Limbah
Air	2000	L	Endapan Logam Berat	145	kg	
Nikel Sulfida	300	g/L	Debu Logam Berat	15,57	kg	
Nikel Klorida	50	g/L	Air Kotor	1900	L	
Asam Borat	40	g/L	Timah Oksida	30	g/L	
			Debu Timah	24	g/L	

Berdasarkan Gambar 4.8 di atas, proses pelapisan memerlukan kancing kering sebanyak 947000 buah, energi listrik sebanyak 2500 kWh, air sebanyak 2000

L, nikel sulfida sebanyak 300 g/L, Nikel Klorida sebanyak 50 g/L, dan asam borat sebanyak 40 g/L, sementara dari proses tersebut dihasilkan barang jadi sebanyak 947000 buah serta limbah berupa limbah kimia beracun sebanyak 40 L, endapan logam berat sebanyak 145 kg, debu logam berat sebanyak 15,57 kg, air kotor sebanyak 1900 L, timah oksida sebanyak 30 g/L, dan debu timah sebanyak 24 g/L.

4.2.1.3 *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*

LCIA merupakan tahap lanjutan dari tahap LCI, di mana data *input* dan *output* dari setiap proses dievaluasi seperti konsumsi energi, emisi gas rumah kaca, penggunaan air, dan pelepasan limbah diklasifikasikan ke dalam berbagai kategori dampak lingkungan, seperti pemanasan global, acidifikasi, eutrofikasi, dan toksisitas. Tujuan utama dari tahap ini adalah mengukur dampak lingkungan dari siklus produk. Pada tahap ini penilaian dilakukan menggunakan *software* openLCA 2.4.1. Berikut merupakan pembahasan mengenai tahapan dalam LCIA.

1. *Classification*

Metode LCIA yang digunakan adalah ReCiPe *Endpoint* (H) yang artinya penilaian dampak lingkungan dilakukan untuk mengetahui dampak lingkungan akhir yang terjadi, seperti *fine particulate matter formation, fossil resource scarcity, freshwater ecotoxicity, freshwater eutrophication, global warming freshwater ecosystems, global warming human health, global warming terrestrial ecosystems, human carcinogenic toxicity, human non-carcinogenic toxicity, ionizing radiation, land use, marine ecotoxicity, marine eutrophication, mineral eutrophication, mineral resource scarcity, ozone formation human health, ozone formation terrestrial ecosystems, stratospheric ozone depletion, terrestrial acidification, terrestrial ecotoxicity, water consumption aquatic ecosystems, water consumption human health, water consumption terrestrial ecosystems*. Sistem penilaian kualitas yang digunakan adalah ILCD *data quality system* yaitu sistem referensi internasional untuk pengolahan dan pengukuran data LCA yang disusun oleh *European Commission – Joint Research Centre (JRC)*

2. Characterizations

Characterizations merupakan tahapan dalam LCIA yang digunakan untuk membandingkan setiap kriteria dampak lingkungan yang akan terjadi. Berikut merupakan Tabel 4.9 *Characterization* Proses Produksi Kancing Logam.

Tabel 4.9 Characterization Proses Produksi Kancing Logam

Impact Category	Satuan	Pelebunan	Pencetakan	Pengkasaran	Penghalusan	Pembilasan	Pengeringan	Pelapisan
<i>Fine Particular Matter Formation</i>	DALY	0.001157185	0.007021797	0.0070218	0.0070218	0.0070218	0.0070218	0.00951
<i>Fossil Resource Scarcity</i>	USD2013	93.14259371	565.1892586	565.189259	565.189259	565.18926	565.189259	906.363
<i>Freshwater Ecotoxicity</i>	Species.yr	3.89322E-09	2.36241E-08	2.3624E-08	2.3624E-08	2.362E-08	2.3624E-08	2.38E-08
<i>Freshwater Eutrophication</i>	Species.yr	2.41283E-09	1.4641E-08	1.4641E-08	1.4641E-08	1.464E-08	1.4641E-08	2.24E-08
<i>Global Warming, Freshwater Ecosystems</i>	Species.yr	1.05266E-10	6.38752E-10	6.3875E-10	6.3875E-10	6.388E-10	6.3875E-10	9.59E-10
<i>Global Warming, Human Health</i>	DALY	0.001277095	0.007749412	0.00774941	0.00774941	0.0077494	0.00774941	0.011638
<i>Global Warming, Terrestrial Ecosystems</i>	Species.yr	3.85293E-06	2.33796E-05	2.338E-05	2.338E-05	2.338E-05	2.338E-05	3.51E-05
<i>Human Carcinogenic Toxicity</i>	DALY	1.23922E-05	7.51959E-05	7.5196E-05	7.5196E-05	7.52E-05	7.5196E-05	8.17E-05
<i>Human Non-Carcinogenic Toxicity</i>	DALY	0.000341263	0.002070783	0.00207078	0.00207078	0.0020708	0.00207078	0.002139
<i>Ionizing Radiation</i>	DALY	5.40459E-07	3.2795E-06	3.2795E-06	3.2795E-06	3.28E-06	3.2795E-06	4.38E-06
<i>Land Use</i>	Species.yr	-5.10009E-27	-3.09473E-26	-3.0947E-26	-3.095E-26	-3.095E-26	-3.0947E-26	1.09E-08
<i>Marine Ecotoxicity</i>	Species.yr	2.35677E-09	1.43009E-08	1.4301E-08	1.4301E-08	1.43E-08	1.4301E-08	1.45E-08
<i>Marine Eutrophication</i>	Species.yr	5.28231E-11	3.20531E-10	3.2053E-10	3.2053E-10	3.205E-10	3.2053E-10	4.2E-10
<i>Mineral Resource Scarcity</i>	USD2013	0.040270035	0.24435857	0.24435857	0.24435857	0.2443586	0.24435857	0.364289
<i>Ozone Formation, Human Health</i>	DALY	3.50586E-06	2.12736E-05	2.1274E-05	2.1274E-05	2.127E-05	2.1274E-05	2.63E-05
<i>Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems</i>	Species.yr	4.98812E-07	3.02679E-06	3.0268E-06	3.0268E-06	3.027E-06	3.0268E-06	3.75E-06
<i>Stratospheric Ozone Depletion</i>	DALY	1.87719E-07	1.13908E-06	1.1391E-06	1.1391E-06	1.139E-06	1.1391E-06	1.44E-06
<i>Terrestrial Acidification</i>	Species.yr	1.27638E-06	7.74509E-06	7.7451E-06	7.7451E-06	7.745E-06	7.7451E-06	1.06E-05
<i>Terrestrial Ecotoxicity</i>	Species.yr	3.52996E-07	2.14198E-06	2.142E-06	2.142E-06	2.142E-06	2.142E-06	2.16E-06
<i>Water Consumption, Aquatic Ecosystems</i>	Species.yr	2.33538E-12	1.41711E-11	1.4171E-11	1.4171E-11	1.417E-11	1.4171E-11	1.83E-11
<i>Water Consumption, Human Health</i>	DALY	8.58366E-06	5.20857E-05	5.2086E-05	5.2086E-05	5.209E-05	5.2086E-05	6.73E-05
<i>Water Consumption, Terrestrial Ecosystem</i>	Species.yr	5.2198E-08	3.16737E-07	3.1674E-07	3.1674E-07	3.167E-07	3.1674E-07	4.09E-07

3. Normalization

Normalization adalah proses dalam LCIA yang mengubah hasil karakterisasi menjadi bentuk yang dapat dibandingkan dengan referensi tertentu seperti total dampak tahunan dari suatu wilayah atau per kapita. Tujuan dari normalisasi adalah untuk memberikan informasi lebih jelas terkait seberapa besar kontribusi sistem terhadap total dampak. Jika dianalogikan sebuah makanan mengandung 800 kkal, maka dengan referensi batas asupan harian sebesar 2.500 kkal, makanan tersebut menyumbang 32% dari total kebutuhan energi harian. Dalam konteks pembuatan kancing logam, hasil LCI mungkin menunjukkan bahwa proses produksi 1 juta kancing menghasilkan, misalnya, 1.200 kg CO₂-eq. Nilai ini tidak memberikan arti yang jelas sampai dibandingkan dengan total emisi CO₂-eq rata-rata per kapita per tahun (misalnya, 2.000 kg CO₂-eq/orang/tahun). Setelah dibandingkan, diketahui bahwa produksi 1 juta kancing menyumbang 60% dari emisi tahunan satu individu. Berikut merupakan Tabel 4.10 *Normalization* Proses Produksi Kancing Logam.

Tabel 4.10 Normalization Proses Produksi Kancing Logam

Impact Category	Satuan	Peleburan	Pencetakan	Pengkasaran	Penghalusan	Pembilasan	Pengeringan	Pelapisan
Fine Particular Matter Formation	DALY	2.74866E-05	0.000166789	0.00016679	0.00016679	0.0001668	0.00016679	0.000226
Fossil Resource Scarcity	USD2013	2609036.238	15831631.89	15831631.9	15831631.9	15831632	15831631.9	25388320
Freshwater Ecotoxicity	Species.yr	2.78884E-12	1.69227E-11	1.6923E-11	1.6923E-11	1.692E-11	1.6923E-11	1.7E-11
Freshwater Eutrophication	Species.yr	1.72839E-12	1.04879E-11	1.0488E-11	1.0488E-11	1.049E-11	1.0488E-11	1.6E-11
Global Warming, Freshwater Ecosystems	Species.yr	7.54052E-14	4.57559E-13	4.5756E-13	4.5756E-13	4.576E-13	4.5756E-13	6.87E-13
Global Warming, Human Health	DALY	3.03348E-05	0.000184072	0.00018407	0.00018407	0.0001841	0.00018407	0.000276
Global Warming, Terrestrial Ecosystems	Species.yr	2.75988E-09	1.67476E-08	1.6748E-08	1.6748E-08	1.675E-08	1.6748E-08	2.52E-08
Human Carcinogenic Toxicity	DALY	2.94352E-07	1.78613E-06	1.7861E-06	1.7861E-06	1.786E-06	1.7861E-06	1.94E-06
Human Non-Carcinogenic Toxicity	DALY	8.106E-06	4.91872E-05	4.9187E-05	4.9187E-05	4.919E-05	4.9187E-05	5.08E-05
Ionizing Radiation	DALY	1.28375E-08	7.7898E-08	7.7898E-08	7.7898E-08	7.79E-08	7.7898E-08	1.04E-07
Land Use	Species.yr	-3.65336E-30	-2.21686E-29	-2.2169E-29	-2.217E-29	-2.217E-29	-2.2169E-29	7.83E-12
Marine Ecotoxicity	Species.yr	1.68823E-12	1.02442E-11	1.0244E-11	1.0244E-11	1.024E-11	1.0244E-11	1.04E-11
Marine Eutrophication	Species.yr	3.78389E-14	2.29606E-13	2.2961E-13	2.2961E-13	2.296E-13	2.2961E-13	3.01E-13
Mineral Resource Scarcity	USD2013	1128.012173	6844.777868	6844.77787	6844.77787	6844.7779	6844.77787	10204.17
Ozone Formation, Human Health	DALY	8.32746E-08	5.0531E-07	5.0531E-07	5.0531E-07	5.053E-07	5.0531E-07	6.25E-07
Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems	Species.yr	3.57315E-10	2.16819E-09	2.1682E-09	2.1682E-09	2.168E-09	2.1682E-09	2.69E-09
Stratospheric Ozone Depletion	DALY	4.45889E-09	2.70566E-08	2.7057E-08	2.7057E-08	2.706E-08	2.7057E-08	3.42E-08
Terrestrial Acidification	Species.yr	9.14314E-10	5.54806E-09	5.5481E-09	5.5481E-09	5.548E-09	5.5481E-09	7.6E-09
Terrestrial Ecotoxicity	Species.yr	2.52862E-10	1.53437E-09	1.5344E-09	1.5344E-09	1.534E-09	1.5344E-09	1.55E-09
Water Consumption, Aquatic Ecosystems	Species.yr	1.67291E-15	1.01512E-14	1.0151E-14	1.0151E-14	1.015E-14	1.0151E-14	1.31E-14
Water Consumption, Human Health	DALY	2.03888E-07	1.23719E-06	1.2372E-06	1.2372E-06	1.237E-06	1.2372E-06	1.6E-06
Water Consumption, Terrestrial Ecosystem	Species.yr	3.73911E-11	2.26889E-10	2.2689E-10	2.2689E-10	2.269E-10	2.2689E-10	2.93E-10

4. Weighting

Weighting merupakan tahap di mana kategori dampak diberi bobot kepentingan relatif, sehingga dapat dibandingkan atau digabungkan menjadi satu skor total (*single score*). Meskipun hasil normalisasi mengubah berbagai jenis dampak (seperti CO₂, SO₂, atau PO₄³⁻) menjadi angka yang dapat dibandingkan secara proporsional, tahap pembobotan memberikan penekanan tambahan terhadap kategori dampak yang dianggap lebih kritis atau relevan berdasarkan sudut pandang ilmiah, kebijakan, atau nilai sosial. Nilai bobot ini biasanya ditentukan oleh ahli, pemerintah, dan standar internasional, dan sudah termasuk ke dalam *database* yang digunakan, serta dinyatakan dalam bentuk skala (misalnya 0–1 atau dalam persen). Berikut merupakan Tabel 4.11 Weighting Proses Produksi Kancing Logam.

Tabel 4.11 Weighting Proses Produksi Kancing Logam

Impact Category	Satuan	Peleburan	Pencetakan	Pengkasaran	Penghalusan	Pembilasan	Pengeringan	Pelapisan
Fine Particular Matter Formation	pt	0,01099463	0,066715413	0,06671541	0,06671541	0,0667154	0,06671541	7,20E-10
Fossil Resource Scarcity	pt	521807247,7	3166326379	3166326379	3166326379	3,166E+09	3166326379	5,07E+04
Freshwater Ecotoxicity	pt	1,11554E-09	6,76907E-09	6,7691E-09	6,7691E-09	6,769E-09	6,7691E-09	6,8095E-09
Freshwater Eutrophication	pt	6,91355E-10	4,19514E-09	4,1951E-09	4,1951E-09	4,195E-09	4,1951E-09	6,40915E-09
Global Warming, Freshwater Ecosystems	pt	3,01621E-11	1,83023E-10	1,8302E-10	1,8302E-10	1,83E-10	1,8302E-10	2,74857E-10
Global Warming, Human Health	pt	0,012133919	0,073628622	0,07362862	0,07362862	0,0736286	0,07362862	0,11057246
Global Warming, Terrestrial Ecosystems	pt	1,10399E-06	6,69902E-06	6,699E-06	6,699E-06	6,699E-06	6,699E-06	1,00603E-05
Human Carcinogenic Toxicity	pt	0,000117741	0,000714451	0,00071445	0,00071445	0,0007145	0,00071445	0,000776544
Human Non-Carcinogenic Toxicity	pt	0,003242402	0,019674894	0,01967489	0,01967489	0,0196749	0,01967489	0,020325288
Ionizing Radiation	pt	5,135E-06	3,11592E-05	3,1159E-05	3,1159E-05	3,116E-05	3,1159E-05	4,1659E-05
Land Use	pt	-1,46134E-27	-8,86743E-27	-8,8674E-27	-8,867E-27	-8,867E-27	-8,8674E-27	3,13079E-09
Marine Ecotoxicity	pt	6,75294E-10	4,09768E-09	4,0977E-09	4,0977E-09	4,098E-09	4,0977E-09	4,14252E-09
Marine Eutrophication	pt	1,51356E-11	9,18426E-11	9,1843E-11	9,1843E-11	9,184E-11	9,1843E-11	1,2042E-10
Mineral Resource Scarcity	pt	225602,4347	1368955,574	1368955,57	1368955,57	1368955,6	1368955,57	2040833,11
Ozone Formation, Human Health	pt	3,33098E-05	0,000202124	0,00020212	0,00020212	0,0002021	0,00020212	0,000250118
Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems	pt	1,42926E-07	8,67276E-07	8,6728E-07	8,6728E-07	8,673E-07	8,6728E-07	1,07406E-06
Stratospheric Ozone Depletion	pt	1,78356E-06	1,08226E-05	1,0823E-05	1,0823E-05	1,082E-05	1,0823E-05	1,36907E-05
Terrestrial Acidification	pt	3,65726E-07	2,21922E-06	2,2192E-06	2,2192E-06	2,219E-06	2,2192E-06	3,03976E-06
Terrestrial Ecotoxicity	pt	1,01145E-07	6,13748E-07	6,1375E-07	6,1375E-07	6,137E-07	6,1375E-07	6,20E+07
Water Consumption, Aquatic Ecosystems	pt	6,69162E-13	4,06048E-12	4,0605E-12	4,0605E-12	4,06E-12	4,0605E-12	5,24511E-12
Water Consumption, Human Health	pt	8,1555E-05	0,000494876	0,00049488	0,00049488	0,0004949	0,00049488	0,000639255
Water Consumption, Terrestrial Ecosystem	pt	1,49564E-08	9,07557E-08	9,0756E-08	9,0756E-08	9,076E-08	9,0756E-08	1,17233E-07

4.2.1.4 *Interpretation*

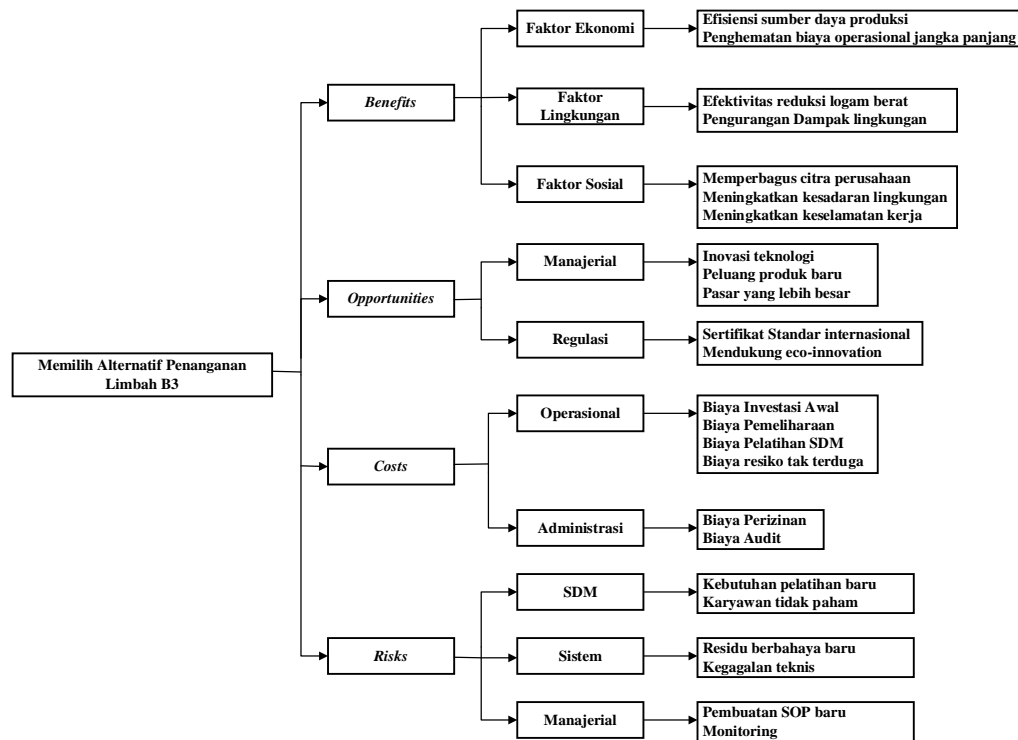
Interpretation merupakan tahap terakhir dalam siklus LCA di mana hasil dari semua tahap sebelumnya dianalisis, dibandingkan, dan disimpulkan untuk mendukung pengambilan keputusan. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menitikberatkan fokus perbaikan pada proses tertentu yang menghasilkan dampak lingkungan terbesar. Berdasarkan hasil dari LCIA, dapat diketahui bahwa dampak lingkungan terbesar pelapisan dengan kategori dampak yang dominan adalah *terrestrial ecotoxicity* dengan kontribusi dampak yang sangat tinggi yaitu $6,2E+07$ pt. *Terrestrial ecotoxicity* adalah kategori dampak lingkungan yang mengukur potensi zat berbahaya (biasanya logam berat) untuk mencemari dan membahayakan ekosistem daratan, termasuk tanah, organisme tanah, dan makhluk hidup lainnya. Dampak lingkungan ini terjadi ketika bahan beracun, seperti timbal dalam proses pelapisan, dilepaskan ke ekosistem daratan.

4.2.2 *Analytical Network Process – BOCR*

ANP BOCR (*Analytic Network Process – Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*) adalah metode pengambilan keputusan yang mengintegrasikan kerangka ANP dengan empat perspektif utama, yaitu manfaat, peluang, biaya, dan risiko untuk mengevaluasi suatu alternatif secara komprehensif. Dalam pengaplikasiannya, metode ini memiliki beberapa tahapan dimulai dari menyusun model ANP – BOCR, menentukan responden, menghitung nilai eigen vektor untuk setiap merit, kriteria, sub kriteria, dan alternatif, menyusun supermatriks, dan terakhir membuat tabel BOCR. Berikut merupakan pembahasan masing-masing tahapannya.

4.2.2.1 Model ANP BOCR

Model ANP BOCR adalah pendekatan pengambilan keputusan yang menggabungkan *Analytical Network Process* (ANP) dengan kerangka BOCR (*Benefit, Opportunity, Cost, and Risk*) untuk mengevaluasi dan memilih alternatif terbaik dari suatu permasalahan kompleks dan saling terkait. Berikut merupakan Gambar 4.4 Model ANP – BOCR.



Gambar 4.4 Model ANP – BOCR

Model ANP – BOCR di atas terdiri dari tujuan yaitu memilih alternatif penanganan limbah B3, merit yang terdiri dari *benefits*, *opportunities*, *cost*, dan *risks*, kriteria yang diambil dari studi literatur dan saran ahli yang dikembangkan sesuai dengan masing-masing merit, dan subkriteria yang diambil dari studi literatur dan saran ahli yang dikembangkan sesuai dengan masing-masing kriteria.

4.2.2.2 Daftar Responden

Dalam penelitian kali ini, responden yang dipilih oleh peneliti ada dua yang masing-masing keduanya adalah seorang praktisi di bidang manufaktur khususnya produksi. Praktisi merupakan orang yang telah secara langsung terlibat dan memiliki pengalaman dalam menerapkan pengetahuan atau keahlian tertentu dalam profesinya. Praktisi pertama dijadikan responden bernama Yoga yang sudah bekerja di PT. XYZ pada bagian produksi. Praktisi kedua yang penulis pilih bernama Anang Subagyo yang bekerja di PT Yamatoga Indonesia pada bagian produksi.

4.2.2.3 Menentukan Eigen Vektor Merit dengan Merit

Bobot pada matriks perbandingan didapatkan dari hasil wawancara responden. Berikut merupakan perhitungan eigen vektor merit dengan merit untuk responden pertama dan responden kedua.

1. Responden pertama

Berdasarkan hasil kuesioner yang didapatkan dari responden pertama, berikut merupakan perhitungan eigen vektor yang akan disajikan pada Tabel 4.12 Eigen Vektor Merit – Merit Responden Pertama.

4.12 Eigen Vektor Merit – Merit Responden Pertama

	<i>Benefits</i>	<i>Opportunities</i>	<i>Costs</i>	<i>Risks</i>	Hasil Normalisasi
<i>Benefits</i>	1	3	4	4	0,5082
<i>Opportunities</i>	1/3	1	3	2	0,2572
<i>Costs</i>	1/4	1/3	1	3	0,1441
<i>Risks</i>	1/4	1/2	1/3	1	0,0905

Berdasarkan hasil tabel matriks perbandingan berpasangan yang telah dinormalisasi, diperoleh bahwa kriteria *benefits* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,5082, menunjukkan bahwa *benefits* merupakan pertimbangan utama dalam pengambilan keputusan. Diikuti oleh *opportunities* dengan bobot 0,2572, yang menandakan peluang juga menjadi faktor penting meskipun tidak sebesar manfaat. Sementara itu, nilai normalisasi kriteria *costs* dengan bobot 0,1441 dan kriteria *risks* dengan bobot 0,0905 memiliki bobot yang lebih rendah, menunjukkan bahwa meskipun keduanya tetap dipertimbangkan, keduanya tidak seberpengaruh dua kriteria pertama.

2. Responden kedua

Berdasarkan hasil wawancara yang dilakukan penulis pada responden kedua, berikut merupakan perhitungan eigen vektor yang akan disajikan pada Tabel 4.13 Eigen Vektor Merit – Merit Responden Kedua.

4.13 Eigen Vektor Merit – Merit Responden Kedua

	<i>Benefits</i>	<i>Opportunities</i>	<i>Costs</i>	<i>Risks</i>	Hasil Normalisasi
<i>Benefits</i>	1	2	3	2	0,3885
<i>Opportunities</i>	1/2	1	1/4	1/2	0,1119
<i>Costs</i>	1/3	4	1	1/4	0,1833
<i>Risks</i>	1/2	2	4	1	0,3161

Berdasarkan hasil tabel matriks perbandingan berpasangan yang telah dinormalisasi, diperoleh bahwa kriteria *benefits* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,3885, menunjukkan bahwa manfaat tetap menjadi pertimbangan

utama dalam pengambilan keputusan. Di posisi kedua terdapat kriteria *risks* dengan bobot 0,3161, yang mengindikasikan bahwa risiko juga dipandang cukup penting dan perlu dikelola secara serius. Selanjutnya, kriteria *costs* memiliki bobot sebesar 0,1833, menandakan bahwa aspek biaya masih relevan namun tidak dominan. Sementara itu, *opportunities* memiliki bobot terendah sebesar 0,1119, yang menunjukkan bahwa peluang dianggap kurang prioritas dibandingkan aspek lainnya dalam pengambilan keputusan ini.

3. Kesimpulan

Hasil kesimpulan didapatkan dengan menghitung rata-rata nilai normalisasi dari kedua perhitungan di atas. Berikut merupakan Tabel 4.14 Kesimpulan Prioritas Merit.

Tabel 4.14 Kesimpulan Prioritas Merit

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	<i>Benefits</i>	0,5082	0,3885	0.4484
2	<i>Opportunities</i>	0,2572	0,1119	0.1846
3	<i>Costs</i>	0,1441	0,1833	0.1637
4	<i>Risks</i>	0,0905	0,3161	0.2033

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai normalisasi dari dua responden diperoleh bahwa aspek *benefits* menempati peringkat pertama dengan rata-rata bobot tertinggi sebesar 0,4484, menunjukkan bahwa manfaat dipandang sebagai faktor paling penting dalam pengambilan keputusan oleh kedua responden. Aspek *risks* berada di peringkat kedua dengan rata-rata 0,2033, menandakan adanya perhatian yang cukup besar terhadap potensi risiko proyek. *Opportunities* dan *costs* masing-masing berada pada peringkat ketiga dan keempat, dengan nilai rata-rata 0,1846 dan 0,1637, menunjukkan bahwa meskipun masih dipertimbangkan, keduanya tidak menjadi prioritas utama. Perbedaan pandangan antar responden terlihat pada beberapa aspek, namun secara umum, hasil ini mengindikasikan bahwa keberhasilan proyek lebih banyak ditentukan oleh pencapaian manfaat dan pengelolaan risiko dibandingkan peluang dan efisiensi biaya. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

4.2.2.4 Menentukan Eigen Vektor Kriteria dengan Kriteria

Pada bagian ini yang akan dibandingkan adalah kriteria dengan kriteria dari masing-masing merit *benefits*, *opportunities*, *costs*, dan *risks*. Berikut merupakan perhitungan eigen vektor kriteria dengan kriteria antar merit untuk responden pertama dan responden kedua.

1. Responden pertama

a. *Benefits*

Dalam aspek *benefits*, terdapat tiga kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu faktor ekonomi, faktor lingkungan, dan faktor sosial. Berikut ini disajikan Tabel 4.15 Eigen Vektor Kriteria *Benefits* Responden Pertama.

Tabel 4.15 Eigen Vektor Kriteria Pada *Benefits* Responden Pertama

	Faktor Ekonomi	Faktor Lingkungan	Faktor Sosial	Hasil Normalisasi
Faktor Ekonomi	1	1/5	4	0.2123
Faktor Lingkungan	5	1	6	0.7083
Faktor Sosial	¼	1/6	1	0.0793

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa faktor lingkungan memiliki bobot tertinggi sebesar 0,7083, menunjukkan bahwa aspek ini dianggap paling dominan dan penting dalam penilaian manfaat proyek. Diikuti oleh faktor ekonomi dengan bobot 0,2123, yang masih dipertimbangkan namun dengan prioritas lebih rendah. Sementara itu, faktor sosial memperoleh bobot paling rendah sebesar 0,0793, yang mengindikasikan bahwa kontribusinya terhadap manfaat relatif kecil dibandingkan dua faktor lainnya. Hasil ini mencerminkan bahwa dalam konteks keputusan yang diambil, keberlanjutan lingkungan menjadi perhatian utama, mencerminkan kecenderungan pemikiran jangka panjang terhadap dampak ekologis proyek.

b. *Opportunities*

Dalam aspek *opportunities*, terdapat dua kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu manajerial, regulasi. Berikut ini disajikan Tabel 4.16 Eigen Vektor Kriteria *Opportunities* Responden Pertama.

Tabel 4.16 Eigen Vektor Kriteria Pada *Opportunities* Responden Pertama

	Manajerial	Regulasi	Hasil Normalisasi
Manajerial	1	2	0.6667
Regulasi	1/2	1	0.3333

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa kesempatan pada aspek manajerial memiliki bobot lebih tinggi sebesar 0,6667. Sementara itu, faktor regulasi hanya memiliki bobot sebesar 0,3333, menandakan bahwa meskipun kepatuhan terhadap aturan dan kebijakan tetap dipertimbangkan, perannya tidak sebesar kontribusi manajerial. Hasil ini mencerminkan bahwa dalam situasi yang dianalisis, keberhasilan lebih bergantung pada kemampuan pengelolaan internal daripada tekanan atau kewajiban dari aspek regulatif eksternal.

c. *Costs*

Dalam aspek *costs*, terdapat dua kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu operasional dan administrasi. Berikut merupakan Tabel 4.17 Eigen Vektor Kriteria *Costs* Responden Pertama.

Tabel 4.17 Eigen Vektor Kriteria Pada *Costs* Responden Pertama

	Operasional	Administrasi	Nilai Normalisasi
Operasional	1	5	0.8334
Administrasi	1/5	1	0.1666

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, terlihat bahwa faktor operasional memiliki bobot dominan sebesar 0,8334, menunjukkan bahwa aspek ini dianggap paling penting dalam konteks yang dianalisis, baik dalam pengambilan keputusan maupun penilaian kinerja. Sebaliknya, faktor administrasi hanya memiliki bobot sebesar 0,1666, yang mengindikasikan bahwa peran administrasi dinilai jauh lebih rendah dibandingkan operasional. Hasil ini mencerminkan bahwa biaya pelaksanaan teknis di lapangan lebih diprioritaskan untuk dipertimbangkan dibandingkan biaya administratif.

d. *Risks*

Dalam aspek *risks*, terdapat tiga kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu SDM, sistem, dan manajerial. Berikut merupakan Tabel 4.18 Eigen Vektor Kriteria *Risks* Responden Pertama.

Tabel 4.18 Eigen Vektor Kriteria *Risks* Responden Pertama

	SDM	Sistem	Manajerial	Nilai Normalisasi
SDM	1	7	5	0,7304
Sistem	1/7	1	4	0,1854
Manajerial	1/5	1/4	1	0,0842

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, terlihat bahwa resiko Sumber Daya Manusia (SDM) memiliki bobot tertinggi sebesar 0,7304, menunjukkan bahwa keberhasilan suatu sistem atau proyek sangat bergantung pada kompetensi, keterampilan, dan keterlibatan tenaga kerja yang terlibat. Faktor sistem menempati posisi kedua dengan bobot 0,1854, menandakan bahwa meskipun peran sistem kerja dan teknologi tetap penting, pengaruhnya masih berada jauh di bawah resiko SDM. Resiko manajerial memiliki bobot terendah sebesar 0,0842, yang mengindikasikan bahwa resiko pengelolaan atau manajemen strategis dipandang kurang berpengaruh dalam konteks ini. Secara keseluruhan, hasil ini mencerminkan bahwa resiko SDM menjadi pilar utama dalam mempengaruhi pengambilan keputusan.

2. Responden kedua

a. *Benefits*

Dalam aspek *benefits*, terdapat tiga kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu faktor ekonomi, faktor lingkungan, dan faktor sosial. Berikut merupakan Tabel 4.19 Eigen Vektor Kriteria *Benefits* Responden Kedua.

Tabel 4.19 Eigen Vektor Kriteria Pada *Benefits* Responden Kedua

	Faktor Ekonomi	Faktor Lingkungan	Faktor Sosial	Hasil Normalisasi
Faktor Ekonomi	1	1/4	4	0.2452
Faktor Lingkungan	4	1	5	0.6642
Faktor Sosial	1/4	1/5	1	0.0904

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, terlihat bahwa faktor lingkungan memiliki bobot tertinggi sebesar 0,6642, menunjukkan bahwa aspek keberlanjutan dan dampak terhadap lingkungan menjadi prioritas utama dalam pengambilan keputusan. Faktor ekonomi berada di posisi kedua dengan bobot 0,2452, yang menandakan bahwa efisiensi dan keuntungan finansial tetap dipertimbangkan, namun bukan yang paling dominan. Sementara itu, faktor sosial memiliki bobot terendah sebesar

0,0904, mengindikasikan bahwa pengaruh terhadap masyarakat atau nilai-nilai sosial dipandang kurang berpengaruh dalam konteks ini. Hasil ini mencerminkan orientasi keputusan yang berfokus pada dampak lingkungan jangka panjang, dengan pertimbangan ekonomi sebagai faktor pendukung dan aspek sosial sebagai prioritas yang lebih rendah.

b. *Opportunities*

Dalam aspek *opportunities*, terdapat dua kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu manajerial dan regulasi. Berikut merupakan Tabel 4.20 Eigen Vektor Kriteria *Opportunities* Responden Kedua.

Tabel 4.20 Bobot Kriteria *Opportunities* Responden Kedua

	Manajerial	Regulasi	Nilai Normalisasi
Manajerial	1	$\frac{1}{4}$	0,2000
Regulasi	4	1	0,8000

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, diketahui bahwa regulasi memiliki bobot tertinggi sebesar 0,8000, yang menunjukkan bahwa kesempatan dalam aspek regulasi atau memperoleh sertifikasi yang mendukung kegiatan operasional dan kepercayaan eksternal dianggap lebih dipertimbangkan.

c. *Costs*

Dalam aspek *costs*, terdapat dua kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu operasional dan administrasi. Berikut merupakan Tabel 4.21 Eigen Vektor Kriteria *Costs* Responden Kedua.

Tabel 4.21 Eigen Vektor Kriteria Pada *Costs* Responden Kedua

	Operasional	Administrasi	Nilai Normalisasi
Operasional	1	5	0.8334
Administrasi	$\frac{1}{5}$	1	0.1666

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, terlihat bahwa faktor operasional memiliki bobot dominan sebesar 0,8334, menunjukkan bahwa aspek ini dianggap paling penting dalam pengambilan keputusan maupun penilaian kinerja. Sebaliknya, faktor administrasi hanya memiliki bobot sebesar 0,1666, yang mengindikasikan bahwa biaya pelaksanaan teknis di lapangan lebih diprioritaskan dibandingkan biaya administratif.

d. *Risks*

Dalam aspek *risks*, terdapat tiga kriteria utama yang dijadikan dasar

perbandingan, yaitu SDM, sistem, dan manajerial. Berikut merupakan Tabel 4.22 Eigen Vektor Kriteria *Risks* Responden Kedua.

Tabel 4.22 Eigen Vektor Kriteria *Risks* Responden Kedua

	SDM	Sistem	Manajerial	Nilai Normalisasi
SDM	1	7	5	0,7304
Sistem	1/7	1	4	0,1854
Manajerial	1/5	1/4	1	0,0842

Berdasarkan hasil normalisasi pada tabel di atas, terlihat bahwa kriteria Sumber Daya Manusia (SDM) memiliki bobot tertinggi sebesar 0,7304, menunjukkan bahwa resiko sumber daya manusia lebih diperhatikan. Faktor sistem menempati posisi kedua dengan bobot 0,1854, menandakan bahwa meskipun resiko sistem kerja dan teknologi tetap penting, faktor tersebut masih berada masih dapat dikendalikan. Faktor manajerial memiliki bobot terendah sebesar 0,0842, yang mengindikasikan bahwa resiko ketidak berhasilan manajerial atau pengelolaan strategis dipandang kurang berpengaruh dalam konteks ini.

3. Kesimpulan

Hasil kesimpulan didapatkan dengan merata-ratakan nilai normalisasi dari kedua perhitungan di atas. Berikut merupakan Tabel 4.23 Kesimpulan Prioritas *Benefits*.

Tabel 4.23 Kesimpulan Prioritas *Benefits*

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Faktor Ekonomi	0.2123	0.2452	0.2286
2	Faktor Lingkungan	0.7083	0.6642	0.6863
3	Faktor Sosial	0.0793	0.0904	0.0849

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai normalisasi dari dua responden, diperoleh bahwa faktor lingkungan menempati peringkat pertama dengan rata-rata bobot tertinggi sebesar 0,6863, menunjukkan bahwa manfaat terhadap lingkungan dipandang sebagai faktor paling penting dalam pengambilan keputusan oleh kedua responden. Faktor ekonomi berada di peringkat kedua dengan rata-rata 0,2286, menandakan adanya perhatian yang cukup besar terhadap potensi manfaat ekonomi seperti pendapatan baru atau pasar yang lebih luas. Faktor sosial menempati urutan ketiga dengan bobot 0,0849, menunjukkan bahwa meskipun masih dipertimbangkan, manfaat

sosial tidak menjadi pertimbangan utama dalam mengambil keputusan. Nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.24 Kesimpulan Prioritas Opportunities

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Manajerial	0,6667	0,2000	0,4334
2	Regulasi	0,3333	0,8000	0,5666

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai normalisasi dari dua responden, diperoleh bahwa aspek regulasi menempati peringkat pertama dengan rata-rata bobot tertinggi sebesar 0,5666, menunjukkan bahwa kesempatan mematuhi regulasi dipandang sebagai faktor paling penting dalam pengambilan keputusan oleh kedua responden. Aspek manajerial berada di peringkat kedua dengan rata-rata 0,4334, menandakan adanya perhatian yang cukup besar terhadap kesempatan pada aspek manajerial. Perbedaan pandangan antar responden terlihat pada beberapa aspek, namun secara umum, hasil ini mengindikasikan bahwa keberhasilan proyek lebih banyak mempertimbangkan manfaat regulasi. Nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.25 Kesimpulan Prioritas Costs

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Operasional	0,8334	0,8334	0,8334
2	Administrasi	0,1666	0,1666	0,1666

Berdasarkan hasil tabel di atas, dapat dilihat bahwa aspek operasional memiliki nilai normalisasi tertinggi dengan rata-rata sebesar 0,8334, menempati peringkat pertama dalam penilaian kedua responden. Sebaliknya, aspek administrasi hanya memperoleh nilai rata-rata 0,1666, yang menempatkannya di peringkat kedua, menandakan bahwa meskipun tetap relevan, biaya administratif tidak seberpengaruh biaya operasional dalam pertimbangan pengambilan keputusan. Nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.26 Kesimpulan Prioritas Risks

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	SDM	0,7304	0,7304	0,7304
2	Sistem	0,1854	0,1854	0,1854
3	Manajerial	0,0842	0,0842	0,0842

Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa aspek Sumber Daya Manusia (SDM) memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,7304, yang menunjukkan bahwa resiko tenaga kerja merupakan faktor paling penting menurut kedua responden dalam pengambilan keputusan. Nantinya nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

4.2.2.5 Menentukan Eigen Vektor Sub Kriteria dengan Sub kriteria

Pada bagian ini setiap sub kriteria dibandingkan satu sama lain berdasarkan tingkat kepentingannya. Berikut merupakan pembahasan mengenai menentukan nilai eigen vektor sub kriteria untuk setiap merit dari masing-masing responden.

1. Responden pertama

a. *Benefits* – faktor ekonomi

Dalam aspek *benefit* – faktor ekonomi, terdapat dua sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu efisiensi sumber daya dan penghematan biaya operasional. Berikut merupakan Tabel 4.27 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Ekonomi Responden Pertama.

Tabel 4.27 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Ekonomi Responden Pertama

	Efisiensi Sumber Daya	Penghematan Biaya Operasional	Nilai Normalisasi
Efisiensi Sumber Daya	1	1/8	0,1111
Penghematan Biaya Operasional	8	1	0,8889

Berdasarkan hasil tabel normalisasi di atas, dapat disimpulkan bahwa sub kriteria penghematan biaya operasional memiliki bobot dominan sebesar 0,8889, menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan alternatif pengolahan limbah B3 dalam aspek ekonomi, penghematan biaya operasional dianggap jauh lebih penting dibandingkan efisiensi. Hasil ini merefleksikan bahwa orientasi utama pengambilan keputusan lebih bersifat *cost-saving* daripada optimalisasi operasional.

b. *Benefits* – Faktor Lingkungan

Dalam aspek *benefit* – faktor lingkungan, terdapat dua sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu efektivitas reduksi logam berat dan

pengurangan dampak lingkungan. Berikut merupakan Tabel 4.28 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Lingkungan Responden Pertama.

Tabel 4.28 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Lingkungan Responden Pertama

	Efektivitas Reduksi Logam Berat	Pengurangan Dampak Lingkungan	Nilai Normalisasi
Efektivitas Reduksi Logam Berat	1	1/5	0,1667
Pengurangan Dampak Lingkungan	5	1	0,8333

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa kriteria pengurangan dampak lingkungan memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8333, yang menunjukkan bahwa dalam pengambilan keputusan dalam pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling penting dan dominan. Hasil ini mencerminkan bahwa orientasi penilaian lebih condong pada hasil lingkungan yang nyata dan langsung daripada efisiensi teknis semata.

c. *Benefits* – Faktor Sosial

Dalam aspek *benefit* – faktor sosial, terdapat dua sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu memperbaiki citra perusahaan, kesadaran lingkungan, dan keselamatan kerja. Berikut merupakan Tabel 4.29 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Sosial Responden Pertama.

Tabel 4.29 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Sosial Responden Pertama

	Citra Perusahaan	Kesadaran Lingkungan	Keselamatan Kerja	Nilai Normalisasi
Citra Perusahaan	1	4	1/5	0.2955
Kesadaran Lingkungan	¼	1	1	0.1945
Keselamatan Kerja	5	1	1	0.5100

Berdasarkan matriks perbandingan berpasangan tersebut, dapat dilihat bahwa keselamatan kerja memiliki bobot yang dominan dibandingkan dengan dua kriteria lainnya, yaitu memperbaiki citra perusahaan dan kesadaran lingkungan. Hasil ini mencerminkan bahwa dalam konteks evaluasi aspek sosial atau keberlanjutan, perlindungan terhadap tenaga kerja dipandang sebagai faktor yang paling dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan.

d. *Opportunities* – Manajerial

Dalam aspek *opportunities* – manajerial, terdapat tiga sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu inovasi teknologi, peluang produk baru, dan pasar yang lebih luas. Berikut merupakan Tabel 4.30 Eigen Vektor *Opportunities* – Manajerial Responden Pertama.

Tabel 4.30 Eigen Vektor *Opportunities* – Manajerial Responden Pertama

	Inovasi Teknologi	Peluang Produk Baru	Pasar Yang Lebih Besar	Nilai Normalisasi
Inovasi Teknologi	1	1	2	0.4000
Peluang Produk Baru	1	1	2	0.4000
Pasar Yang Lebih Besar	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0.2000

Berdasarkan matriks perbandingan berpasangan tersebut, dapat dilihat bahwa inovasi teknologi dan peluang produk baru merupakan aspek yang memiliki bobot sama besar. Hasil ini menunjukkan bahwa inovasi teknologi dan peluang produk baru merupakan aspek yang memiliki pengaruh terbesar dalam pertimbangan pengambilan keputusan.

e. *Opportunities* – Regulasi

Dalam aspek *opportunities* – regulasi, terdapat dua sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu sertifikasi dan mendukung *eco-innovation*. Berikut merupakan Tabel 4.31 Eigen Vektor *Opportunities* – Regulasi Responden Pertama.

Tabel 4.31 Eigen Vektor *Opportunities* – Manajerial Responden Pertama

	Sertifikasi	Mendukung <i>Eco-Innovation</i>	Nilai Normalisasi
Sertifikasi	1	5	0,8333
Mendukung <i>Eco-Innovation</i>	$\frac{1}{5}$	1	0,1667

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa sub kriteria sertifikasi memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8333, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan memilih alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

f. *Costs* – Operasional

Dalam aspek *costs* – operasional, terdapat empat subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu biaya investasi awal, biaya pemeliharaan, biaya pelatihan SDM, dan biaya resiko tak terduga. Berikut

merupakan Tabel 4.32 Eigen Vektor *Costs* – Operasional Responden Pertama.

Tabel 4.32 Eigen Vektor *Costs* – Operasional Responden Pertama

	Biaya Investasi Awal	Biaya Pemeliharaan	Biaya Pelatihan SDM	Biaya Resiko Tak Terhingga	Nilai Normalisasi
Biaya Investasi Awal	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	0,0703
Biaya Pemeliharaan	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$	0,1276
Biaya Pelatihan SDM	4	2	1	4	0,4915
Biaya Resiko Tak Terhingga	5	5	$\frac{1}{4}$	1	0,3106

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria biaya pelatihan SDM memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,4915, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

g. *Costs* – administrasi

Dalam aspek *cost* – administrasi, terdapat dua subkriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu biaya perizinan dan biaya audit. Berikut merupakan Tabel 4.33 Eigen Vektor *Costs* – Administrasi Responden Pertama.

Tabel 4.33 Eigen Vektor *Costs* – Administrasi Responden Pertama

	Biaya Perizinan	Biaya Audit	Nilai Normalisasi
Biaya Perizinan	1	2	0,6667
Biaya Audit	$\frac{1}{2}$	1	0,3333

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria biaya perizinan memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,6667, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

h. *Risks* – SDM

Dalam aspek *Risk* – SDM, terdapat dua subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu resiko dalam memulai proyek dibutuhkan pelatihan baru dan resiko pekerja tidak paham. Berikut merupakan Tabel 4.34 Eigen

Vektor *Risks* – SDM Responden Pertama.

Tabel 4.34 Eigen Vektor *Risks* – SDM Responden Pertama

	Pelatihan Baru	Pekerja Tidak Paham	Nilai Normalisasi
Pelatihan Baru	1	5	0,8333
Pekerja Tidak Paham	1/5	1	0,1667

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria pelatihan baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8333, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

i. *Risks* – Sistem

Dalam aspek *risks* - sistem, terdapat dua subkriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu manajerial, regulasi, dan operasional. Berikut merupakan Tabel 4.35 Eigen Vektor *Risks* – Sistem Responden Pertama.

Tabel 4.35 Eigen Vektor *Risks* – Sistem Responden Pertama

	Residu Berbahaya Baru	Kegagalan Teknis	Nilai Normalisasi
Residu Berbahaya Baru	1	5	0,8333
Kegagalan Teknis	1/5	1	0,1667

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria resiko residu berbahaya baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8333, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

j. *Risks* – Manajerial

Dalam aspek *risk* – manajerial, terdapat dua kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu efektivitas reduksi dan pengurangan dampak lingkungan. Berikut merupakan Tabel 4.36 Eigen Vektor *Risks* – Manajerial Responden Pertama.

Tabel 4.36 Eigen Vektor *Risks* – Manajerial Responden Pertama

	Pembuatan SOP Baru	Monitoring	Nilai Normalisasi
Pembuatan SOP Baru	1	2	0,6667
Monitoring	1/2	1	0,3333

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria resiko manajerial yaitu perusahaan harus membuat SOP baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,6667, yang menunjukkan bahwa dalam

konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

2. Responden kedua

a. *Benefits* – Faktor Ekonomi

Dalam aspek *benefit* – faktor ekonomi, terdapat dua subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu efisiensi sumber daya dan penghematan biaya operasional. Berikut merupakan Tabel 4.37 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Ekonomi Responden Kedua.

Tabel 4.37 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Ekonomi Responden Kedua

	Efisiensi Sumber Daya Produksi	Penghematan Biaya Operasional	Nilai Normalisasi
Efisiensi Sumber Daya Produksi	1	1/5	0,1667
Penghematan Biaya Operasional	5	1	0,8333

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria manfaat penghematan biaya operasional memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8333, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

b. *Benefits* – Faktor Lingkungan

Dalam aspek *benefit* – faktor lingkungan, terdapat dua subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu efektivitas reduksi logam berat dan pengurangan dampak lingkungan. Berikut merupakan Tabel 4.38 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Lingkungan Responden Kedua.

Tabel 4.38 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Lingkungan Responden Kedua

	Efektivitas Reduksi Logam Berat	Pengurangan Dampak Lingkungan	Nilai Normalisasi
Efektivitas Reduksi Logam Berat	1	¼	0,2000
Pengurangan Dampak Lingkungan	4	1	0,8000

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria manfaat pengurangan dampak lingkungan memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8000 yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap

paling dipertimbangkan.

c. *Benefits* – Faktor Sosial

Dalam aspek *benefit* – faktor sosial, terdapat dua subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu memperbaiki citra perusahaan, kesadaran lingkungan, dan keselamatan kerja. Berikut merupakan Tabel 4.39 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Sosial Responden Kedua.

Tabel 4.39 Eigen Vektor *Benefits* – Faktor Sosial Responden Kedua

	Citra Perusahaan	Kesadaran Lingkungan	Keselamatan Kerja	Nilai Normalisasi
Citra Perusahaan	1	4	1/5	0.2955
Kesadaran Lingkungan	1/4	1	1	0.1945
Keselamatan Kerja	5	1	1	0.5100

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria manfaat keselamatan kerja memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,5100 yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

d. *Opportunities* – Manajerial

Dalam aspek *opportunities* – manajerial, terdapat tiga subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu inovasi teknologi, peluang produk baru, dan pasar yang lebih luas. Berikut merupakan Tabel 4.40 Eigen Vektor *Opportunities* – Manajerial Responden Kedua.

Tabel 4.40 Eigen Vektor *Opportunities* – Manajerial Responden Kedua

	Inovasi Teknologi	Peluang Produk Baru	Pasar Yang Lebih Besar	Nilai Normalisasi
Inovasi Teknologi	1	1	2	0.4000
Peluang Produk Baru	1	1	2	0.4000
Pasar Yang Lebih Besar	1/2	1/2	1	0.2000

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria kesempatan dalam melakukan inovasi teknologi dan peluang produk baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,4000 yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

e. *Opportunities* – Regulasi

Dalam aspek *opportunities* – regulasi, terdapat dua subkriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu sertifikasi dan mendukung *eco-innovation*. Berikut merupakan Tabel 4.41 Eigen Vektor *Opportunities* – Regulasi Responden Kedua.

Tabel 4.41 Eigen Vektor *Opportunities* – Regulasi Responden Kedua

	Sertifikat	Mendukung <i>Eco-Innovation</i>	Nilai Normalisasi
Sertifikasi	1	4	0.8000
Mendukung <i>Eco-Innovation</i>	$\frac{1}{4}$	1	0.2000

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria kesempatan dalam memperoleh sertifikasi nasional maupun internasional memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8000 yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

f. *Costs* – Operasional

Dalam aspek *costs* – operasional, terdapat empat sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu biaya investasi awal, biaya pemeliharaan, biaya pelatihan SDM, dan biaya resiko tak terduga. Berikut merupakan Tabel 4.42 Eigen Vektor *Costs* – Operasional Responden Kedua.

Tabel 4.42 Eigen Vektor *Costs* – Operasional Responden Kedua

	Biaya Investasi Awal	Biaya Pemeliharaan	Biaya Pelatihan SDM	Biaya Resiko Tak Terduga	Nilai Normalisasi
Biaya Investasi Awal	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	0,0703
Biaya Pemeliharaan	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$	0,1276
Biaya Pelatihan SDM	4	2	1	4	0,4915
Biaya Resiko Tak Terduga	5	5	$\frac{1}{4}$	1	0,3106

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria biaya pelatihan SDM dikarenakan memulai proyek baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,4915 yang menunjukkan bahwa dalam konteks

pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

g. *Costs* – Administrasi

Dalam aspek *cost* – administrasi, terdapat dua subkriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu biaya perizinan dan biaya audit. Berikut merupakan Tabel 4.43 Eigen Vektor *Costs* – Administrasi Responden Kedua.

Tabel 4.43 Eigen Vektor *Costs* – Administrasi Responden Kedua

	Biaya Perizinan	Biaya Audit	Nilai Normalisasi
Biaya Perizinan	1	4	0.8000
Biaya Audit	$\frac{1}{4}$	1	0.2000

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria biaya perizinan untuk memulai sebuah proyek memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8000 yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

h. *Risks* – SDM

Dalam aspek *Risk* – SDM, terdapat dua sub kriteria yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu resiko dalam memulai proyek yaitu kebutuhan pelatihan baru dan resiko pekerja tidak paham. Berikut merupakan Tabel 4.44 Eigen Vektor *Risks* – SDM Responden Kedua.

Tabel 4.44 Eigen Vektor *Risks* – SDM Responden Kedua

	Pelatihan Baru	Pekerja Tidak Paham	Nilai Normalisasi
Pelatihan Baru	1	2	0,6667
Pekerja Tidak Paham	$\frac{1}{2}$	1	0,3333

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria pelatihan baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,6667, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

i. *Risks* – Sistem

Dalam aspek *risks* - sistem, terdapat dua subkriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu manajerial, regulasi, dan operasional. Berikut merupakan Tabel 4.45 Eigen Vektor *Risks* – Sistem Responden Kedua.

Tabel 4.45 Eigen Vektor *Risks* – Sistem Responden Kedua

	Residu Berbahaya Baru	Kegagalan Teknis	Nilai Normalisasi
Residu Berbahaya Baru	1	4	0.8000
Kegagalan Teknis	$\frac{1}{4}$	1	0.2000

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria resiko residu berbahaya baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8000, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

j. *Risks* – Manajerial

Dalam aspek *risk* – manajerial, terdapat dua kriteria utama yang dijadikan dasar perbandingan, yaitu efektivitas reduksi dan pengurangan dampak lingkungan. Berikut merupakan Tabel 4.46 Eigen Vektor *Risks* – Manajerial Responden Kedua.

Tabel 4.46 Eigen Vektor *Risks* – Manajerial Responden Kedua

	Pembuatan SOP Baru	Monitoring	Nilai Normalisasi
Pembuatan SOP Baru	1	4	0.8000
Monitoring	$\frac{1}{4}$	1	0.2000

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa subkriteria resiko manajerial yaitu perusahaan harus membuat SOP baru memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8000, yang menunjukkan bahwa dalam konteks pengambilan keputusan pemilihan alternatif pengolahan limbah B3, aspek ini dianggap paling dipertimbangkan.

3. Kesimpulan

Hasil kesimpulan didapatkan dengan merata-ratakan nilai normalisasi dari kedua perhitungan di atas. Berikut merupakan Tabel 4.47 Kesimpulan Prioritas *Benefits* – Faktor Ekonomi.

Tabel 4.47 Kesimpulan Prioritas *Benefits* – Faktor Ekonomi

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Efisiensi Sumber daya produksi	0.1111	0.1667	0.1389
2	Penghematan Biaya Operasional	0.8889	0.8333	0.8611

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai normalisasi dari dua responden, diperoleh bahwa aspek penghematan biaya operasional menempati peringkat pertama dengan rata-rata bobot tertinggi sebesar 0,8611, menunjukkan bahwa penghematan menjadi pertimbangan utama dalam memulai sebuah proyek baru. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.48 Kesimpulan Prioritas *Benefits* – Faktor Lingkungan

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Efektivitas reduksi logam berat	0,1667	0,2000	0,1834
2	Pengurangan dampak lingkungan	0,8333	0,8000	0.8166

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa nilai normalisasi dari dua responden, diperoleh bahwa pengurangan dampak lingkungan menjadi pertimbangan utama dengan rata-rata bobot tertinggi sebesar 0,834, hal ini sejalan dengan tujuan analisis dampak lingkungan dengan metode LCA sebelumnya. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.49 Kesimpulan Prioritas *Benefits* – Faktor Sosial

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Citra perusahaan	0,2955	0.2955	0.2955
2	Kesadaran lingkungan	0,1945	0,1945	0.1945
3	Keselamatan kerja	0.5100	0.5100	0.5100

Berdasarkan hasil tabel di atas, dapat dilihat bahwa keselamatan kerja menjadi pertimbangan utama dalam memulai proyek baru dengan rata-rata sebesar 0,5100. Keselamatan kerja penting untuk menjadi batas sebuah proyek dikerjakan dengan tepat. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.50 Kesimpulan Prioritas *Opportunities* – Manajerial

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Inovasi teknologi	0,4000	0.4000	0,4000
2	Peluang produk baru	0,4000	0,4000	0,4000
3	Pasar yang lebih besar	0,2000	0,2000	0,2000

Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa inovasi teknologi dan peluang produk baru lebih diprioritaskan untuk dipertimbangkan karena aspek tersebut memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,4000. Hal ini sejalan dengan alternatif yang diberikan terutama pada alternatif ketiga yaitu

mengubah endapan limbah menjadi pupuk. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.51 Kesimpulan Prioritas *Opportunities* – Regulasi

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Sertifikasi	0,8333	0,8000	0,8166
2	Mendukung <i>eco-innovation</i>	0,1667	0,2000	0,1834

Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa sertifikasi dipandang sebagai peluang regulasi paling bernilai karena aspek tersebut memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,8166. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.52 Kesimpulan Prioritas *Cost* – Operasional

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Biaya investasi awal	0,0703	0,0703	0,0703
2	Biaya pemeliharaan	0,1276	0,1276	0,1276
3	Biaya pelatihan SDM	0,4915	0,4915	0,4915
4	Biaya resiko tak terhitung	0,3106	0,3106	0,3106

Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa biaya pelatihan SDM dipandang sebagai peluang regulasi paling bernilai karena aspek tersebut memiliki nilai normalisasi tertinggi sebesar 0,4915. Hal ini berkaitan dengan pengenalan sistem baru kepada pekerja. Nantinya, nilai rata-rata akan digunakan sebagai *input* dalam supermatriks.

Tabel 4.53 Kesimpulan Prioritas *Cost* – Administrasi

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Biaya perizinan	0,6667	0,8000	0,7333
2	Biaya audit	0,3333	0,2000	0,2667

Berdasarkan tabel, aspek biaya perizinan memiliki nilai normalisasi tertinggi 0,7333 sehingga dipandang sebagai beban biaya administratif paling signifikan dibanding biaya audit 0,2667. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konteks keputusan berbasis ANP BOCR, pengendalian atau efisiensi pada proses perizinan perlu menjadi prioritas untuk meminimalkan hambatan dari sisi biaya.

Tabel 4.54 Kesimpulan Prioritas *Risks* – SDM

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Kebutuhan pelatihan baru	0,8333	0,6667	0,7500
2	Pekerja tidak paham	0,1667	0,3333	0,2500

Berdasarkan tabel, aspek kebutuhan pelatihan baru memiliki nilai normalisasi tertinggi yaitu 0,7500 sehingga dipandang sebagai kewajiban memberi pemahaman pada pekerja dibanding pekerja tidak yaitu sebesar 0,2500. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konteks keputusan berbasis ANP BOCR, peningkatan kualitas SDM perlu menjadi prioritas dan dianggap sebagai resiko yang harus ditanggung perusahaan dalam mengubah suatu sistem.

Tabel 4.55 Kesimpulan Prioritas *Risks* – Sistem

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Residu Berbahaya Baru	0,8333	0,8000	0,8166
2	Kegagalan teknis	0,1667	0,2000	0,1834

Berdasarkan tabel, resiko residu berbahaya baru memiliki nilai normalisasi tertinggi yaitu 0,8166 sehingga dipandang sebagai resiko pada suatu sistem. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konteks keputusan berbasis ANP BOCR, residu berbahaya perlu menjadi perhatian khusus terlebih lagi dalam daftar alternatif terdapat opsi penambahan bahan kimia baru yang jumlahnya cukup besar.

Tabel 4.56 Kesimpulan Prioritas *Risks* – Manajerial

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	Pembuatan SOP baru	0,6667	0,8000	0,7333
2	<i>Monitoring</i>	0,3333	0,2000	0,2667

Berdasarkan tabel, aspek resiko residu berbahaya baru memiliki nilai normalisasi tertinggi yaitu 0,8166 sehingga dipandang sebagai resiko pada suatu sistem. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konteks keputusan berbasis ANP BOCR, residu berbahaya perlu menjadi perhatian khusus terlebih lagi dalam daftar alternatif terdapat opsi penambahan bahan kimia baru yang jumlahnya cukup besar.

4.2.2.6 Menentukan Eigen Vektor Alternatif dengan Alternatif.

Tahap ini bertujuan untuk memperoleh nilai prioritas relatif dari masing-masing alternatif terhadap setiap alternatif yang telah ditentukan sebelumnya. Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan nilai eigen vektor dari setiap alternatif oleh responden pertama dan kedua.

1. Alternatif berdasarkan pertimbangan efisiensi sumber daya produksi
Alternatif berdasarkan efisiensi sumber daya produksi merujuk pada pertimbangan alternatif berdasarkan sejauh mana alternatif tersebut dapat meminimalkan pemborosan serta meningkatkan produktivitas. Berikut merupakan Tabel 4.57 Alternatif Berdasarkan Efisiensi Sumber Daya Produksi Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.57 Alternatif Berdasarkan Efisiensi Sumber Daya Produksi Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	2	0.4000	1	½	1/5	0,1282
A2	1	1	2	0.4000	2	1	½	0,2764
A3	½	½	1	0.2000	5	2	1	0,5954

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria efisiensi sumber daya produksi oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.58 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Efisiensi Sumber Daya Produksi

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,4000	0,1282	0,2641
2	A2	0,4000	0,2764	0,3382
3	A3	0,2000	0,5954	0,3977

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks efisiensi sumber daya produksi. Hal ini menunjukkan adanya konsistensi persepsi bahwa alternatif tersebut memiliki kinerja optimal dalam meminimalkan penggunaan energi, bahan baku, maupun waktu produksi. Dengan demikian, alternatif ketiga dipandang sebagai opsi paling unggul dalam mendukung efisiensi operasional secara keseluruhan.

2. Alternatif berdasarkan pertimbangan penghematan biaya operasional
Alternatif berdasarkan efisiensi biaya operasional merujuk pada pemilihan opsi yang mempertimbangkan kemampuan alternatif tersebut dalam menekan pengeluaran operasional, khususnya melalui pengurangan pemborosan yang ditimbulkan akibat tingginya volume limbah produksi. Pendekatan ini

menitikberatkan pada optimalisasi proses agar biaya yang dikeluarkan lebih proporsional terhadap *output* yang dihasilkan, sehingga mendukung efisiensi dan keberlanjutan sistem produksi. Berikut merupakan Tabel 4.59 Alternatif Berdasarkan Penghematan Biaya Operasional Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.59 Alternatif Berdasarkan Penghematan Biaya Operasional Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	4	1/5	0.2846	1	1/3	1	0,2247
A2	1/4	1	1	0.1922	3	1	1/2	0,3702
A3	5	1	1	0.5230	1	2	1	0,4051

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria penghematan biaya operasional oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.60 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Penghematan Biaya Operasional

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0.2846	0,2247	0,2547
2	A2	0.1922	0,3702	0,2812
3	A3	0.5230	0,4051	0,4640

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks penghematan biaya operasional. Hal ini menunjukkan bahwa pembuatan pupuk berbahan dasar endapan memerlukan bahan baku yang tidak cukup banyak dan dapat meningkatkan penghematan biaya yang seharusnya digunakan untuk mereduksi logam berat. Dengan demikian, alternatif ketiga dipandang sebagai opsi paling unggul dalam mendukung menghemat pengeluaran terutama dalam hal operasional perusahaan.

3. Alternatif pada sub kriteria efektivitas reduksi logam berat

Alternatif berdasarkan efisiensi efektivitas reduksi logam berat mengacu pada proses pemilihan opsi yang didasarkan pada sejauh mana alternatif tersebut mampu menurunkan tingkat emisi atau akumulasi logam berat yang dihasilkan selama kegiatan operasional. Penilaian ini mempertimbangkan

efektivitas teknis dalam mereduksi kontaminan logam berat guna meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Berikut merupakan Tabel 4.61 Alternatif Berdasarkan Efektivitas Reduksi Logam Berat Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.61 Alternatif Berdasarkan Efektivitas Reduksi Logam Berat Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1/4	1	0,1603	1	1/6	1/5	0,0836
A2	4	1	5	0,6908	6	1	1	0,4721
A3	1	1/5	1	0,1488	5	1	1	0,4443

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria efektivitas reduksi logam berat oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.62 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Efektivitas Reduksi Logam Berat

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,1603	0,0836	0,1220
2	A2	0,6908	0,4721	0,5815
3	A3	0,1488	0,4443	0,2965

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks efektivitas mereduksi logam berat. Hal ini menunjukkan bahwa pembuatan penambahan bakteri *indigenous* dinilai lebih efektif dan dapat langsung menyelesaikan sumber masalah reduksi logam berat. Dengan demikian, alternatif kedua dipandang sebagai opsi paling unggul.

4. Alternatif pada sub kriteria pengurangan dampak lingkungan

Alternatif berdasarkan pengurangan dampak lingkungan mengacu pada proses pemilihan opsi yang didasarkan pada sejauh mana alternatif tersebut mampu mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari logam berat. Penilaian ini mempertimbangkan efektivitas teknis dalam pengurangan produksi limbah yang dapat mempengaruhi ekosistem. Berikut merupakan Tabel 4.63 Alternatif Berdasarkan Pengurangan Dampak Lingkungan Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.63 Alternatif Berdasarkan Pengurangan Dampak Lingkungan Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	$\frac{1}{4}$	1	0,1840	1	2	1	0,3933
A2	4	1	2	0,5841	$\frac{1}{2}$	1	5	0,4241
A3	1	$\frac{1}{2}$	1	0,2318	1	$\frac{1}{5}$	1	0,1826

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria pengurangan dampak lingkungan oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Nilai tersebut mencerminkan tingkat preferensi masing-masing responden terhadap kemampuan alternatif dalam menghemat pengeluaran selama operasional. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.64 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pengurangan Dampak Lingkungan

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,1840	0,3933	0,2887
2	A2	0,5841	0,4241	0,5041
3	A3	0,2318	0,1826	0,2072

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks pengurangan dampak lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa pembuatan penambahan bakteri *indigenous* dinilai mampu mengurangi dampak lingkungan dengan mereduksi logam berat secara efektif. Dengan demikian, alternatif kedua dipandang sebagai opsi paling unggul.

5. Alternatif pada sub kriteria memperbagus citra perusahaan

Alternatif berdasarkan aspek memperbagus citra perusahaan mengacu pada pemilihan opsi yang didasarkan pada sejauh mana alternatif tersebut mampu menambah citra baik perusahaan. Berikut merupakan Tabel 4.65 Alternatif Berdasarkan Memperbagus Citra Perusahaan Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.65 Alternatif Berdasarkan Memperbagus Citra Perusahaan Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	$\frac{1}{2}$	0,2500	1	1	2	0,4000
A2	1	1	$\frac{1}{2}$	0,2500	1	1	2	0,4000
A3	2	2	1	0,5000	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0,2000

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria pengurangan dampak lingkungan oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.66 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Memperbagus Citra Perusahaan

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,4000	0,3250
2	A2	0,2500	0,4000	0,3250
3	A3	0,5000	0,2000	0,3500

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks bermanfaat untuk menampah citra baik perusahaan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk dapat berkontribusi terhadap peningkatan citra perusahaan. Penerapan teknologi berbasis mikroorganisme tersebut mencerminkan komitmen perusahaan terhadap inovasi ramah lingkungan dan keberlanjutan. Dengan demikian, alternatif kedua dipandang sebagai opsi paling unggul dalam mendukung pengurangan dampak lingkungan.

6. Alternatif pada sub kriteria meningkatkan kesadaran lingkungan

Alternatif berdasarkan aspek kesadaran lingkungan mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan tingkat efektivitas alternatif tersebut dalam mendorong peningkatan pemahaman, kepedulian, dan perilaku ramah lingkungan. Berikut merupakan Tabel 4.67 Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Kesadaran Lingkungan Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.67 Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Kesadaran Lingkungan Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2499	1	½	1/5	0,1282
A2	1	1	4	0,5000	2	1	½	0,2764
A3	2	¼	1	0,2501	5	2	1	0,5954

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria meningkatkan kesadaran lingkungan oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk

setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.68 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Kesadaran Lingkungan

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2499	0,1282	0,1891
2	A2	0,5000	0,2764	0,3881
3	A3	0,2501	0,5954	0,4228

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks menambah kesadaran lingkungan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk dapat meningkatkan keselamatan kerja. Penggunaan agen biologis ini dinilai lebih aman dibandingkan dengan bahan kimia konvensional yang bersifat korosif atau toksik, sehingga dapat mengurangi risiko paparan berbahaya bagi pekerja. Dengan demikian, alternatif kedua dipandang sebagai opsi paling unggul dalam mendukung pengurangan dampak lingkungan.

7. Alternatif pada sub kriteria meningkatkan keselamatan kerja

Alternatif berdasarkan aspek keselamatan kerja mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan sejauh mana suatu alternatif dapat menjamin perlindungan terhadap kesehatan dan keselamatan tenaga kerja selama proses operasional berlangsung. Penilaian ini merefleksikan kemampuan alternatif dalam membentuk sistem kerja yang aman, terkontrol, dan sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku. Berikut merupakan Tabel 4.69 Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Keselamatan Kerja Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.69 Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Keselamatan Kerja Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2499	1	2	1	0,3933
A2	1	1	4	0,5000	½	1	5	0,4241
A3	2	¼	1	0,2501	1	1/5	1	0,1826

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria meningkatkan keselamatan kerja oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap

alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.70 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Meningkatkan Keselamatan Kerja

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2499	0,3933	0,3216
2	A2	0,5000	0,4241	0,4620
3	A3	0,2501	0,1826	0,2164

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks menambah keselamatan kerja. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *indigenous* dalam proses reduksi logam berat berpotensi meningkatkan keselamatan kerja. Pendekatan biologis ini cenderung lebih aman dibandingkan metode kimiawi atau fisik yang berisiko tinggi terhadap kesehatan pekerja, seperti paparan bahan beracun atau suhu ekstrem. Oleh karena itu, penggunaan bakteri *indigenous* dapat menjadi strategi yang mendukung terciptanya lingkungan kerja yang lebih sehat dan berkelanjutan. Dengan demikian, alternatif kedua dipandang sebagai opsi paling unggul.

8. Alternatif pada sub kriteria inovasi teknologi

Alternatif berdasarkan aspek inovasi teknologi mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan sejauh mana suatu alternatif dapat memunculkan inovasi teknologi baru. Berikut merupakan Tabel 4.71 Alternatif Berdasarkan Inovasi Teknologi Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.71 Alternatif Berdasarkan Inovasi Teknologi Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2				
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	
A1	1	1	0,5	0,2500	1	½	1/5	0,1282	
A2	1	1	0,5	0,2500	2	1	½	0,2764	
A3	2	2	1	0,5000	5	2	1	0,5954	

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria inovasi teknologi oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.72 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Inovasi Teknologi

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,1282	0,1891
2	A2	0,2500	0,2764	0,2632
3	A3	0,5000	0,5954	0,5477

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks inovasi teknologi. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk dari limbah B3 berpotensi mendorong lahirnya inovasi teknologi baru di bidang pengelolaan limbah berbahaya. Pendekatan ini mencerminkan integrasi bioteknologi dalam pengolahan limbah yang tidak hanya bertujuan untuk mitigasi dampak lingkungan, tetapi juga menghasilkan nilai tambah melalui konversi limbah menjadi produk yang berguna. Dengan demikian, alternatif ketiga dipandang sebagai opsi paling unggul dalam memunculkan inovasi teknologi baru.

9. Alternatif pada sub kriteria peluang produk baru

Alternatif berdasarkan aspek inovasi teknologi mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan sejauh mana suatu alternatif dapat memunculkan produk baru. Berikut merupakan Tabel 4.73 Alternatif Berdasarkan Peluang Produk Baru Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.73 Alternatif Berdasarkan Peluang Produk Baru Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	½	1/5	0,1282	1	1	½	0,2500
A2	2	1	½	0,2764	1	1	½	0,2500
A3	5	2	1	0,5954	2	2	1	0,5000

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria peluang produk baru oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.74 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Peluang Produk Baru

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,1282	0,2500	0,1891
2	A2	0,2764	0,2500	0,2632
3	A3	0,5954	0,5000	0,5477

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks peluang produk baru. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk dari limbah B3 berpotensi mendorong pengembangan produk baru di bidang pengelolaan limbah berbahaya. Inovasi ini mencerminkan pendekatan bioteknologi yang tidak hanya fokus pada mitigasi dampak negatif limbah, tetapi juga pada transformasi limbah menjadi produk bernilai guna. Dengan demikian, strategi tersebut dapat menjadi solusi alternatif yang inovatif dan berkelanjutan dalam manajemen limbah B3. Dengan demikian, alternatif ketiga dipandang sebagai opsi paling unggul dalam memunculkan produk baru.

10. Alternatif pada sub kriteria pasar yang lebih besar

Alternatif berdasarkan aspek pasar yang lebih besar mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan sejauh mana suatu alternatif dapat memperluas pasar. Berikut merupakan Tabel 4.75 Alternatif Berdasarkan Pasar Yang Lebih Besar Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.75 Alternatif Berdasarkan Pasar Yang Lebih Besar Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	$\frac{1}{2}$	0,2500	1	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$	0,1245
A2	1	1	$\frac{1}{2}$	0,2500	6	1	1	0,5172
A3	2	2	1	0,5000	2	1	1	0,3583

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria pasar yang lebih besar oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.76 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pasar Yang Lebih Besar

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,1245	0,1872
2	A2	0,2500	0,5172	0,3836
3	A3	0,5000	0,3583	0,4292

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam

konteks peluang produk baru. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk dari limbah B3 berpotensi memperluas pangsa pasar melalui pengembangan produk yang inovatif dan ramah lingkungan. Pendekatan ini dapat meningkatkan daya saing produk dengan menawarkan solusi berkelanjutan yang sejalan dengan tren pasar global terhadap praktik industri hijau. Oleh karena itu, strategi ini tidak hanya mendukung pengelolaan limbah secara efektif, tetapi juga membuka peluang penetrasi ke segmen pasar yang lebih luas dan berorientasi pada keberlanjutan.

11. Alternatif pada sub kriteria sertifikasi

Alternatif berdasarkan aspek sertifikasi mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan sejauh mana suatu alternatif dapat menjadi alasan untuk memperoleh sertifikasi pengolahan limbah. Berikut merupakan Tabel 4.77 Alternatif Berdasarkan Sertifikasi Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.77 Alternatif Berdasarkan Sertifikasi Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2499	1	2	1	0,3933
A2	1	1	4	0,5000	½	1	5	0,4241
A3	2	¼	1	0,2501	1	1/5	1	0,1826

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria sertifikasi oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.78 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Sertifikasi

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2499	0,3933	0,3216
2	A2	0,5000	0,4241	0,4621
3	A3	0,2501	0,1826	0,2163

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks potensi menghasilkan sertifikasi. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *indigenous* dalam proses reduksi limbah B3 berpotensi mendukung pencapaian sertifikasi lingkungan, mengingat kemampuannya

dalam menurunkan kadar pencemar hingga memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Pendekatan biologis ini dinilai efektif dalam menyesuaikan karakteristik limbah dengan ketentuan peraturan perundang-undangan terkait pengelolaan limbah berbahaya dan beracun. Strategi ini dapat meningkatkan kepatuhan terhadap regulasi sekaligus memperkuat kredibilitas perusahaan.

12. Alternatif pada sub kriteria *eco-innovation*

Alternatif berdasarkan aspek *eco-innovation* mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan sejauh mana suatu alternatif menuju ke arah ekonomi hijau dan keberlanjutan jangka panjang. Berikut merupakan Tabel 4.79 Alternatif Berdasarkan *Eco-Innovation* Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.79 Alternatif Berdasarkan *Eco-Innovation* Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2500	1	¼	½	0,1494
A2	1	1	½	0,2500	4	1	1	0,4742
A3	2	2	1	0,5000	2	1	1	0,3764

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria *eco-innovation* oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.80 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan *Eco-Innovation*

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,1494	0,1997
2	A2	0,2500	0,4742	0,3621
3	A3	0,5000	0,3764	0,4382

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks *eco-Innovation*. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk berbahan dasar limbah B3 berpotensi mendukung penerapan konsep *eco-innovation*. Pendekatan ini memunculkan inovasi dalam pengelolaan limbah berbahaya untuk menghasilkan produk yang bernilai guna, sekaligus meminimalkan dampak lingkungan, dan mendukung ekonomi hijau. Strategi ini dapat meningkatkan kepatuhan terhadap regulasi sekaligus memperkuat kredibilitas perusahaan.

13. Alternatif pada sub kriteria biaya investasi awal

Alternatif berdasarkan aspek biaya investasi awal mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan besarnya estimasi pengeluaran modal yang diperlukan pada tahap awal implementasi. Penilaian ini difokuskan pada identifikasi alternatif yang berpotensi memerlukan alokasi dana investasi awal tertinggi dibandingkan opsi lainnya. Berikut merupakan Tabel 4.81 Alternatif Berdasarkan Biaya Investasi Awal Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.81 Alternatif Berdasarkan Biaya Investasi Awal Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	2	$\frac{1}{2}$	0,3274	1	4	$\frac{1}{2}$	0,4001
A2	$\frac{1}{2}$	1	1	0,2600	$\frac{1}{4}$	1	1	0,2000
A3	2	1	1	0,4126	2	1	1	0,3999

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria biaya investasi awal oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.82 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Investasi Awal

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,3274	0,4001	0,3638
2	A2	0,2600	0,2000	0,2300
3	A3	0,4126	0,3999	0,4062

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks biaya investasi awal. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan bakteri *Thiobacillus* dalam proses pembuatan pupuk berbahan dasar limbah B3 diperkirakan memerlukan alokasi biaya investasi awal yang tinggi.

14. Alternatif pada sub kriteria biaya pemeliharaan

Alternatif berdasarkan aspek biaya pemeliharaan mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan besarnya potensi kebutuhan biaya yang harus dikeluarkan untuk operasional jangka panjang. Berikut merupakan Tabel 4.83 Alternatif Berdasarkan Biaya Pemeliharaan Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.83 Alternatif Berdasarkan Biaya Pemeliharaan Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	2	0.4000	1	2	1	0,3933
A2	1	1	2	0.4000	½	1	5	0,4241
A3	½	½	1	0.2000	1	1/5	1	0,1826

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria biaya pemeliharaan oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.84 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Pemeliharaan

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0.4000	0,3933	0,3967
2	A2	0.4000	0,4241	0,4120
3	A3	0.2000	0,1826	0,1913

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks biaya pemeliharaan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *indigenous* dalam proses reduksi logam berat diperkirakan memerlukan biaya pemeliharaan yang relatif tinggi. Estimasi tersebut didasarkan pada kebutuhan *monitoring* berkala, pengaturan kondisi lingkungan mikroba yang stabil, serta pemeliharaan sistem biologis.

15. Alternatif pada sub kriteria biaya pelatihan SDM

Alternatif berdasarkan aspek biaya pelatihan SDM mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan besarnya potensi kebutuhan biaya yang harus dikeluarkan untuk melatih pekerja jika diaplikasikan proyek tersebut. Berikut merupakan Tabel 4.85 Alternatif Berdasarkan Biaya Pelatihan SDM Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.85 Alternatif Berdasarkan Biaya Pelatihan SDM Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2500	1	1/6	½	0,1245
A2	1	1	½	0,2500	6	1	1	0,5172
A3	2	2	1	0,5000	2	1	1	0,3583

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria biaya pelatihan SDM oleh

kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.86 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Pelatihan SDM

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,1245	0,1873
2	A2	0,2500	0,5172	0,3836
3	A3	0,5000	0,3583	0,4291

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks biaya pemeliharaan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *thiobacillus* berpotensi menambah biaya untuk pelatihan pekerja agar memahami proses pembuatan produk baru tersebut.

16. Alternatif pada sub kriteria biaya resiko tak terduga

Alternatif berdasarkan aspek biaya risiko tak terduga mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan estimasi potensi pengeluaran yang mungkin timbul akibat kejadian tidak terencana atau di luar prediksi, seperti kerusakan teknis, gangguan operasional, atau perubahan regulasi mendadak. Berikut merupakan Tabel 4.87 Alternatif Berdasarkan Biaya Resiko Tak Terduga Menurut Responden 1 dan 2.

4.87 Alternatif Berdasarkan Biaya Resiko Tak Terduga Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	2	½	0,3274	1	4	½	0,4001
A2	½	1	1	0,2600	¼	1	1	0,2000
A3	2	1	1	0,4126	2	1	1	0,3999

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria biaya tak terduga oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.88 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Tak Terduga

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,3274	0,4001	0,3638
2	A2	0,2600	0,2000	0,2300
3	A3	0,4126	0,3999	0,4062

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks biaya tak terduga. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam aplikasinya berpotensi menimbulkan biaya tak terduga, yang disebabkan oleh kebutuhan penyesuaian lingkungan mikroba, ketidakpastian efektivitas biologis, atau kemungkinan gangguan teknis selama proses operasional.

17. Alternatif pada sub kriteria biaya perizinan

Alternatif berdasarkan aspek biaya perizinan mengacu pada proses seleksi opsi yang mempertimbangkan estimasi besarnya potensi pengeluaran yang diperlukan untuk memenuhi persyaratan administratif dan regulatif terkait perizinan. Berikut merupakan Tabel 4.89 Alternatif Berdasarkan Biaya perizinan Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.89 Alternatif Berdasarkan Biaya perizinan Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2500	1	½	1/5	0,1282
A2	1	1	½	0,2500	2	1	½	0,2764
A3	2	2	1	0,5000	5	2	1	0,5954

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria biaya perizinan oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.90 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Perizinan

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,1282	0,1891
2	A2	0,2500	0,2764	0,2632
3	A3	0,5000	0,5954	0,5477

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks biaya tak terduga. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam aplikasinya berpotensi memerlukan biaya perizinan yang relatif tinggi, terutama karena keterkaitannya dengan pengelolaan limbah B3 dan penerapan teknologi berbasis mikroorganisme.

18. Alternatif pada sub kriteria biaya audit

Alternatif berdasarkan aspek biaya audit mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan estimasi besarnya potensi pengeluaran yang diperlukan untuk pelaksanaan proses audit, baik internal maupun eksternal. Penilaian ini mencakup evaluasi terhadap frekuensi audit, kompleksitas sistem yang diaudit, serta keterlibatan pihak ketiga sebagai auditor independen. Berikut merupakan Tabel 4.91 Alternatif Berdasarkan Biaya Audit Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.91 Alternatif Berdasarkan Biaya Audit Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	$\frac{1}{2}$	0,2499	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	0,1494
A2	1	1	4	0,5000	4	1	1	0,4742
A3	2	$\frac{1}{4}$	1	0,2501	2	1	1	0,3764

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria biaya audit oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.92 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Biaya Audit

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2499	0,1494	0,1997
2	A2	0,5000	0,4742	0,4871
3	A3	0,2501	0,3764	0,3132

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks biaya pemeliharaan. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan bakteri *indigenous* dalam proses reduksi logam berat diperkirakan memerlukan biaya audit yang relatif tinggi, mengingat perlunya verifikasi terhadap efektivitas biologis.

19. Alternatif pada sub kriteria pelatihan baru

Alternatif berdasarkan aspek risiko pelatihan baru mengacu pada pemilihan opsi yang mempertimbangkan potensi timbulnya kebutuhan pelatihan tambahan akibat penerapan sistem atau prosedur baru dalam suatu proyek. Berikut merupakan Tabel 4.93 Alternatif Berdasarkan Pelatihan Baru

Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.93 Alternatif Berdasarkan Pelatihan Baru Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	2	½	0,3274	1	¼	½	0,1494
A2	½	1	1	0,2600	4	1	1	0,4742
A3	2	1	1	0,4126	2	1	1	0,3764

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria pelatihan baru oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.94 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pelatihan Baru

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,3274	0,1282	0,2278
2	A2	0,2600	0,2764	0,2682
3	A3	0,4126	0,5954	0,5040

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks pelatihan baru. Hal ini mengindikasikan bahwa pembuatan produk baru dengan pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam aplikasinya berpotensi memerlukan pelatihan baru, terutama karena keterkaitannya dengan pengelolaan limbah B3 dan penerapan teknologi berbasis mikroorganisme.

20. Alternatif pada sub kriteria pekerja tidak paham

Alternatif berdasarkan aspek risiko karyawan tidak paham mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan potensi timbulnya kesalahpahaman pekerja dalam kegiatan operasionalnya. Berikut merupakan Tabel 4.95 Alternatif Berdasarkan Pekerja Tidak Paham Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.95 Alternatif Berdasarkan Pekerja Tidak Paham Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2500	1	½	1/5	0,1282
A2	1	1	½	0,2500	2	1	½	0,2764
A3	2	2	1	0,5000	5	2	1	0,5954

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria resiko pekerja tidak paham

oleh kedua responden, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.96 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Pekerja Tidak Paham

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,1282	0,1891
2	A2	0,2500	0,2764	0,2632
3	A3	0,5000	0,5954	0,5477

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks pelatihan baru. Hal ini mengindikasikan bahwa pembuatan produk baru dengan pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam aplikasinya berpotensi tidak mudah untuk dipahami oleh pekerja, terutama karena keterkaitannya dengan pengelolaan limbah B3 dan penerapan teknologi berbasis mikroorganisme.

21. Alternatif pada sub kriteria residu berbahaya baru

Alternatif berdasarkan aspek risiko residu berbahaya baru mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan potensi timbulnya konsekuensi dari pengaplikasian alternatif tersebut. Berikut merupakan Tabel 4.97 Alternatif Berdasarkan Residu Berbahaya Baru Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.97 Alternatif Berdasarkan Residu Berbahaya Baru Menurut Responden 1 dan 2

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	2	½	0,3274	1	2	5	0,5955
A2	½	1	1	0,2600	0,5	1	2	0,2763
A3	2	1	1	0,4126	0,2	0,5	1	0,1282

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria risiko residu berbahaya baru, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.98 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Residu Berbahaya Baru

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,3274	0,5955	0,4615
2	A2	0,2600	0,2763	0,2682
3	A3	0,4126	0,1282	0,2704

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif pertama memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks proyek yang dapat memunculkan residu berbahaya baru. Hal ini mengindikasikan bahwa aplikasi kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalam proses reduksi logam berat berpotensi menimbulkan residu sekunder sebagai hasil samping reaksi kimia yang terjadi. Pembentukan residu tersebut dapat menambah beban pengelolaan limbah lanjutan dan memengaruhi efisiensi keseluruhan proses remediasi. Oleh karena itu, potensi munculnya residu baru perlu dipertimbangkan dalam evaluasi lingkungan dan teknis terhadap penggunaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebagai agen pereduksi.

22. Alternatif pada sub kriteria kegagalan teknis

Alternatif berdasarkan aspek risiko kegagalan teknis mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan potensi gagal dalam pengoperasiannya. Berikut merupakan Tabel 4.99 Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.99 Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	2	½	0,3274	1	2	1	0,3933
A2	½	1	1	0,2600	½	1	5	0,4241
A3	2	1	1	0,4126	1	1/5	1	0,1826

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria resiko gagal, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Nilai tersebut mencerminkan tingkat preferensi masing-masing responden terhadap alternatif yang diperkirakan dapat gagal. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.100 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,3274	0,3933	0,3604
2	A2	0,2600	0,4241	0,3420
3	A3	0,4126	0,1826	0,2976

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif pertama memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks proyek yang dapat gagal secara teknis. Hal ini mengindikasikan bahwa aplikasi kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalam proses reduksi logam berat memiliki potensi kegagalan, terutama apabila kondisi reaksi tidak memenuhi parameter optimum seperti pH, suhu, atau konsentrasi logam.

23. Alternatif pada sub kriteria pembuatan SOP baru

Alternatif berdasarkan aspek risiko pembuatan SOP baru mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan dalam pembuatan SOP sistem terbaru. Berikut merupakan Tabel 4.101 Alternatif Berdasarkan Pembuatan SOP Baru Menurut Responden 1 dan 2.

Tabel 4.101 Alternatif Berdasarkan Pembuatan SOP Baru Menurut Responden 1 dan 2

	Responden 1				Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	½	0,2500	1	1/6	1/5	0,0836
A2	1	1	½	0,2500	6	1	1	0,4721
A3	2	2	1	0,5000	5	1	1	0,4443

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria resiko dalam pembuatan SOP baru, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.102 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0,2500	0,0836	0,1668
2	A2	0,2500	0,4721	0,3611
3	A3	0,5000	0,4443	0,4721

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif ketiga memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks pelatihan baru. Hal ini mengindikasikan bahwa pengembangan produk baru melalui pemanfaatan bakteri *Thiobacillus* dalam aplikasinya

yang paling memerlukan penyusunan standar operasional prosedur (SOP) terbaru sebagai acuan pelaksanaan kerja.

24. Alternatif pada sub kriteria resiko *monitoring*

Alternatif berdasarkan aspek risiko *monitoring* baru mengacu pada proses pemilihan opsi yang mempertimbangkan dalam *monitoring* sistem terbaru. Berikut merupakan Tabel 4.103 Alternatif Berdasarkan *Monitoring* Menurut Responden Pertama.

Tabel 4.103 Alternatif Berdasarkan *Monitoring* Menurut Responden Pertama

Responden 1					Responden 2			
	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi	A1	A2	A3	Nilai Normalisasi
A1	1	1	2	0.4000	1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	0,1494
A2	1	1	2	0.4000	4	1	1	0,4742
A3	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0.2000	2	1	1	0,3764

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen vektor dari masing-masing alternatif yang dievaluasi berdasarkan sub-kriteria resiko dalam *monitoring*, diperoleh bobot prioritas relatif untuk setiap alternatif. Kesimpulan dari analisis tersebut disajikan secara sistematis dalam tabel berikut untuk mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

Tabel 4.104 Kesimpulan Alternatif Berdasarkan Kegagalan Teknis

No	Aspek	Nilai Normalisasi		Rata-Rata
		Responden 1	Responden 2	
1	A1	0.4000	0,1494	0,2747
2	A2	0.4000	0,4742	0,4371
3	A3	0.2000	0,3764	0,2882

Berdasarkan data yang disajikan pada tabel di atas, diketahui bahwa alternatif kedua memperoleh nilai prioritas tertinggi dari kedua responden dalam konteks *monitoring*. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan bakteri *indigenous* dalam proses reduksi logam berat diperkirakan memerlukan frekuensi pengawasan yang lebih intensif. Kebutuhan ini disebabkan oleh sensitivitas mikroorganisme terhadap kondisi lingkungan, seperti pH, suhu, dan ketersediaan nutrisi, yang dapat memengaruhi efektivitas proses biologis.

4.2.2.7 Supermatriks

Dalam metode ANP, supermatriks berfungsi sebagai alat representasi matematis yang menggambarkan hubungan saling ketergantungan dan keterkaitan antar elemen maupun kluster dalam suatu sistem pengambilan keputusan yang kompleks. Melalui supermatriks, seluruh faktor yang berada dalam kerangka BOCR (*Benefits, Opportunities, Costs, dan Risks*) dapat diintegrasikan secara terstruktur sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai pengaruh relatif setiap elemen terhadap tujuan akhir keputusan. Berikut merupakan Tabel 4.105 Supermatriks ANP – BOCR.

Tabel 4.105 Supermatriks ANP – BOCR

Merit	Kriteria	Sub kriteria	A1	A2	A3
<i>Benefits</i> (0,4484)	Faktor Ekonomi (0,2286)	Efisiensi sumber daya produksi (0,1389)	0,2641	0,3382	0,3977
		Penghematan biaya operasional (0,8611)	0,2547	0,2812	0,4640
	Faktor Lingkungan (0,6863)	Efektivitas reduksi logam berat (0,1834)	0,1220	0,5815	0,2965
		Pengurangan dampak lingkungan (0,8166)	0,2887	0,5041	0,2072
	Faktor Sosial (0,0849)	Memperbagus citra perusahaan (0,2955)	0,3250	0,3250	0,3500
		Meningkatkan kesadaran lingkungan (0,1945)	0,1891	0,3881	0,4228
		Meningkatkan keselamatan kerja (0,5100)	0,3216	0,4620	0,2164
	Sintesis <i>benefits</i>		0,2609	0,4563	0,2825
	Normalisasi <i>benefits</i>		0,2610	0,4564	0,2826
<i>Opportunities</i> (0,1846)	Manajerial (0,4334)	Inovasi teknologi (0,4000)	0,1891	0,2632	0,5477
		Peluang produk baru (0,4000)	0,1891	0,2632	0,5477
		Pasar yang lebih besar (0,2000)	0,1872	0,3836	0,4292
	Regulasi (0,5666)	Sertifikasi standar internasional (0,8166)	0,3216	0,4621	0,2163
		Mendukung <i>eco-innovation</i> (0,1834)	0,1997	0,3621	0,4382
	Sintesis <i>opportunities</i>		0,2513	0,3759	0,3727
	Normalisasi <i>opportunities</i>		0,2513	0,3759	0,3727

Tabel 4.105 Supermatriks ANP – BOCR (Lanjutan)

Merit	Kriteria	Sub kriteria	A1	A2	A3
Costs (0,1637)	Operasional (0,8334)	Biaya investasi awal (0,0703)	0,3638	0,2300	0,4062
		Biaya pemeliharaan (0,1276)	0,3967	0,4120	0,1913
		Biaya pelatihan SDM (0,4915)	0,1873	0,3836	0,4291
		Biaya resiko tak terduga (0,3106)	0,3638	0,2300	0,4062
	Administrasi (0,1666)	Biaya perizinan (0,7333)	0,1891	0,2632	0,5477
		Biaya audit (0,2667)	0,1997	0,4871	0,3132
Sintesis costs			0,2664	0,3278	0,4059
Normalisasi costs			0,2663	0,3278	0,4059
Risks (0,2033)	SDM (0,7304)	Kebutuhan pelatihan baru (0,7500)	0,2278	0,2682	0,5040
		Karyawan tidak paham (0,2500)	0,1891	0,2632	0,5477
	Sistem (0,1854)	Residu berbahaya baru (0,8166)	0,4615	0,2682	0,2704
		Kegagalan teknis (0,1834)	0,3604	0,3420	0,2976
	Manajerial (0,0842)	Pembuatan SOP baru (0,7333)	0,1668	0,3611	0,4721
		Monitoring (0,2667)	0,2747	0,4371	0,2882
Sintesis risks			0,2579	0,2793	0,4628
Normalisasi risks			0,2579	0,2793	0,4628

4.2.2.8 Menentukan Prioritas Alternatif Berdasarkan Tabel BOCR

Pembahasan pada bagian ini bertujuan untuk menentukan prioritas alternatif berdasarkan hasil penggabungan bobot dari keempat aspek utama dalam metode BOCR, yaitu *Benefit*, *Opportunity*, *Cost*, dan *Risk*. Berikut merupakan Tabel 4.106 Sintesis Prioritas Akhir BOCR.

Tabel 4.106 Sintesis Prioritas Akhir BOCR

Alternatif	<i>Benefits</i>	<i>Opportunities</i>	<i>Costs</i>	<i>Risks</i>	<i>Additive</i>	<i>Multiple</i>	Ranking
	0,4484	0,1846	0,1637	0,2033	$wB + wO - wC - wR$	$(B \times O) / (C \times R)$	
A1	0,2610	0,2513	0,2663	0,2579	0,0674	0,9550	2
A2	0,4564	0,3759	0,3278	0,2793	0,1636	1,8739	1
A3	0,2826	0,3727	0,4059	0,4628	0,0350	0,5607	3

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa prioritas akhir metode BOCR pada Tabel 4.106, dapat disimpulkan bahwa alternatif A2 merupakan opsi yang paling optimal dengan nilai tertinggi pada kedua pendekatan, yaitu *additive* sebesar 0,1636 dan *multiplicative* sebesar 1,8739. Alternatif ini menunjukkan kinerja yang

baik pada aspek *benefits* dan *opportunities*, sekaligus menjaga nilai *costs* dan *risks* pada tingkat yang relatif lebih rendah dibandingkan alternatif lainnya. Sementara itu, alternatif A1 menempati posisi kedua dan A3 berada pada peringkat terakhir, yang menunjukkan bahwa A3 memiliki beban *costs* dan *risks* yang tinggi sehingga mengurangi skor akhir secara signifikan. Dengan demikian, A2 menjadi rekomendasi utama untuk diimplementasikan berdasarkan analisis komprehensif keempat aspek BOCR.

Mikroorganisme yang mampu melakukan remediasi logam berat di antaranya adalah bakteri (*Bacillus sp*, *Pseudomonas sp*, dan *Escherichia coli*); *chrysogenum*, kapang *Rhizopus* (*Penicillium stolonifer* *Aspergillus oryzae*) dan *khamir*, *Saccharomyces cerevisiae*). Penggunaan mikroba *indigenous* untuk menurunkan atau mereduksi logam timbal perlu diuji sebagai alternatif untuk pemulihan tanah ataupun air tercemar tergantung kondisi lingkungan di tanah tersebut. Salah satu metode bioremediasi yang menggunakan bakteri adalah metode lumpur aktif. Lumpur aktif dibuat menggunakan tanah sawah sebagai sumber massa mikrobial (Nugroho, 2018).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dalam sebuah penelitian merupakan bagian terakhir yang berisi jawaban atas semua rumusan masalah yang diberikan. Berikut merupakan kesimpulan dari penelitian ini.

1. Berdasarkan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) didapatkan bahwa dampak lingkungan terbesar yang berpotensi muncul adalah *terrestrial ecotoxicity* sebesar $6,2E+07$ pt. *Terrestrial ecotoxicity* adalah kategori dampak lingkungan yang mengukur potensi zat berbahaya (biasanya logam berat) untuk mencemari dan membahayakan ekosistem daratan, termasuk tanah, organisme tanah, dan makhluk hidup lainnya. Masalah *terrestrial ecotoxicity* disebabkan oleh limbah berbahaya dari proses peleburan yang tidak berhasil direduksi secara optimal dalam sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL).
2. Berdasarkan dampak lingkungan tersebut dirumuskan tiga solusi alternatif dalam penanganan limbah dalam instalasi pengolahan air limbah. Pertama, adalah penambahan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) ke dalam limbah. Kalsium hidroksida berguna untuk meningkatkan pH limbah menjadi basa kuat. PH kuat dapat meleburkan kromium menjadi Cr(OH)_3 . Kedua adalah dengan menambahkan bakteri *indigenous* ke dalam limbah yang mana dapat menurunkan atau mereduksi Pb, Hg, Cu, dan Cr. Ketiga adalah dengan mengubah *sludge* atau endapan lumpur limbah menjadi pupuk dengan menambahkan kotoran hewan, kapur, dan kompos.
3. Berdasarkan metode ANP – BOCR didapatkan bahwa solusi alternatif kedua menjadi prioritas untuk diaplikasikan dengan nilai *additive* dan *multiple* terbesar yaitu 0,1636 dan 1,8739. Alternatif pertama menempati posisi kedua dengan nilai *additive* dan *multiple* adalah sebesar 0,0674 dan 0,9550. Alternatif ketiga menempati posisi ketiga dengan nilai *additive* dan *multiple*

sebesar 0,0350 dan 0,5607. Nilai *additive* dan *multiple* mengartikan bahwa alternatif tersebut dapat diproyeksikan ke dalam kebijakan jangka pendek maupun jangka panjang. Alternatif kedua dilihat sebagai solusi yang paling memunculkan banyak manfaat dan peluang, dan paling memunculkan sedikit resiko dan biaya.

5.2 Saran

Saran merupakan pendapat, usulan, atau rekomendasi yang diberikan berdasarkan hasil analisis atau kajian tertentu, dengan tujuan untuk memperbaiki, meningkatkan, atau mengarahkan tindakan ke depan agar lebih efektif, efisien, atau sesuai tujuan. Berikut merupakan saran dalam penelitian ini.

1. Diperlukan pengolahan data inventori dengan menggunakan perangkat lunak yang memiliki kemampuan pemodelan dan peramalan hasil di masa mendatang, seperti GaBi.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut terkait analisis dampak lingkungan setelah pengaplikasian alternatif A2.
3. *Monitoring* secara berkala dibutuhkan untuk mengawasi kinerja dan dampak lingkungan dari penerapan alternatif A2 agar tetap sesuai dengan tujuan keberlanjutan
4. Diperlukan analisis biaya guna menilai kelayakan ekonomi dari alternatif A2 sebelum diterapkan secara luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Amandha H. P., Ishardita P. T., Ratih A. S. (2014). Evaluasi dampak lingkungan produk kertas dengan menggunakan life cycle assessment (LCA) dan analytic network process (ANP).
- Ascarya, A. (2005). Analytic Network Process (ANP): Pendekatan Baru Studi Kualitatif. In Seminar *Intern Program Magister Akuntansi Fakultas Ekonomi Universitas Trisakti* (pp. 1-52).
- Assauri, Sofjan. (2008). *Manajemen Produksi dan Operasi*. Edisi 4. Jakarta: Lembaga Penerbit Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia.
- Dumairy. (1996). *Perekonomian Indonesia*. Jakarta: Erlangga.
- EL SABBAGH, R. A. G. H. D. A. (2023). Adoption Of Emerging Technology Tools In Logistics Industry: Prioritization Using Anp And Bocr Methods.
- Kautzar, G. Z., Sumantri, Y., & Yuniarti, R. (2015). Analisis dampak lingkungan pada aktivitas supply chain produk kulit menggunakan Metode LCA dan ANP. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Sistem Industri*, 3(1), 132403.
- Pati, S. N. (2022). *Life cycle assessment: Future challenges*. CRC Press.
- Peker, I., Baki, B., Tanyas, M., & Murat Ar, I. (2016). Logistics center site selection by ANP/BOCR analysis: A case study of Turkey. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(4), 2383-2396.
- Petrillo, A., Cooper, O., & De Felice, F. (2011). Supply chain design by integrating multicriteria decision analysis and a sustainability approach. *Journal of Engineering*, 1(1), 91-105.
- Reinfeld, N. V. (1982). *Production and inventory control*. Virginia: Reston Pulishing Company.
- Rochikashvili, M., & Bongaerts, J. C. (2016). Multi-criteria decision-making for sustainable wall paints and coatings using Analytic Hierarchy Process. *Energy Procedia*, 96, 923-933.
- Rosihan, A., & Husaini, H. (2017). *Logam berat sekitar manusia*.
- Rusydiana, A. S., & Devi, A. (2013). *Analytic network process: Pengantar teori dan aplikasi*. Bogor: Smart Publishing.

- Saaty, T. L. (2013). *Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*. RWS publications.
- Şahin, U., & Büke, T. (2016). Evaluation of Alternative Fuels for Electricity Production in Turkey Using Analytic Network Process.
- Shaked, S., Crettaz, P., Saade-Sbeih, M., Jolliet, O., & Jolliet, A. (2015). *Environmental life cycle assessment*.
- Widiastuti, T., Robani, A., Sukmaningrum, P. S., Mawardi, I., Ningsih, S., Herianingrum, S., & Al-Mustofa, M. U. (2022). Integrating sustainable Islamic social finance: an analytical network process using the benefit opportunity cost risk (ANP BOCR) framework: the case of Indonesia. *Plos One*, 17(5), e0269039.
- Widiastuti, T., Zulaikha, S., Cahyono, E. F., Mawardi, I., & Al Mustofa, M. U. (2022). Optimizing the intermediary function of Zakat institution using analytical network process benefit opportunity cost risk (ANP BOCR) approach. *In 4th International Conference on Islamic Economics, Business, Philanthropy, and PhD Colloquium (ICIEBP)* (Vol. 232).

L-1

FORM KUESIONER PENELITIAN

2 responses

[Publish analytics](#)

Nama

2 responses

Yoga

Anang

Usia

2 responses

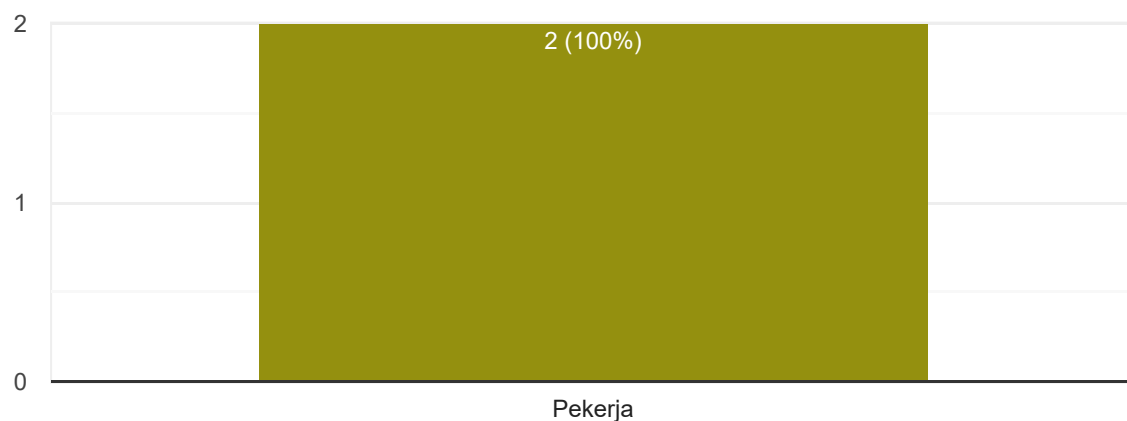
24 tahun

36

Posisi

 [Copy](#)

2 responses



Perbandingan Merit dengan Merit



Seberapa berpengaruh merit benefits dibandingkan merit opportunities dalam menentukan keputusan?

2 responses

3

2

Seberapa berpengaruh merit benefits dibandingkan merit costs dalam menentukan keputusan?

2 responses

4

3

Seberapa berpengaruh merit benefits dibandingkan merit risks dalam menentukan keputusan?

2 responses

4

2

Seberapa berpengaruh merit opportunities dibandingkan merit costs dalam menentukan keputusan?

2 responses

3

1/4

Seberapa berpengaruh merit opportunities dibandingkan merit risks dalam menentukan keputusan?

2 responses

2

1/2



Seberapa berpengaruh merit costs dibandingkan merit risks dalam menentukan keputusan?

2 responses

3

1/4

Perbandingan Kriteria dengan Kriteria

Seberapa berpengaruh keuntungan faktor ekonomi dibandingkan faktor lingkungan dalam menentukan keputusan?

2 responses

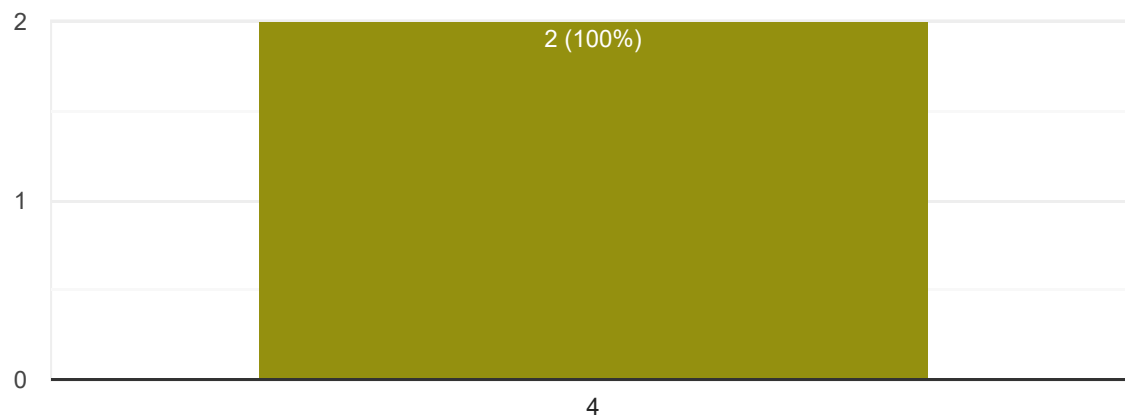
1/5

1/4

Seberapa berpengaruh keuntungan faktor ekonomi dibandingkan faktor sosial dalam menentukan keputusan?

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh keuntungan faktor lingkungan dibandingkan faktor sosial dalam menentukan keputusan?

2 responses

6

5



Seberapa berpengaruh peluang manajerial dibandingkan regulasi dalam menentukan keputusan?

2 responses

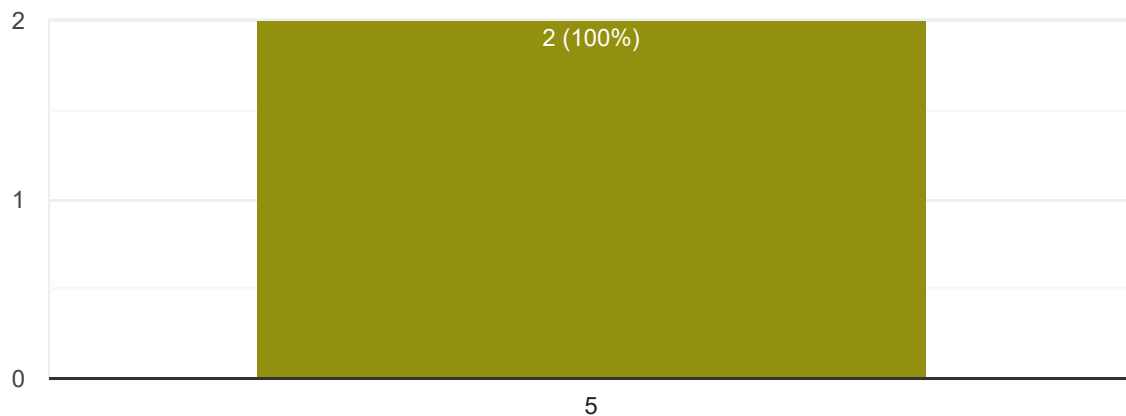
2

1/4

Seberapa berpengaruh biaya operasional dibandingkan administrasi dalam menentukan keputusan?

 Copy

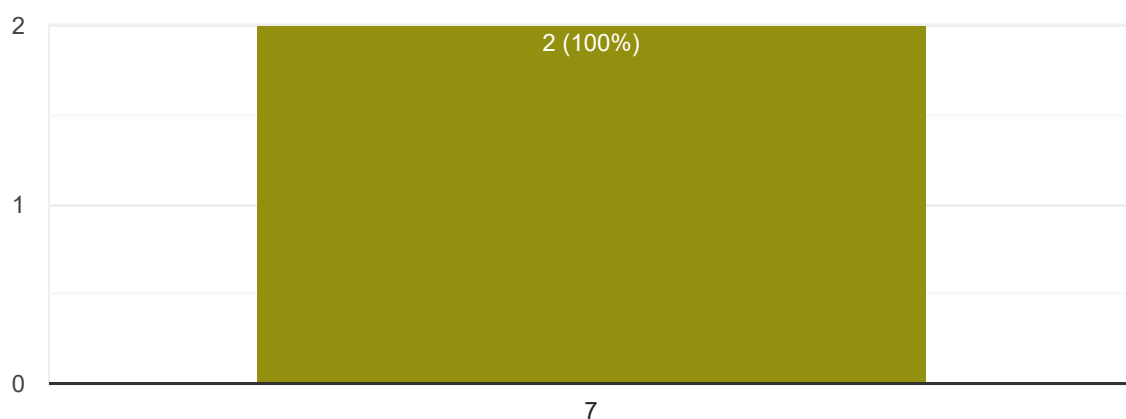
2 responses



Seberapa berpengaruh resiko SDM dibandingkan resiko sistem dalam menentukan keputusan?

 Copy

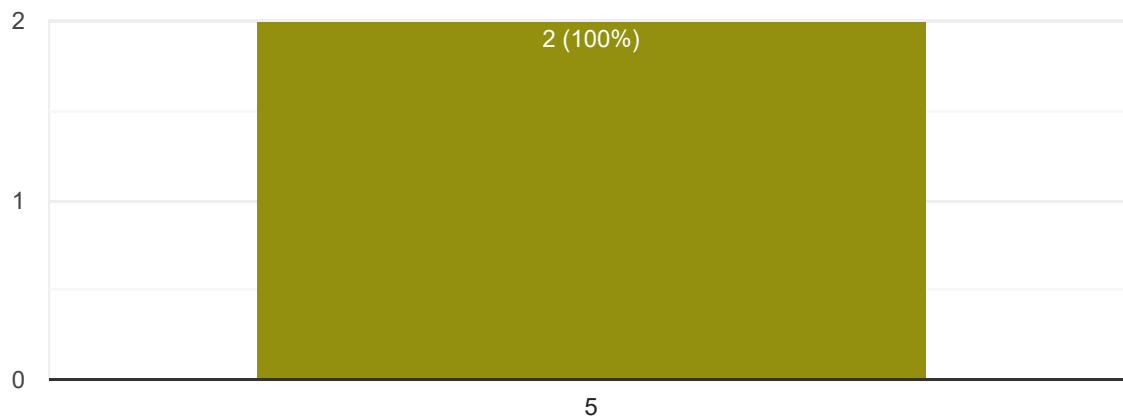
2 responses



Seberapa berpengaruh resiko SDM dibandingkan resiko manajerial dalam menentukan keputusan?

 Copy

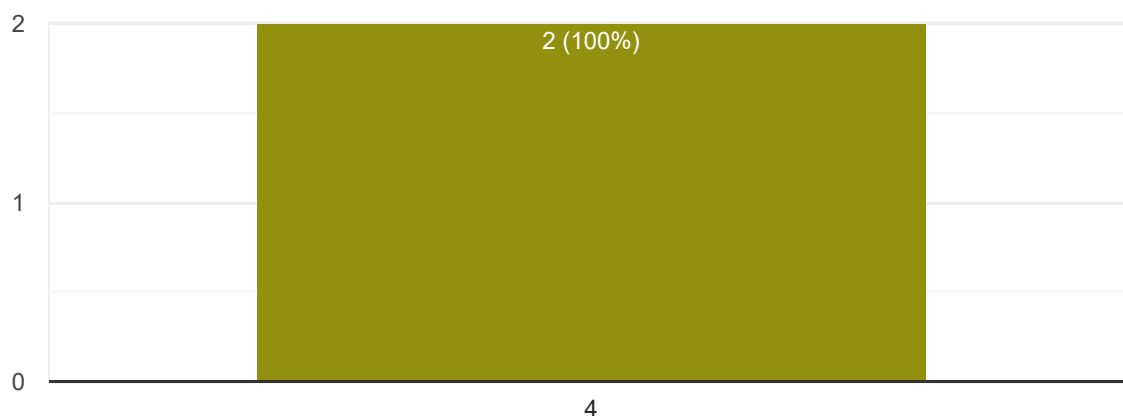
2 responses



Seberapa berpengaruh resiko sistem dibandingkan resiko manajerial dalam menentukan keputusan?

 Copy

2 responses



Perbandingan Sub Kriteria dengan Sub Kriteria

Seberapa berpengaruh efisiensi sumber daya dibandingkan penghematan biaya operasi dalam menentukan keputusan? (Faktor Ekonomi - Benefits)

2 responses

1/8

1/5



Seberapa berpengaruh efektifitas reduksi logam berat dibandingkan pengurangan dampak lingkungan dalam menentukan keputusan? (Faktor Lingkungan - Benefits)

2 responses

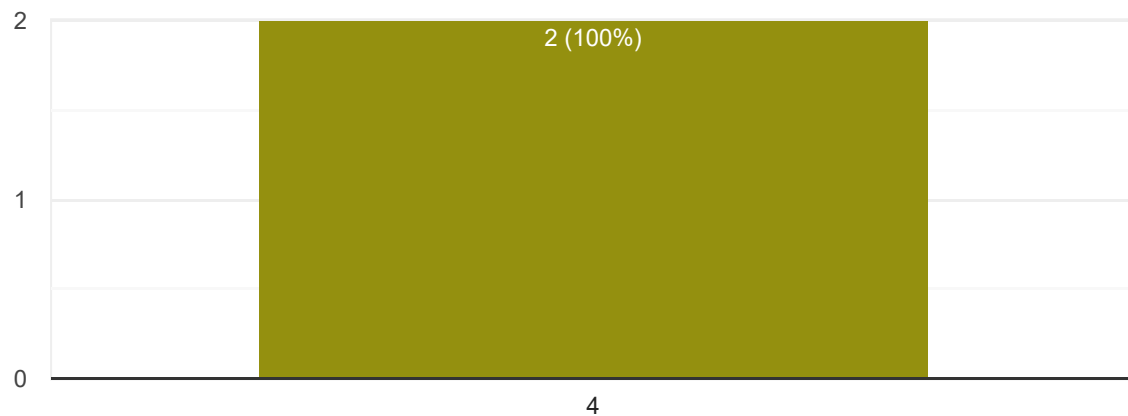
1/5

1/4

Seberapa berpengaruh citra perusahaan dibandingkan kesadaran lingkungan dalam menentukan keputusan? (Faktor Sosial - Benefits)

 Copy

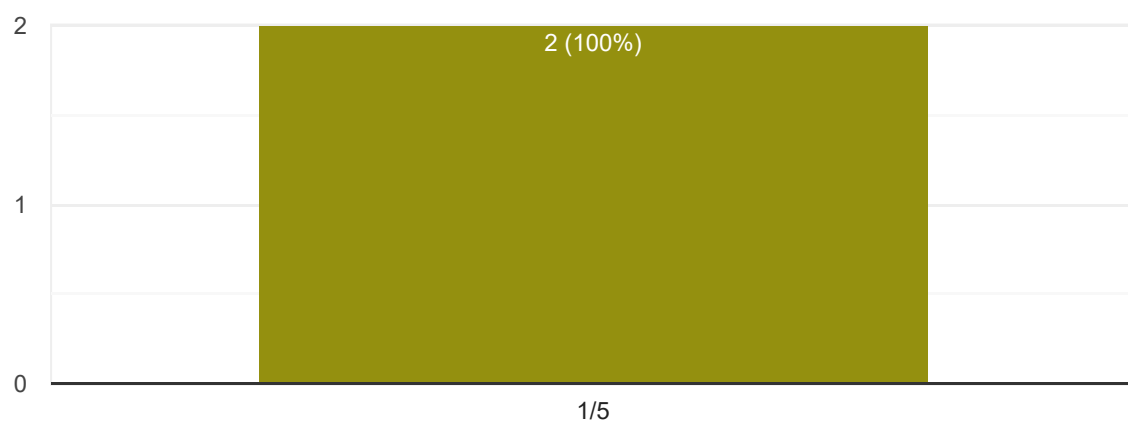
2 responses



Seberapa berpengaruh citra perusahaan dibandingkan keselamatan kerja dalam menentukan keputusan? (Faktor Sosial - Benefits)

 Copy

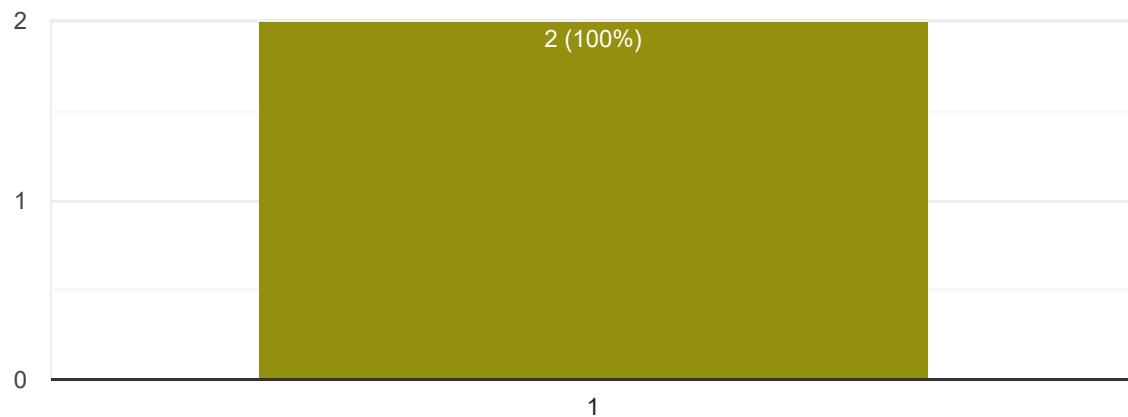
2 responses



Seberapa berpengaruh kesadaran lingkungan dibandingkan keselamatan kerja dalam menentukan keputusan? (Faktor Sosial - Benefits)

 Copy

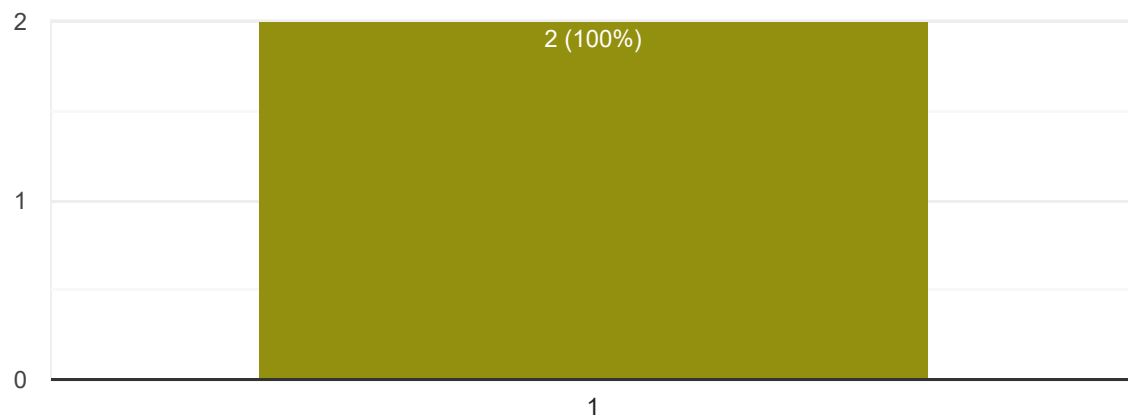
2 responses



Seberapa berpengaruh inovasi teknologi dibandingkan peluang produk baru dalam menentukan keputusan? (Manajerial - Opportunities)

 Copy

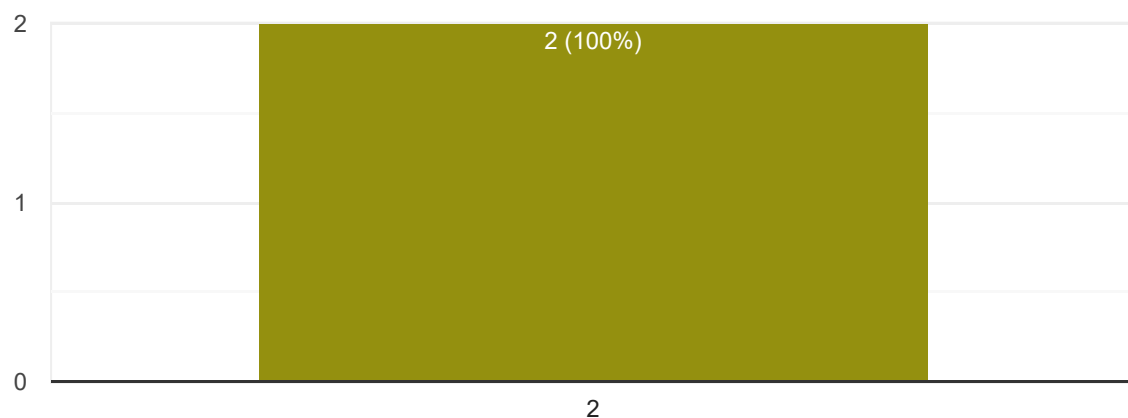
2 responses



Seberapa berpengaruh inovasi teknologi dibandingkan pasar yang lebih luas dalam menentukan keputusan? (Manajerial - Opportunities)

 Copy

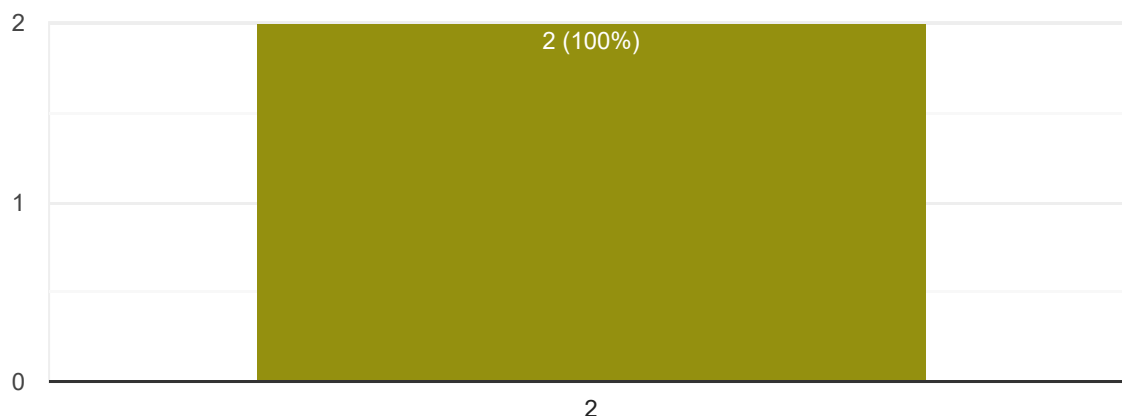
2 responses



Seberapa berpengaruh peluang produk baru dibandingkan pasar yang lebih luas dalam menentukan keputusan? (Manajerial - Opportunities)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh sertifikasi dibandingkan eco-innovation dalam menentukan keputusan? (Regulasi - Opportunities)

2 responses

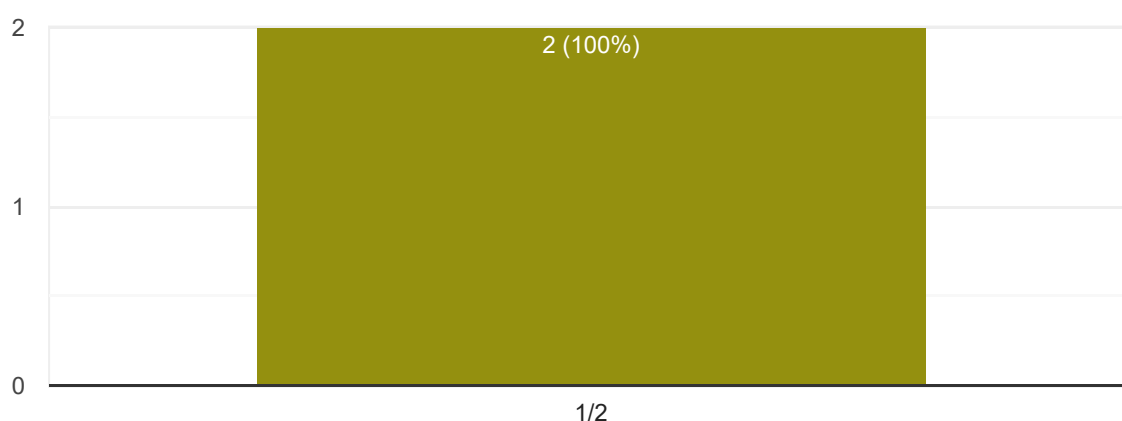
5

4

Seberapa berpengaruh biaya investasi awal dibandingkan biaya pemeliharaan dalam menentukan keputusan? (Cost - Operasional)

 Copy

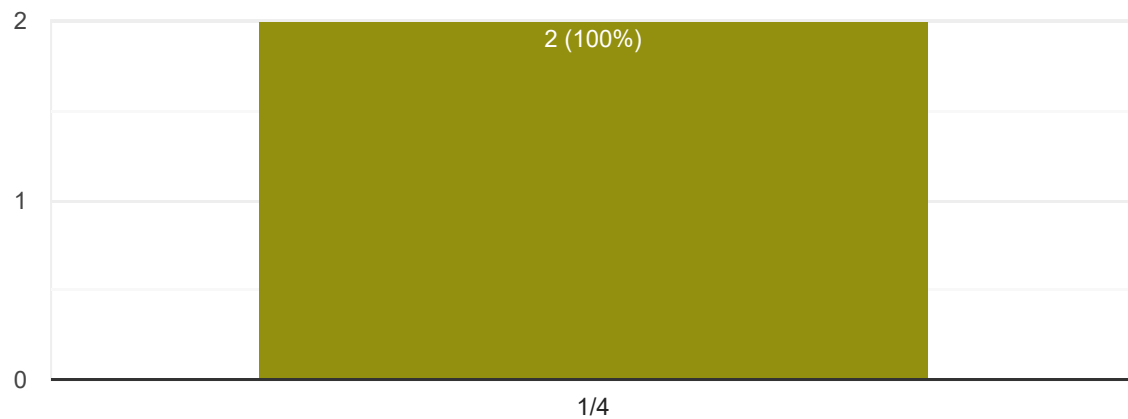
2 responses



Seberapa berpengaruh biaya investasi awal dibandingkan biaya pelatihan SDM dalam menentukan keputusan? (Cost - Operasional)

[Copy](#)

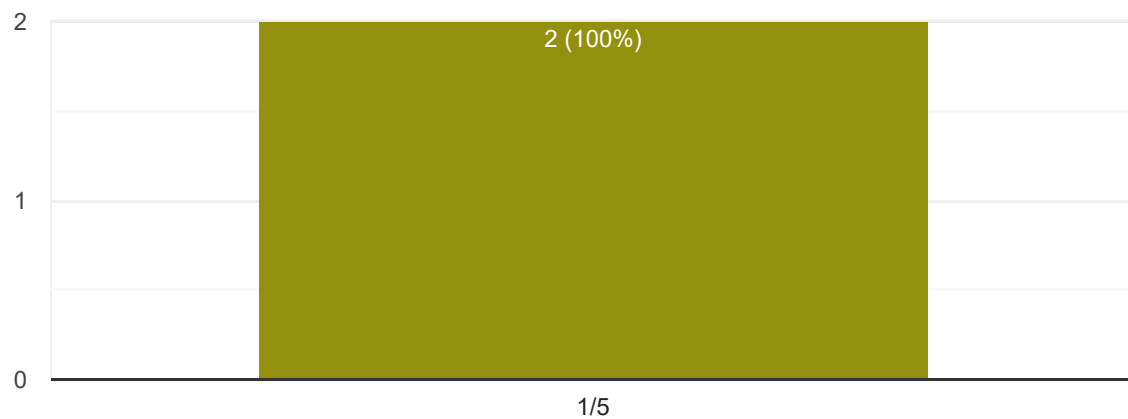
2 responses



Seberapa berpengaruh biaya investasi awal dibandingkan biaya resiko tak terduga dalam menentukan keputusan? (Cost - Operasional)

[Copy](#)

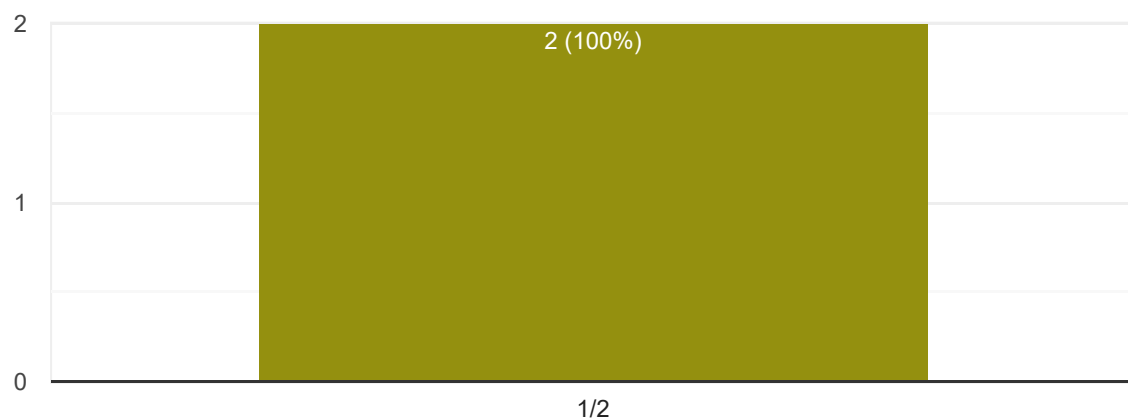
2 responses



Seberapa berpengaruh biaya pemeliharaan dibandingkan biaya pelatihan SDM dalam menentukan keputusan? (Cost - Operasional)

[Copy](#)

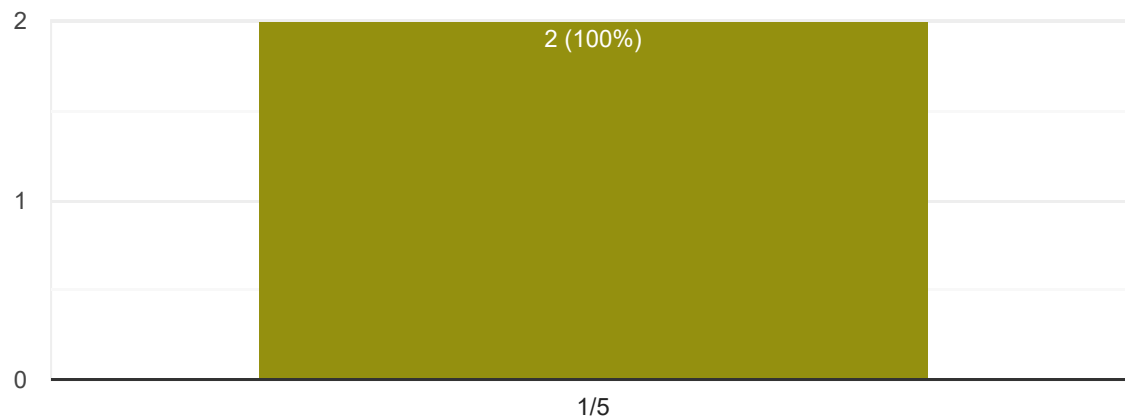
2 responses



Seberapa berpengaruh biaya pemeliharaan dibandingkan biaya resiko tak terduga dalam menentukan keputusan? (Cost - Operasional)

 Copy

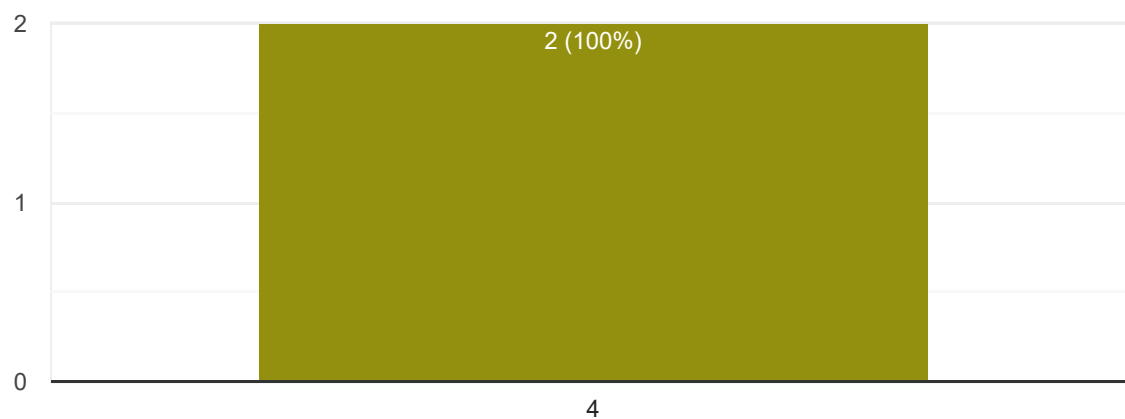
2 responses



Seberapa berpengaruh biaya pelatihan SDM dibandingkan biaya resiko tak terduga dalam menentukan keputusan? (Cost - Operasional)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh biaya perizinan dibandingkan biaya audit dalam menentukan keputusan? (Cost - Administrasi)

2 responses

2

4



Seberapa berpengaruh resiko pelatihan baru dibandingkan pekerja tidak paham dalam menentukan keputusan? (Risks - SDM)

2 responses

5

2

Seberapa berpengaruh resiko residu berbahaya baru dibandingkan kegagalan teknis dalam menentukan keputusan? (Risks - Sistem)

2 responses

5

4

Seberapa berpengaruh resiko pembuatan SOP baru dibandingkan monitoring dalam menentukan keputusan? (Risks - Manajerial)

2 responses

2

4

Perbandingan Alternatif engan Alternatif berdasarkan Sub kriteria

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan dalam segi efisiensi sumber daya? (Alternatif - Efisiensi sumber daya)

2 responses

1

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam segi efisiensi sumber daya? (Alternatif - Efisiensi sumber daya)

2 responses

2

1/5



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam segi efisiensi sumber daya? (Alternatif - Efisiensi sumber daya)

2 responses

2

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan dalam segi penghematan biaya operasional? (Alternatif - penghematan biaya operasional)

2 responses

4

1/3

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam segi penghematan biaya operasional? (Alternatif - penghematan biaya operasional)

2 responses

1/5

1

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam segi penghematan biaya operasional? (Alternatif - penghematan biaya operasional)

2 responses

1

1/2



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan dalam efektivitas reduksi logam berat? (Alternatif - efektivitas reduksi logam berat)

2 responses

1/4

1/6

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam efektivitas reduksi logam berat? (Alternatif - efektivitas reduksi logam berat)

2 responses

1

1/5

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam efektivitas reduksi logam berat? (Alternatif - efektivitas reduksi logam berat)

2 responses

5

1

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan dalam mengurangi dampak lingkungan? (Alternatif - pengurangan dampak lingkungan)

2 responses

1/4

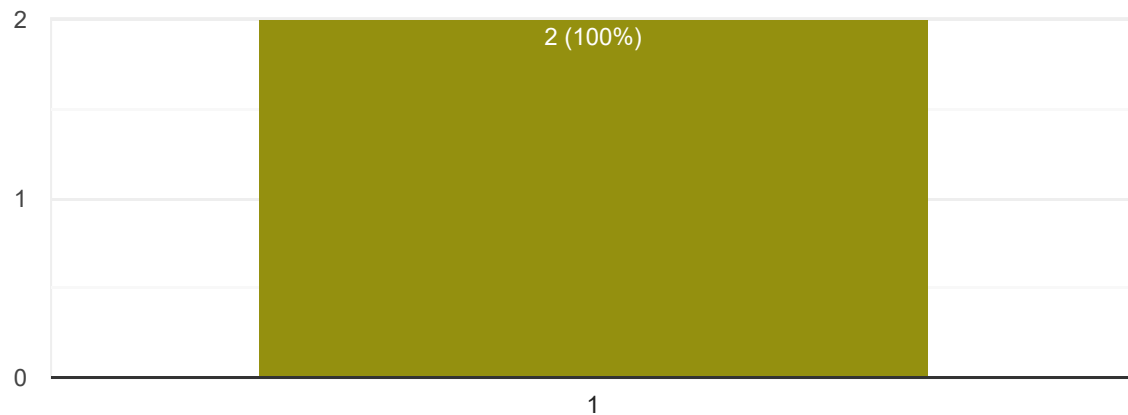
2



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam mengurangi dampak lingkungan? (Alternatif - pengurangan dampak lingkungan)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam mengurangi dampak lingkungan? (Alternatif - pengurangan dampak lingkungan)

2 responses

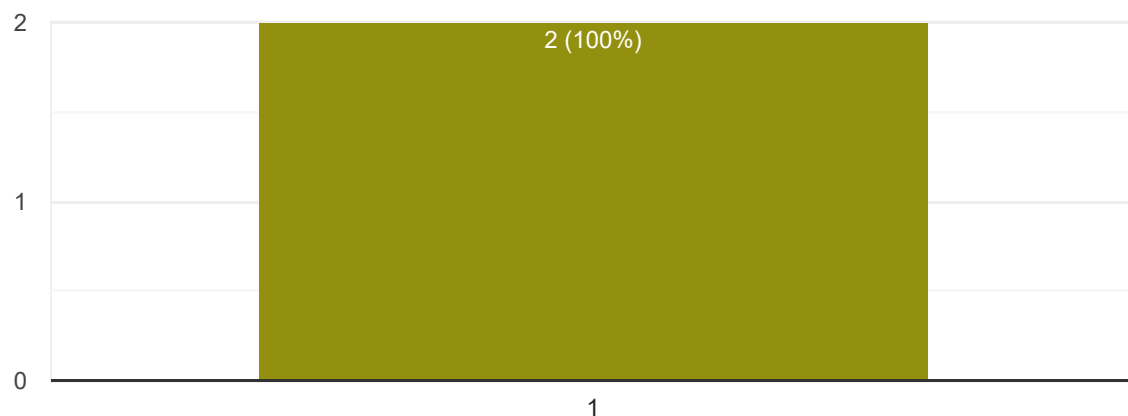
2

5

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan dalam memperbaiki citra perusahaan? (Alternatif - memperbaiki citra perusahaan)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam memperbagus citra perusahaan? (Alternatif - memperbagus citra perusahaan)

2 responses

1/2

2

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan dalam memperbagus citra perusahaan? (Alternatif - memperbagus citra perusahaan)

2 responses

1/2

2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan meningkatkan kesadaran lingkungan? (Alternatif - meningkatkan kesadaran lingkungan)

2 responses

1

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan meningkatkan kesadaran lingkungan? (Alternatif - meningkatkan kesadaran lingkungan)

2 responses

1/2

1/5



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan meningkatkan kesadaran lingkungan? (Alternatif - meningkatkan kesadaran lingkungan)

2 responses

4

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan meningkatkan keselamatan kerja? (Alternatif - meningkatkan keselamatan kerja)

2 responses

1

2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan meningkatkan keselamatan kerja? (Alternatif - meningkatkan keselamatan kerja)

2 responses

1/2

1

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan meningkatkan keselamatan kerja? (Alternatif - meningkatkan keselamatan kerja)

2 responses

4

5



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan memunculkan inovasi teknologi? (Alternatif - inovasi teknologi)

2 responses

1

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan memunculkan inovasi teknologi? (Alternatif - inovasi teknologi)

2 responses

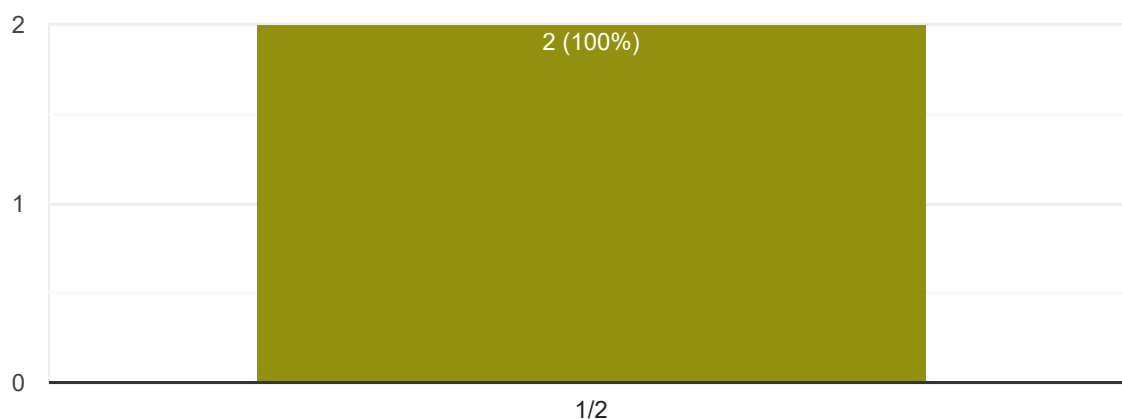
1/2

1/5

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan memunculkan inovasi teknologi? (Alternatif - inovasi teknologi)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan memunculkan produk baru? (Alternatif - peluang produk baru)

2 responses

1/2

1



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan memunculkan produk baru? (Alternatif - peluang produk baru)

2 responses

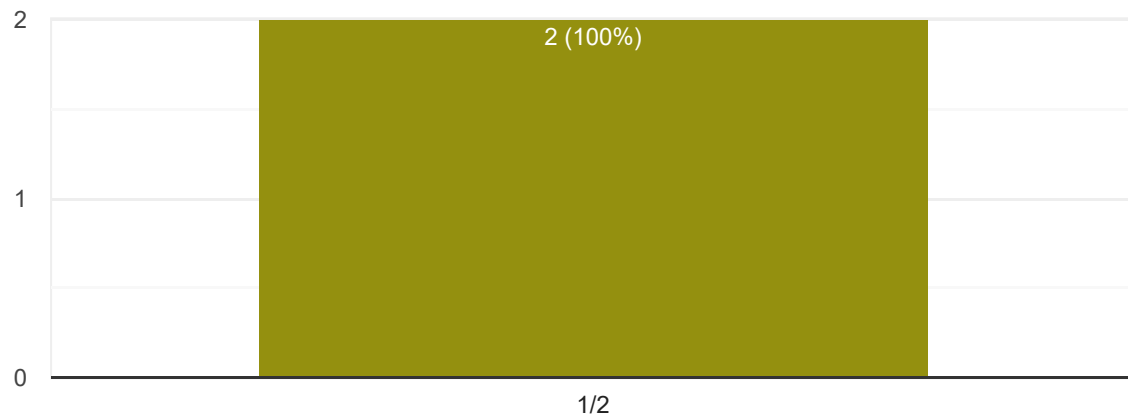
1/5

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan memunculkan produk baru? (Alternatif - peluang produk baru)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan untuk ekspansi pasar? (Alternatif - pasar yang lebih luas)

2 responses

1

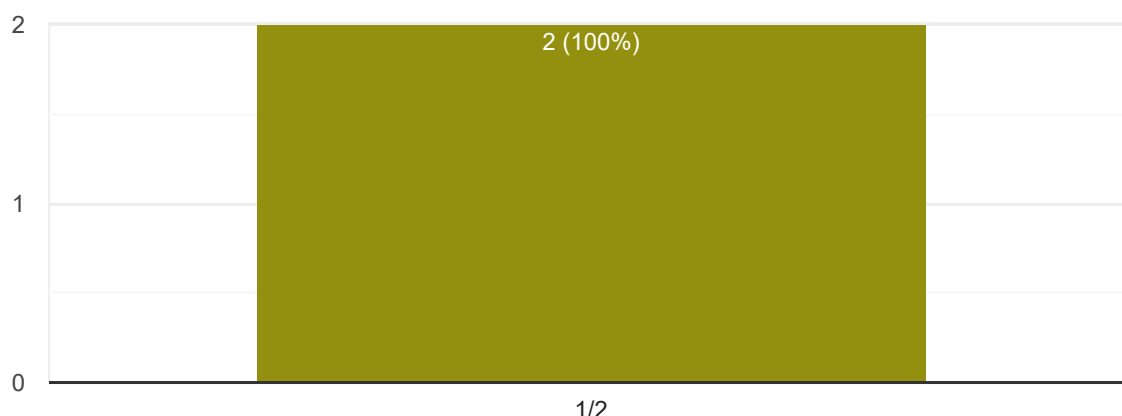
1/6



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan untuk ekspansi pasar? (Alternatif - pasar yang lebih luas)



2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan untuk ekspansi pasar? (Alternatif - pasar yang lebih luas)

2 responses

1/2

1

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan menyesuaikan regulasi sehingga memperoleh sertifikasi? (Alternatif - sertifikasi)

2 responses

1

2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan menyesuaikan regulasi sehingga memperoleh sertifikasi? (Alternatif - sertifikasi)

2 responses

1/2

1



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan kemampuan menyesuaikan regulasi sehingga memperoleh sertifikasi? (Alternatif - sertifikasi)

2 responses

4

5

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan dukungan terhadap eco-innovation? (Alternatif - eco-innovation)

2 responses

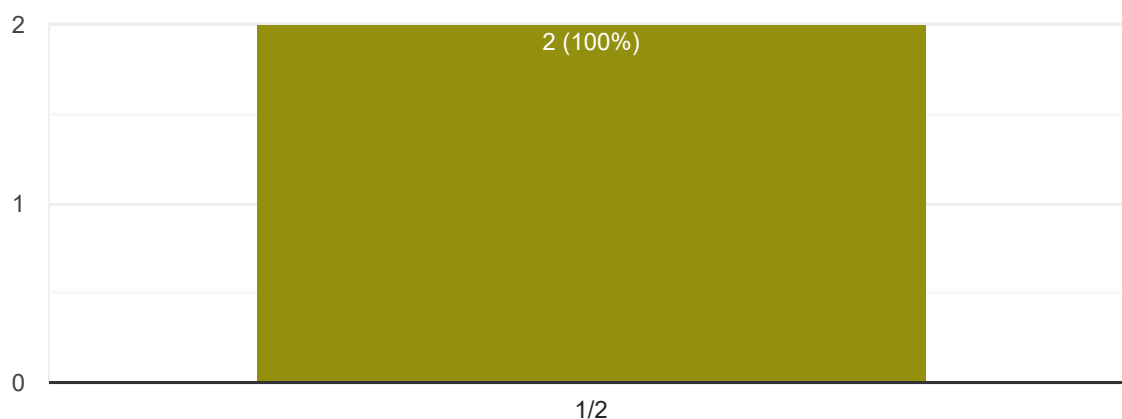
1

1/4

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan dukungan terhadap eco-innovation? (Alternatif - eco-innovation)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan dukungan terhadap eco-innovation? (Alternatif - eco-innovation)

2 responses

1/2

1



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya investasi awal? (Alternatif - biaya investasi awal)

2 responses

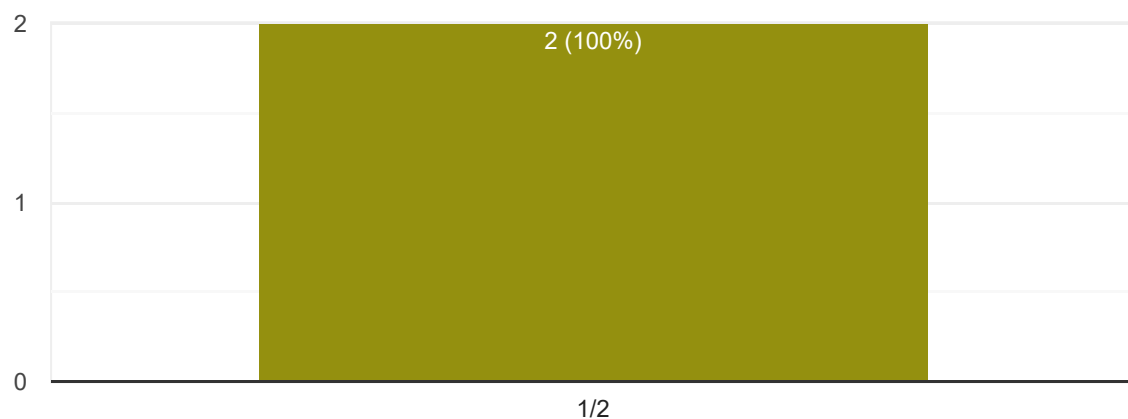
2

4

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya investasi awal? (Alternatif - biaya investasi awal)

 Copy

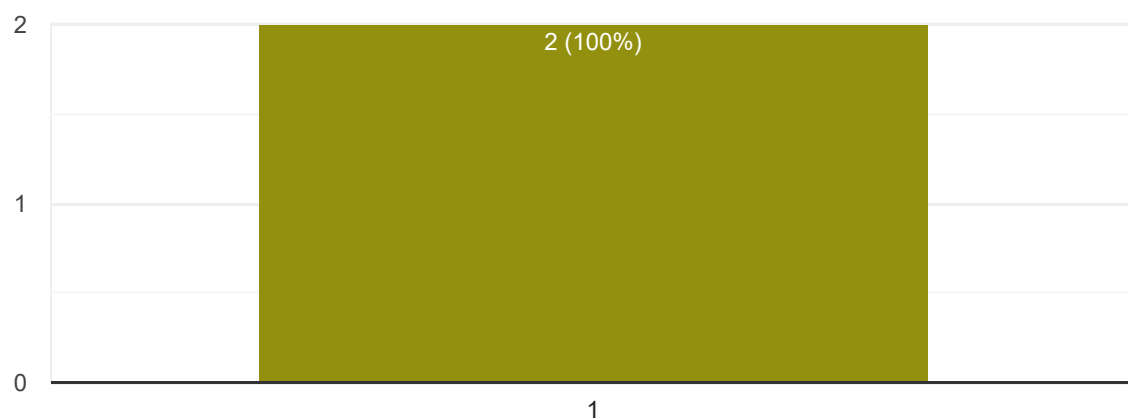
2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya investasi awal? (Alternatif - biaya investasi awal)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya pemeliharaan? (Alternatif - biaya pemeliharaan)

2 responses

1

2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya pemeliharaan? (Alternatif - biaya pemeliharaan)

2 responses

2

1

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya pemeliharaan? (Alternatif - biaya pemeliharaan)

2 responses

2

5

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya pelatihan SDM? (Alternatif - biaya pelatihan SDM)

2 responses

1

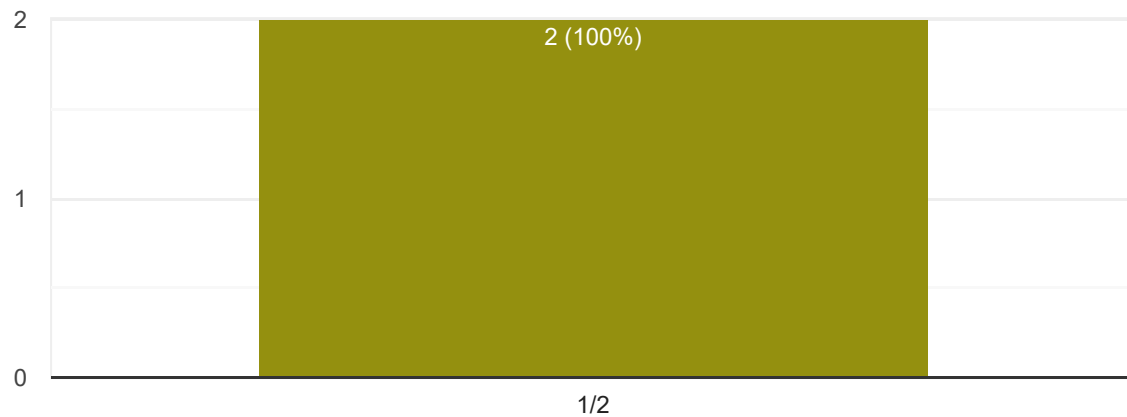
1/6



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya pelatihan SDM? (Alternatif - biaya pelatihan SDM)



2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya pelatihan SDM? (Alternatif - biaya pelatihan SDM)

2 responses

1/2

1

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya resiko tak terduga? (Alternatif - biaya resiko tak terduga)

2 responses

2

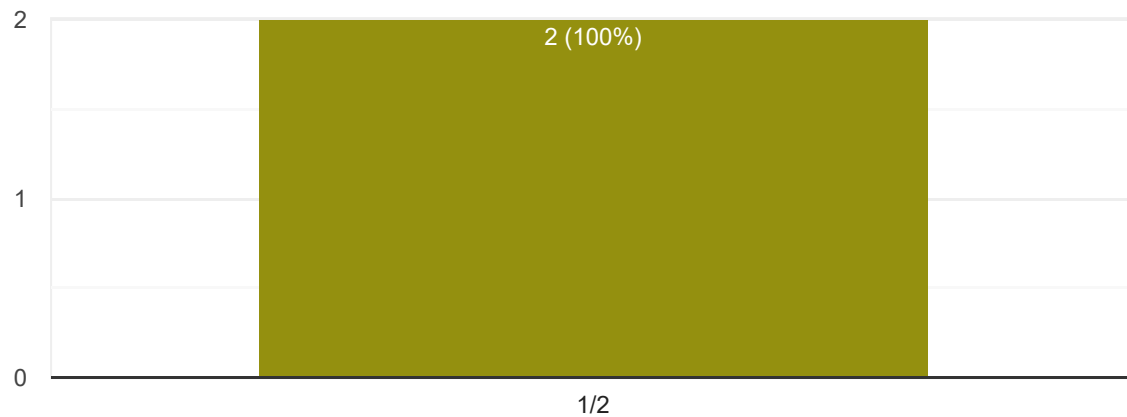
4



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya resiko tak terduga? (Alternatif - biaya resiko tak terduga)

 Copy

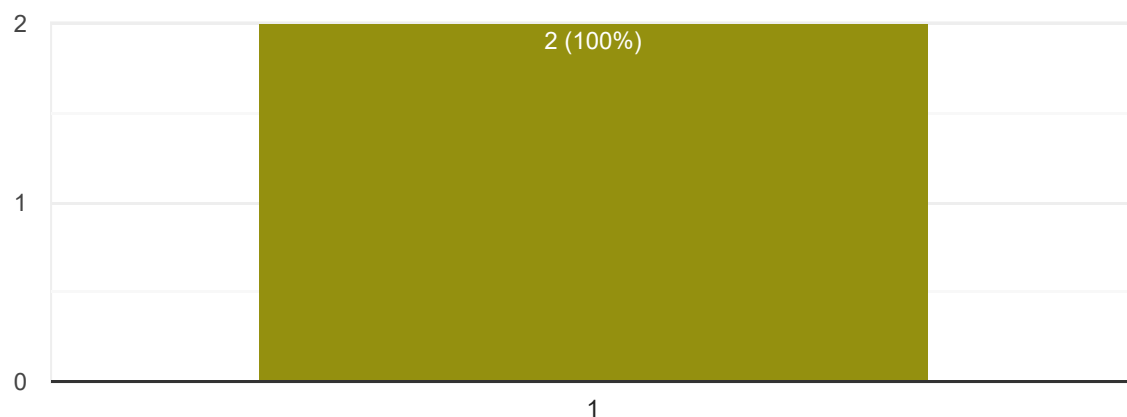
2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya resiko tak terduga? (Alternatif - biaya resiko tak terduga)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya perizinan? (Alternatif - biaya perizinan)

2 responses

1

1/2



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya perizinan? (Alternatif - biaya perizinan)

2 responses

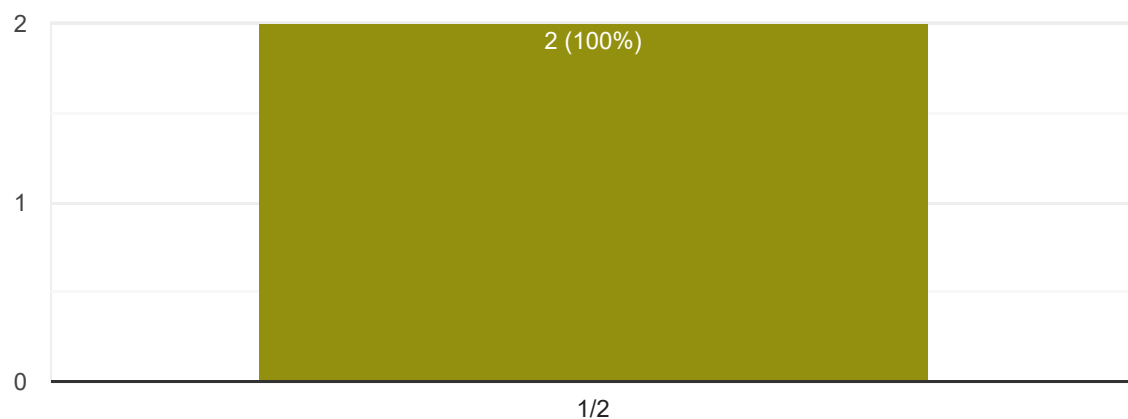
1/2

1/5

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya perizinan? (Alternatif - biaya perizinan)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya audit? (Alternatif - biaya audit)

2 responses

1

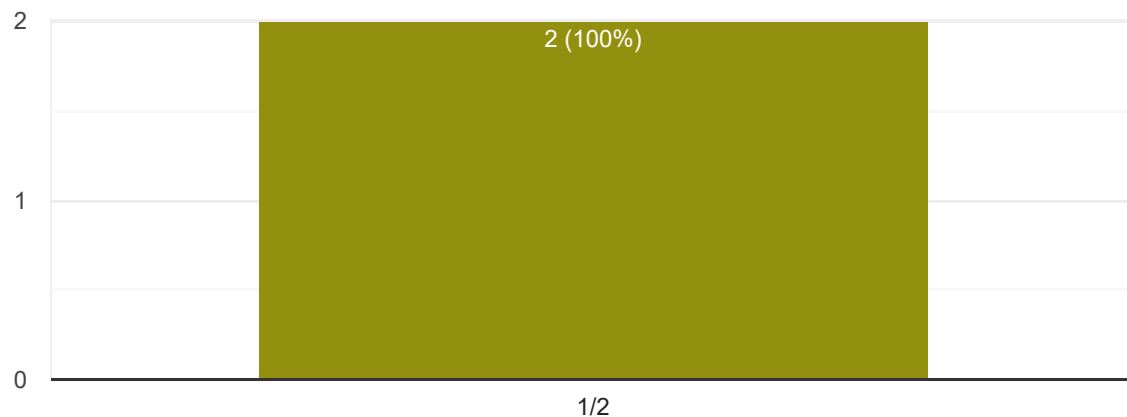
1/4



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya audit? (Alternatif - biaya audit)



2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan biaya audit? (Alternatif - biaya audit)

2 responses

4

1

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pelatihan baru? (Alternatif - resiko pelatihan baru)

2 responses

2

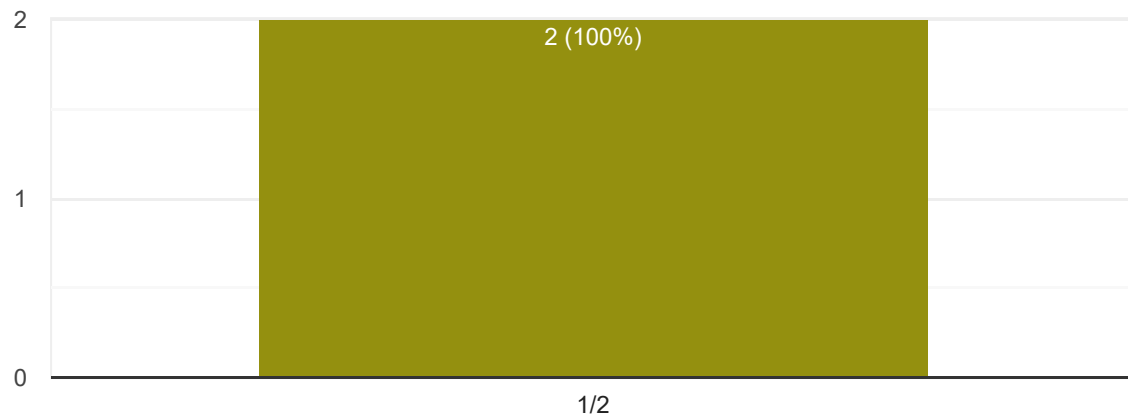
1/4



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pelatihan baru? (Alternatif - resiko pelatihan baru)

 Copy

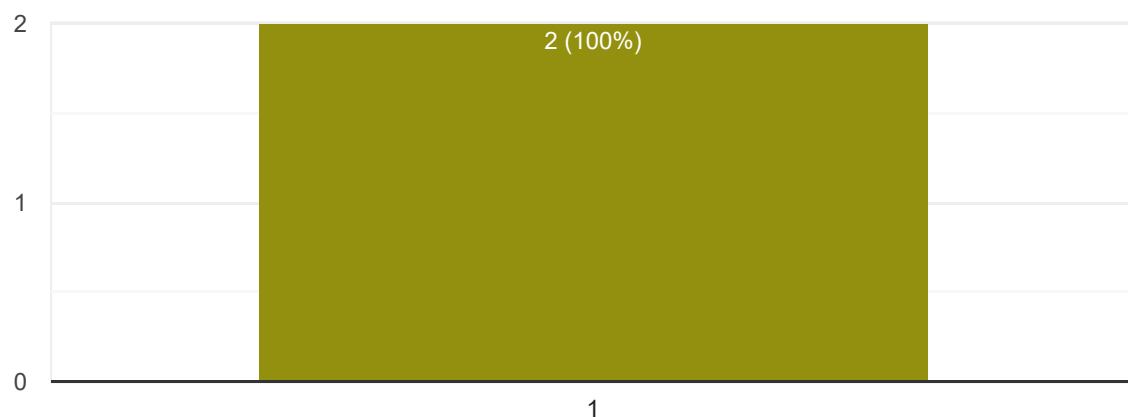
2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pelatihan baru? (Alternatif - resiko pelatihan baru)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pekerja tidak paham? (Alternatif - resiko pekerja tidak paham)

2 responses

1

1/2



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pekerja tidak paham? (Alternatif - resiko pekerja tidak paham)

2 responses

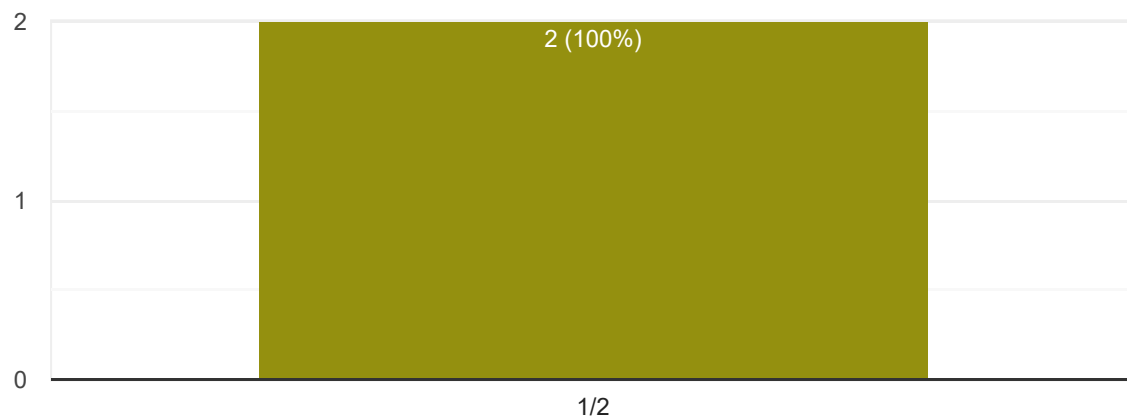
1/2

1/5

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pekerja tidak paham? (Alternatif - resiko pekerja tidak paham)

 Copy

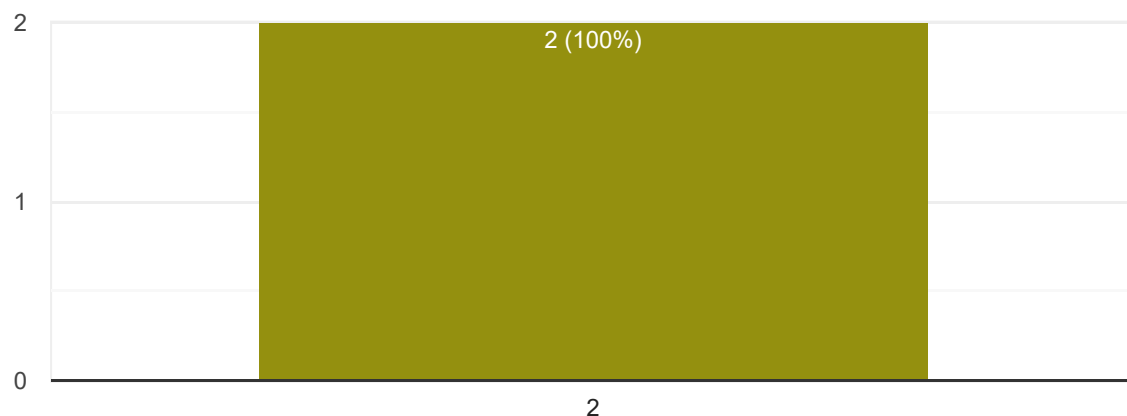
2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko residu berbahaya baru? (Alternatif - resiko residu berbahaya baru)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko residu berbahaya baru? (Alternatif - resiko residu berbahaya baru)

2 responses

1/2

5

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko residu berbahaya baru? (Alternatif - resiko residu berbahaya baru)

2 responses

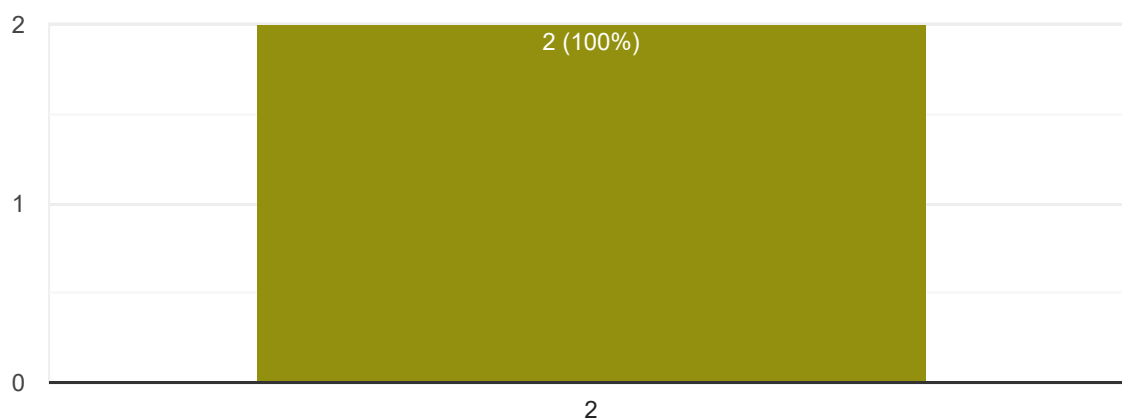
1

2

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko kegagalan teknis? (Alternatif - resiko kegagalan teknis)

 Copy

2 responses



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko kegagalan teknis? (Alternatif - resiko kegagalan teknis)

2 responses

1/2

1



Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko kegagalan teknis? (Alternatif - resiko kegagalan teknis)

2 responses

1

5

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pembuatan SOP baru? (Alternatif - resiko pembuatan SOP baru)

2 responses

1

1/6

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pembuatan SOP baru? (Alternatif - resiko pembuatan SOP baru)

2 responses

1/2

1/5

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko pembuatan SOP baru? (Alternatif - resiko pembuatan SOP baru)

2 responses

1/2

1

Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A2 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko monitoring? (Alternatif - resiko monitoring)

2 responses

1

1/4



Seberapa berpengaruh alternatif A1 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko monitoring? (Alternatif - resiko monitoring)

2 responses

2

1/2

Seberapa berpengaruh alternatif A2 dibandingkan alternatif A3 dalam menentukan keputusan berdasarkan resiko monitoring? (Alternatif - resiko monitoring)

2 responses

2

1

This content is neither created nor endorsed by Google. - [Contact form owner](#) - [Terms of Service](#) - [Privacy Policy](#)

Does this form look suspicious? [Report](#)

Google Forms













L-2

PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI UNIVERSITAS GUNADARMA
LEMBAR BIMBINGAN PENULISAN TUGAS AKHIR

Nama Lengkap/ NPM : Rudi Ikfan Maulana/ 31421365
Judul Penulisan : Analisis Dampak Lingkungan Dan Usulan Strategi
Penanganan Limbah Produksi Kancing Logam
Dengan Metode *Life Cycle Assessment* Dan
Analytical Network Proses Berbasis BOCR
Dosen Pembimbing : Maulida Boru Butar Butar, S.T., M.Sc., Ph.D.

No.	Hari/ Tanggal	Agenda	Paraf Pembimbing
1.	7 April 2025	• Diskusi tema	
2.	7 Mei 2025	• BAB I	
3.	14 Juli 2025	• BAB I, BAB IV	
4.	17 Juli 2025	• BAB IV	
5.	21 Juli 2025	• BAB IV, BAB V	
6.	24 Juli 2025	• BAB IV, BAB V BAB III	
7.	26 Juli 2025	• BAB I-V, Daftar Pustaka	
8.	28 Juli 2025	• BAB I-V, Daftar Pustaka & Latihan Presentasi	

Pembimbing Penulisan Tugas Akhir Teknik Industri



(Maulida Boru Butar Butar, S.T., M.Sc., Ph.D)

L-3

Langkah langkah

Inputs/Outputs - Melting										
Inputs										
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality	Location	Description
Brass		1900.00000	kg		none					
Electricity		935.90000	MJ		none					
Outputs										
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod	Provider	Data quality	Location	Description
Kuningan Cair	Wastes/Production residues	1871.80000	kg		none					
zinc scrap		2.50000	kg		none					
Copper Oxide		9.35000	kg		none					
Copper Dust		5.80000	kg		none					
Zinc Oxide		10.55000	kg		none					

General information - Melting	
General information	
Name	Melting
Category	- none -
Description	
Version	00.00.001
Last change	2025-05-18 17:03:08
UUID	2356b726-c6be-44fd-b982-b9626cdcd12a
Tags	<button>Add a tag</button>
Infrastructure process	<input type="checkbox"/>
<button>Create product system</button> <button>Direct calculation</button> <button>Export to Excel</button>	
Time	
Start date	18/05/2025
End date	18/05/2025
Description	
Geography	
Location	- none -
Description	
Technology	
Description	

LCa

Calculation properties

—

□

×

Calculation properties

Please select the properties for the calculation

Allocation method

As defined in processes

▼

Impact assessment method

ReCiPe 2016 Endpoint (H)

▼

Normalization and weighting set

World (2010) H/A

▼

Calculation type

☒ Lazy/On-demand ☐ Eager/All ☐ Monte Carlo Simulation

☒ Regionalized calculation

☒ Include cost calculation

☒ Assess data quality

< Back

Next >

Finish

Cancel

LCa

Calculation properties

—

□

×

Data quality properties

Please select the properties for the data quality assessment

Process schema

ILCD data quality system

▼

Flow schema

ILCD data quality system

▼

Aggregation type

Weighted average

▼

Rounding mode

Half up

▼

n.a. value handling

Exclude zero values

▼

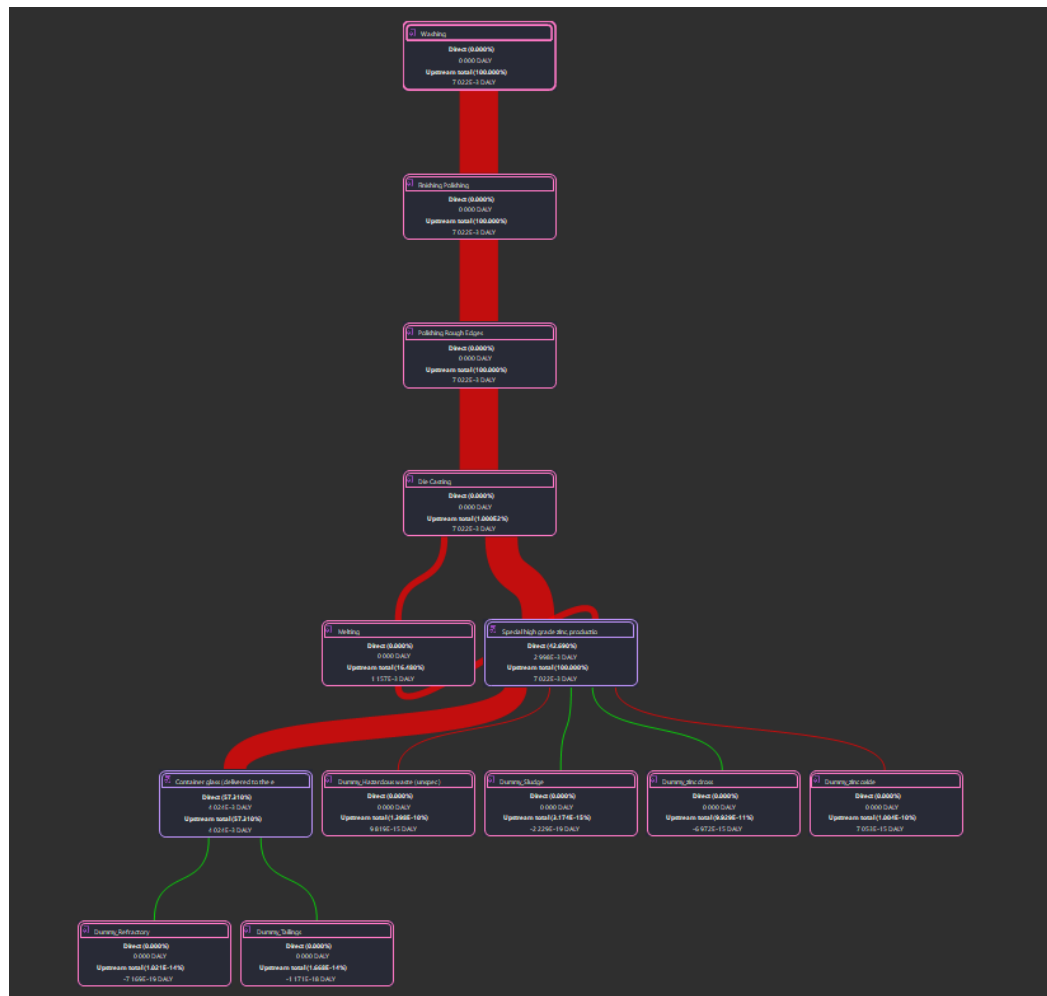
< Back

Next >

Finish

Cancel

Sanky Diagram



L-4

[Anang Subagyo]

[Tangerang, Banten]

[0818799319] | [anangsubagyo@gmail.com]

PENDIDIKAN

[Universitas WR Soepratman]

[Surabaya], [Jawa Timur]

Sarjana [Teknik Elektro]

1993 - 1997

- **IPK:** [3,50] / 4.0

PENGALAMAN KERJA, MAGANG, ORGANISASI & KEPANITIAAN

[PT. Yamatoga Indonesia] [Tangerang], [Banten]

[Maintenance Foreman], [2016] – [Sekarang]

Bekerja di bagian produksi sebagai *maintenance foreman*

Spesifikasi Pengalaman:

Proyek Retrofit Panel Kontrol Mesin Die Casting - 2020

Melakukan penggantian dan integrasi ulang sistem kontrol lama dengan PLC

Siemens untuk meningkatkan efisiensi proses casting

Rekayasa Ulang Sistem Pendingin Chiller Area Produksi – 2019

Merancang ulang sistem distribusi air pendingin untuk mengatasi

ketidakseimbangan suhu pada mesin injection molding.

KETERAMPILAN

Bahasa : Indonesia & Inggris

Keterampilan Personal : Tekun, Tegas, dan Tanggung Jawab

[Tegar Prayoga]

[Tangerang, Banten]

[085714476165] | [pryoga2638@gmail.com]

PENDIDIKAN

[Universitas Muhammadiyah Tangerang]

[Tangerang], [Banten]

Sarjana [Manajemen]

2002 - 2006

- **IPK:** [3,65] / 4.0

PENGALAMAN KERJA, MAGANG, ORGANISASI & KEPANITIAAN

[PT. Wahana Kreasi Hasil Kencana]

[Tangerang], [Banten]

[Production Staff], [2019] – [Sekarang]

Bekerja di bagian produksi sebagai staf produksi

Spesifikasi Pengalaman:

Digitalisasi Sistem Monitoring Produksi – 2020

Memimpin pengembangan dashboard digital berbasis Google Data Studio untuk monitoring harian produksi kancing logam.

Penyusunan SOP Baru untuk Penanganan Limbah B3 – 2021

Bekerja sama dengan bagian K3L dan produksi untuk merevisi dan mensosialisasikan SOP pengelolaan limbah.

KETERAMPILAN

Bahasa : Indonesia, Inggris

Keterampilan Personal : Tekun, Pekerja Keras, Profesional

L-5

Tabel 4.20 Bobot Kriteria Pada Risks Responden Pertama

	Inovasi teknologi	Peluang produk baru	Pasar yang lebih besar
Inovasi Teknologi	1	1	2
Peluang produk baru	1	1	2
Pasar yang lebih besar	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1

Penyelesaian:

- 1) Mengubah bobot ke dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 2.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 2.0000 \\ 0.5000 & 0.5000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

- 2) Mengalikan matriks dengan dirinya sendiri

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 2.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 2.0000 \\ 0.5000 & 0.5000 & 1.0000 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 2.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 2.0000 \\ 0.5000 & 0.5000 & 1.0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.0000 & 3.0000 & 6.0000 \\ 3.0000 & 3.0000 & 6.0000 \\ 1.5000 & 1.5000 & 3.0000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 3.0000+3.0000+6.0000 \\ 3.0000+3.0000+6.0000 \\ 1.5000+1.5000+3.0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.0000 \\ 12.0000 \\ 6.0000 \end{bmatrix}$$

- 3) Menghitung *eigen matriks*

$$12.0000 + 12.0000 + 6.0000 = 30.0000$$

$$\begin{bmatrix} 12.0000 / 30.0000 \\ 12.0000 / 30.0000 \\ 6.0000 / 30.0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4000 \\ 0.4000 \\ 0.2000 \end{bmatrix}$$

- 4) Menghitung skala rasio

$$\begin{bmatrix} 3.0000 & 3.0000 & 6.0000 \\ 3.0000 & 3.0000 & 6.0000 \\ 1.5000 & 1.5000 & 3.0000 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} 3.0000 & 3.0000 & 6.0000 \\ 3.0000 & 3.0000 & 6.0000 \\ 1.5000 & 1.5000 & 3.0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27.0000 & 27.0000 & 54.0000 \\ 27.0000 & 27.0000 & 54.0000 \\ 13.5000 & 13.5000 & 27.0000 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 27.0000+27.0000+54.0000 \\ 27.0000+27.0000+54.0000 \\ 13.5000+13.5000+27.0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 108.0000 \\ 108.0000 \\ 54.0000 \end{bmatrix}$$

$$108.0000 + 108.0000 + 54.0000 = 270.0000$$

$$\begin{bmatrix} 108.0000 / 270.0000 \\ 108.0000 / 270.0000 \\ 54.0000 / 270.0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4000 \\ 0.4000 \\ 0.2000 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} 0.4000 - 0.4000 & 0 \\ 0.4000 - 0.4000 & 0 \\ 0.2000 - 0.2000 & 0 \end{matrix}$$