JEMSI: Jurnal Ekonomi Manajemen Sistem Informasi
E-ISSN: 2686-5238
P-ISSN: 2686-4916
https://dinastirev.org/JEMSI dinasti.info@gmail.com +62 811 7404 455
DOI: https://doi.org/10.38035/jemsi.v6i3
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Received: 31 Januari 2025 | **Revised:** 12 Februari 2025 | **Accepted:** 23 Februari 2025

Pendekatan Fuzzy Cognitive Mapping dalam Upaya Optimalisasi Perencanaan Fasilitas Pengelolaan Air pada Kegiatan Pertambangan Batubara

Imroatus Sholikhah[1], Budisantoso Wirjodirdjo[2]
[1]Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, Indonesia, imroatus.sh28@gmail.com
[2]Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, Indonesia, budisantoso.wirjodirdjo@gmail.com

Corresponding Author: imroatus.sh28@gmail.com[1]

Abstract: *This research aims to develop an FCM-based conceptual model that can handle complexity, uncertainty, and involve various stakeholders. The research methods included identification of key factors through literature study and expert consultation, mapping of relationships between variables with weights given in the range of -1 to 1, and model simulation to explore various alternative scenarios. The simulation results showed that the regulatory compliance variable (B4) had the greatest influence on the optimization of water management facilities, with the highest weight value of 0.977. In addition, community involvement (B6) and water quality (B1) also play a significant role in the system. Model validation shows that the average deviation of the observed weights and modeling results is 0.253, which confirms the reliability of the model in representing real conditions. In conclusion, the FCM approach can improve the effectiveness of decision-making in planning water management facilities in coal mining by considering technical aspects and environmental sustainability.*

Keyword: *Coal Mining, Decision Optimization, Fuzzy Cognitive Mapping, Regulatory Compliance, Water Facility Planning.*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model konseptual berbasis FCM yang dapat menangani kompleksitas, ketidakpastian, serta melibatkan berbagai pemangku kepentingan. Metode penelitian mencakup identifikasi faktor utama melalui studi literatur dan konsultasi dengan ahli, pemetaan hubungan antarvariabel dengan bobot yang diberikan dalam rentang -1 hingga 1, serta simulasi model untuk mengeksplorasi berbagai skenario alternatif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variabel kepatuhan regulasi (B4) memiliki pengaruh terbesar terhadap optimalisasi fasilitas pengelolaan air, dengan nilai bobot tertinggi sebesar 0,977. Selain itu, keterlibatan masyarakat (B6) dan kualitas air (B1) juga berperan signifikan dalam sistem. Validasi model menunjukkan bahwa penyimpangan rata-rata bobot observasi dan hasil pemodelan adalah 0,253, yang menegaskan keandalan model dalam merepresentasikan kondisi nyata. Kesimpulannya, pendekatan FCM dapat meningkatkan

efektivitas pengambilan keputusan dalam perencanaan fasilitas pengelolaan air di pertambangan batubara dengan mempertimbangkan aspek teknis dan keberlanjutan lingkungan.

Kata Kunci: Fuzzy Cognitive Mapping, Kepatuhan Regulasi, Optimasi Keputusan, Perencanaan Fasilitas Air, Pertambangan Batubara.

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan batubara merupakan kegiatan jangka panjang yang melibatkan banyak aspek mulai dari teknologi yang kompleks dan modal yang cukup besar. Karakteristik industri ini adalah membuka lahan dan mengubah bentang alam sehingga adanya potensi dampak terhadap lingkungan, sosial maupun ekonomi masyarakat. Kegiatan pertambangan batubara melibatkan proses ekstraksi batubara dari endapan bawah tanah dengan serangkaian tahapan yang meliputi eksplorasi, penambangan, pengangkutan, pengelolaan dan pemasaran batubara (Habib & Khan, 2021; Kumari & Bhattacharya, 2023). Selama proses tersebut, diperlukan berbagai fasilitas pendukung untuk memastikan kegitasan pertambangan berjalan secara lancar, efisien dan memenuhi standar atau peraturan yang berlaku.

Salah satu bentuk fasilitas pendukung kegiatan pertambangan adalah konstruksi fasilitas pengelolaan air dari area bukaan lahan akibat kegiatan pertambangan (Bazaluk et al., 2022). Aliran air yang mengalir dari hulu area kegiatan pertambangan menuju ke badan air penerima terdekat harus sesuai dengan standar baku mutu yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Fasilitas ini bertujuan untuk mengendalikan aliran air, mengurangi kontaminasi dan memastikan bahwa air yang keluar dari area pertambangan aman bagi lingkungan dan masyarakat sekitar. Fasilitas pengelolaan air diharapkan dapat mengurangi dampak negatif dari kegiatan pertambangan terhadap lingkungan dan menjaga kualitas air untuk kepentingan masyarakat dan ekosistem setempat (Liu et al., 2021).

Saat ini terdapat kesenjangan antara kebutuhan perencanaan fasilitas pengelolaan air yang efektif dan efisien pada pertambangan batubara dengan praktik yang saat ini diterapkan (Dey et al., 2023). Sistem pengelolaan air tambang batubara memiliki karakteristik unik yang melibatkan interaksi kompleks antara faktor geologi, hidrologi, teknologi, regulasi, dan sosial-ekonomi. Adanya ketidaksesuaian antara perencanaan fasilitas pengelolaan air yang ada dengan dinamika perubahan lingkungan dan regulasi yang semakin ketat, mengakibatkan adanya kesenjangan antara upaya optimalisasi perencanaan fasilitas pengelolaan terhadap hasil yang diharapkan. Ditambah dengan adanya kesenjangan empiris seperti, kurangnya studi komprehensif yang mengintegrasikan berbagai faktor kompleks dalam pengelolaan air tambang batubara, terbatasnya data empiris mengenai efektivitas berbagai strategi pengelolaan air dalam konteks spesifik pertambangan batubara, minimnya evaluasi jangka panjang terhadap dampak penerapan sistem pengelolaan air terhadap lingkungan dan komunitas sekitar tambang, serta keterbatasan bukti empiris terkait keefektifan pendekatan adaptif manajemen dalam optimalisasi fasilitas pengelolaan air tambang.

Di sisi lain, hal ini merupakan tantangan tersendiri bagi perusahaan yang harus menjaga keseimbangan antara pencapaian profitabilitas dan pemenuhan kebutuhan konstruksi pendukung kegiatan pertambangan, salah satunya yaitu konstruksi fasilitas pengelolaan air. Kedua aspek ini saling terkait dan harus dikelola dengan bijak untuk memastikan keberlangsungan operasional perusahaan yang berkelanjutan. Penting untuk menjaga keseimbangan yang baik antara profitabilitas dan kebutuhan konstruksi pendukung dalam kegiatan pertambangan. Keputusan yang bijak dalam mengalokasikan sumber daya untuk fasilitas pendukung akan membantu perusahaan tetap kompetitif, berkelanjutan, dan dapat mematuhi regulasi yang berlaku.

PT XYZ sebagai salah satu perusahaan pertambangan batubara turut serta berkomitmen meminimalisir dampak lingkungan dengan melakukan langkah positif dalam mematuhi regulasi yang berlaku akibat adanya aktivitas kegiatan pertambangan. Salah satunya yaitu dengan membangun konstruksi fasilitas pengelolaan air di hilir daerah tangkapan air yang diperuntukkan sebagai titik penaatan (*compliance point*) kegiatan pertambangan. Pengadaan konstruksi fasilitas pengelolaan air sebagai bentuk dukungan kegiatan pertambangan, perlu dipertimbangkan baik dari segi *benefit cost analysis* dan analisa usaha & investasi.

Pengadaan fasilitas pendukung aktivitas pertambangan di PT XYZ melipatkan berbagai divisi dalam prosesnya. Mulai dari perencanaan anggaran, rencana desain dan simulasi perhitungan kapasitas konstruksi oleh perencana, kemudian pengajuan anggaran kepada analis bisnis perusahaan, dilanjutkan dengan pengajuan tender oleh *custodian* kepada tim *supply chain* sampai pada tahapan eksekusi pekerjaan oleh kontraktor yang diawasi oleh *custodian*, perencana dan tim geoteknikal. Proses pekerjaan dari hulu sampai ke hilir perlu adanya ketelitian dan ketepatan dalam setiap langkah pengambilan keputusan. Hal ini karena setiap langkah yang diambil akan berimbas sampai ke tahapan akhir proyek layaknya efek domino.

Saat ini, perencanaan fasilitas pengelolaan air tambang masih dilakukan secara konvensional dengan mempertimbangkan faktor-faktor teknis dan kuantitatif secara terbatas. Keterbatasan data juga menjadi salah satu kendala dan batasan untuk dapat melakukan perencanaan secara optimal. Lingkungan pertambangan batubara yang sangat dinamis dan dapat berubah dengan cepat juga menjadi salah satu pertimbangan dalam perencanaan fasilitas pengelolaan air tambang selain dari segi keterlibatan pemangku kepentingan dan kendala sumber daya lainnya (Rahma, 2021; Razi, 2021; Habibi, 2022). Kondisi-kondisi tersebut menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih komprehensif dan adaptif dalam perencanaan fasilitas pengelolaan air pada kegiatan pertambangan batubara. Pendekatan ini harus dapat menangani kompleksitas, ketidakpastian, dan dinamika sistem, serta melibatkan berbagai pemangku kepentingan dan mempertimbangkan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan secara holistik. Sehingga studi kasus pada upaya optimalisasi pengambilan keputusan di *Civil & Project Planning Department* – PT XYZ dengan mempertimbangkan aspek keberlangsungan dan keberlanjutan baik dari segi bisnis perusahaan maupun dari segi lingkungan dan sosial, menggunakan metode *Fuzzy Cognitive Mapping*.

METODE

Metode penelitian dalam artikel jurnal ini membahas tentang pengembangan model konseptual menggunakan Fuzzy Cognitive Mapping (FCM). Langkah pertama dalam membangun model ini adalah identifikasi konsep atau variabel yang terlibat. Proses ini dimulai dengan menentukan domain atau lingkup permasalahan, yang dalam penelitian ini berfokus pada optimasi opsi dalam penentuan budget capital expenditure dengan mempertimbangkan isu lingkungan, sosial, biaya, dan perencanaan desain. Selanjutnya, dilakukan studi literatur untuk memahami faktor-faktor yang berpengaruh berdasarkan penelitian sebelumnya. Setelah itu, faktor-faktor utama seperti biaya investasi, biaya operasional, pendapatan atau keuntungan, tingkat pengembalian investasi, dampak lingkungan, dampak sosial, kualitas desain, regulasi, dan faktor lainnya diidentifikasi. Untuk memperkaya model, dilakukan brainstorming atau konsultasi dengan ahli guna menemukan variabel tambahan yang relevan. Konsep-konsep yang telah teridentifikasi kemudian dikategorikan dan dikelompokkan berdasarkan keterkaitannya untuk memudahkan pemetaan hubungan antarvariabel.

Setelah mengidentifikasi konsep, tahap berikutnya adalah pemetaan hubungan antarvariabel dalam model FCM. Dalam tahap ini, setiap variabel dianalisis untuk memahami definisi, karakteristik, dan perannya dalam permasalahan yang dimodelkan. Langkah berikutnya dalam penelitian ini adalah penentuan bobot pada setiap hubungan dalam model FCM. Bobot diberikan dalam rentang -1 hingga 1, di mana nilai positif menunjukkan pengaruh

positif, nilai negatif menunjukkan pengaruh negatif, dan nilai 0 berarti tidak ada pengaruh. Tahapan selanjutnya adalah simulasi dan analisis model FCM, yang diawali dengan pembuatan skenario alternatif untuk mengeksplorasi berbagai kemungkinan solusi.

Langkah terakhir dalam metode penelitian ini adalah evaluasi kinerja model FCM. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data historis atau observasi, serta melibatkan ahli untuk menilai kesesuaian model dengan kondisi nyata. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk memahami dampak perubahan parameter terhadap hasil simulasi. Selain itu, pengukuran kinerja dilakukan berdasarkan kriteria atau fungsi tujuan, seperti minimisasi biaya atau optimalisasi dampak sosial dan lingkungan. Evaluasi juga mencakup perbandingan hasil dari berbagai skenario alternatif untuk mengidentifikasi solusi terbaik. Dengan pendekatan ini, penelitian dapat memastikan bahwa model FCM yang dikembangkan mampu merepresentasikan sistem nyata secara akurat dan memberikan solusi optimal untuk pengambilan keputusan terkait capital expenditure.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Lapangan

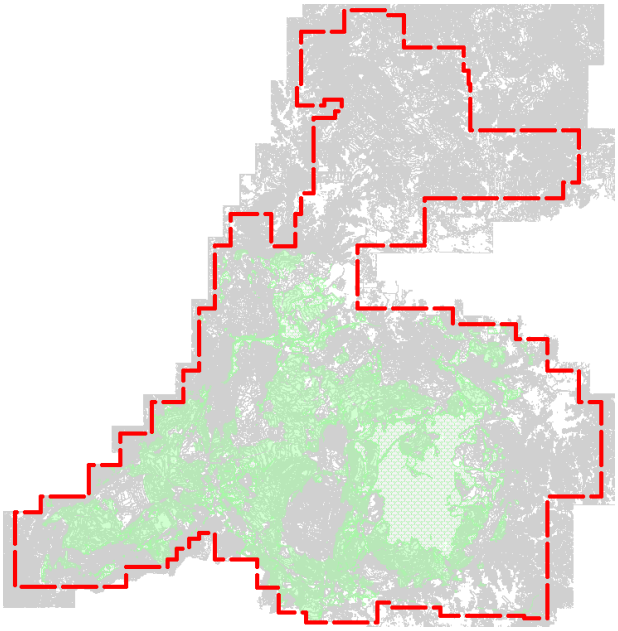
Pertama, data yang ada mewakili faktor-faktor yang berpengaruh dalam perencanaan optimalisasi perencanaan fasilitas pertambangan. Berikut adalah faktor-faktornya:

Tabel 1. Nilai Kualitas Air Kolam A di PT XYZ Tahun 2023

Tahun	Minggu ke-	pH		TSS	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
2023	1	4,41	7,20	N/A	N/A
	2	5,45	7,16	N/A	N/A
	3	5,46	7,13	N/A	N/A
	4	5,13	7,34	N/A	N/A
	5	5,23	7,28	N/A	N/A
	6	5,30	7,29	194	41
	7	4,61	7,30	571	83
	8	4,83	7,17	651	67
	9	5,17	7,28	1.308	73
	10	5,52	7,36	293	70
	11	5,75	7,31	147	82
	12	5,61	7,22	73	45
	13	5,35	7,31	45	74
	14	4,28	7,21	340	68
	15	3,87	7,16	5.99	92
	16	4,63	7,24	2.86	41
	17	5,43	7,22	96	36
	18	6,11	7,25	3.746	88
	19	5,12	7,32	113	81
	20	4,64	7,00	18.81	73
	21	4,33	7,18	80	51
	22	4,03	7,22	9.56	67
	23	4,19	7,27	33.297	90
	24	5,50	7,23	1.491	31
	25	5,52	7,37	40.65	60
	26	5,04	7,41	521	55

Tahun	Minggu ke-	pH		TSS	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
2023	27	4,85	7,25	4.014	62
	28	5,50	7,25	1.023	56
	29	6,02	7,25	10.52	57
	30	5,54	7,31	1.795	63
	31	6,03	7,31	87	66
	32	5,06	7,32	2.768	87
	33	5,01	7,49	97	46
	34	6,33	7,36	992	56
	35	7,34	7,40	137	72
	36	7,19	7,29	82	49
	37	4,75	7,25	18.156	68
	38	5,58	7,32	60.436	57
	39	4,98	7,35	83	57
	40	N/A	7,38	N/A	47
	41	3,94	7,40	30.42	33
	42	3,89	7,37	57.3	84
	43	3,95	7,48	37.9	58
	44	6,68	7,39	46.796	50
	45	1,62	7,36	4.781	40
	46	4,02	7,22	44.41	160
	47	3,03	7,21	195	130
	48	3,85	7,28	2.302	90
	49	3,37	7,05	31.87	96
	50	3,44	7,08	55.596	61
	51	2,43	7,31	17.451	55
	52	2,75	7,47	95.52	33

Dari Tabel 1 diketahui bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara sebelum dan sesudah adanya pengelolaan air. Sehingga untuk mencapai nilai baku mutu yang telah ditetapkan oleh pemerintah, air keluaran dari aktivitas pertambangan harus dikelola terlebih dahulu.



Gambar 1. Boundary Area Revegetasi PT XYZ

Pada saat perencanaan konstruksi fasilitas pengelolaan air dalam kegiatan pertambangan, perencana harus memastikan sudah mengoverlaykannya dengan *boundary* area revegetasi atau *boundary* lainnya seperti hutan lindung dan lain sebagainya. Warna hijau pada gambar berikut menunjukkan area revegetasi dan sebagian area natural yang harus dipertahankan atau tidak boleh diganggu.

Tabel 2. Parameter Nilai Daya Dukung Tanah Proyek Konstruksi Kolam A di PT XYZ

No SPL	Depth	Koordinat		Direct Shear					
				Peak			Residual		
	(m)	Easting	Northing	C' (Mpa)	C' (Kpa)	Ø (º)	C' (Mpa)	C' (Kpa)	Ø (º)
DCP 20 - UDS 01 - SPL 01	0,30 - 1,00	110319	199488	0,0174	17,4	8,0	0,0127	12,7	3,8
DCP 16 - UDS 01 - SPL 01	0,50 - 1,00	110402	199487	0,0180	18,0	11,8	0,0133	13,3	5,4
				Average	**17,4**	**8,0**		**12,7**	**3,8**
DCP 16 - UDS 01 - SPL 02	1,50 - 2,00	110402	199487	0,0185	18,5	14,7	0,0135	13,5	6,5
DCP 20 - UDS 01 - SPL 02	1,50 - 2,00	110319	199488	0,0186	18,6	13,1	0,0137	13,7	6,8
				Average	**18,5**	**13,1**		**13,5**	**6,5**
DCP 16 - UDS 01 - SPL 03	2,00 - 2,50	110402	199487	0,0192	19,2	15,5	0,0142	14,2	7,2
DCP 20 - UDS 01 - SPL 03	2,50 - 3,00	110319	199488	0,0197	19,7	15,8	0,0148	14,8	7,7
				Average	**19,2**	**15,5**		**14,2**	**7,2**

Tabel 2 merupakan hasil pengujian DCP dan UDS terhadap material tanah atau batuan di lokasi penelitian. Terdapat enam lokasi titik pengujian dengan kedalaman 0,30-meter sampai dengan kedalaman 3,0 meter. Parameter hasil pengujian *direct shear* dibagi menjadi dua kondisi yaitu, kondisi puncak dan kondisi residual, dengan parameter uji berupa kohesi dan sudut geser dalam.

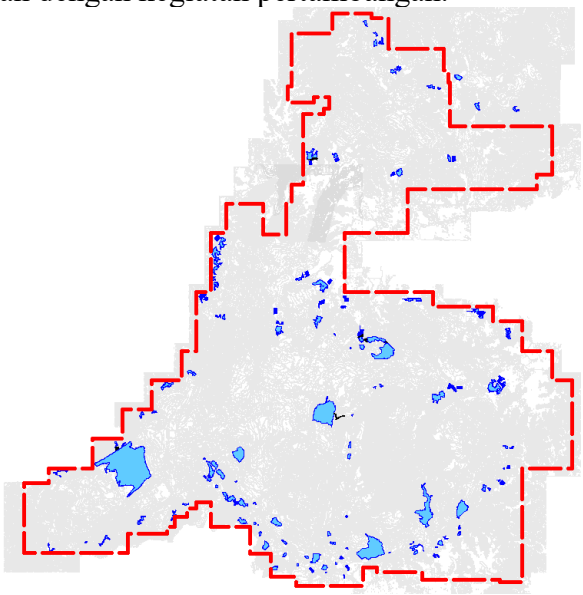
Tabel 3. Simulasi Perhitungan Curah Hujan Rancangan dan Debit Banjir Rancangan

No	Kala Ulang (Tahun)	Curah Hujan Rancangan (mm)	Debit Banjir Rancangan (m^3/s)
1	1.01	45.68	0.39
2	2	76.68	0.49
3	5	95.22	0.54
4	10	107.49	0.57
5	25	122.99	0.60
6	50	134.49	0.62
7	100	145.91	0.64

Dalam hal perencanaan fasilitas pengelolaan air, data hujan diolah terlebih dahulu menjadi data hujan rancangan dengan probabilitas kala ulang tertentu dan kemudian disimulasikan dalam bentuk data debit untuk mengukur kuantitas air keluaran dari kolam atau titik penaatan. Metode simulasi dapat menggunakan metode rasional, metode hidrograf, dan

pemodelan menggunakan software. Debit hasil simulasi dengan kala ulang 100 tahun yang digunakan untuk merancang kapasitas kolam atenuasi dan kolam pengendap.

PT XYZ beroperasi di bawah kerangka regulasi yang berlaku di Indonesia dan secara internasional yang relevan dengan kegiatan pertambangan.



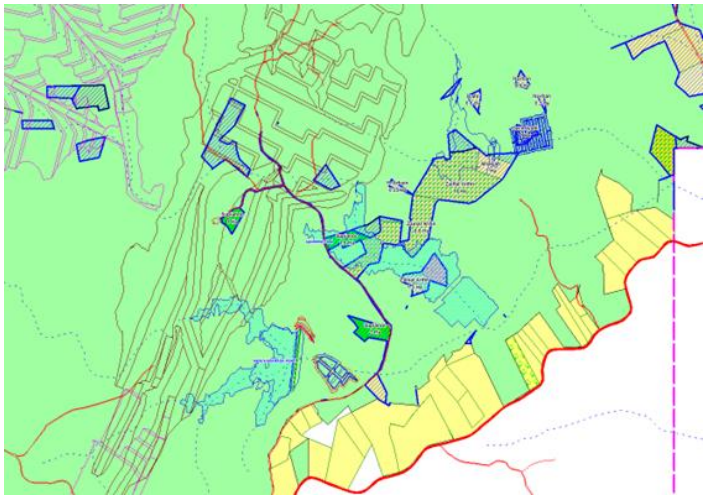
Gambar 2. Sebaran Lokasi Kolam atau Fasilitas Pengelolaan Air Kegiatan Pertambangan di PT XYZ

Pada poin ini, kepatuhan regulasi yang ditekankan terhadap perencanaan fasilitas pengelolaan air adalah kepatuhan regulasi terkait pengelolaan limbah, dimana PT XYZ telah membangun sebanyak 45 titik penaatan yang merupakan *filter* terakhir sebelum aliran dari area terganggu release ke badan air penerima yang akan digunakan oleh masyarakat. Namun sebelumnya dilakukan *treatment* terlebih dahulu saat air masuk ke dalam kolam. Hal ini untuk memastikan secara kualitas dan kuantitas sudah *comply* sesuai standar yang telah ditetapkan.

Tabel 4. Data Suhu, Kelembaban Udara dan Kecepatan Angin Kutai Timur

Bulan	Suhu (°C)	Kelembapan Relatif (%)	Kecepatan angin (km/jam)
Januari	27.97	74.67	1.34
Februari	28.23	73.33	1.39
Maret	28.50	74.82	1.40
April	28.59	74.98	1.44
Mei	28.45	79.05	1.33
Juni	27.11	83.16	1.29
Juli	27.17	82.86	1.29
Agustus	27.42	82.79	1.19
September	26.75	85.53	1.34
Oktober	26.77	86.86	1.33
November	27.02	88.41	1.22
Desember	26.64	86.08	1.19

Data-data di atas menunjukkan kondisi iklim dan cuaca di rencana lokasi proyek. Pola suhu, kelembapan, dan kecepatan angin relatif konsisten dari waktu ke waktu. Kondisi tersebut memungkinkan penggunaan data historis sebagai representasi kondisi aktual, tanpa memerlukan penyesuaian besar akibat perubahan pola iklim. Data historis digunakan sebagai acuan dalam merancang sistem pengelolaan air, termasuk kapasitas fasilitas seperti kolam pengendapan, saluran drainase, dan sistem kontrol banjir. Desain fasilitas dapat disesuaikan dengan karakteristik pola cuaca yang stabil, menghindari *overdesigned* atau *underdesigned*.



Gambar 3. Identifikasi Pembebasan Lahan Rencana Kolan A di PT XYZ

Interpretasi gambar di atas adalah sebagai berikut:

1. Area berwarna hijau solid menunjukkan area yang sudah dibebaskan, sehingga dapat dikerjakan atau dapat diganggu.
2. Area berwarna kuning solid menunjukkan area yang sudah teridentifikasi kepemilikannya dan sedang dalam tahap negoisasi.
3. Area dengan arsiran hijau menunjukkan area yang sudah teridentifikasi kepemilikan sekaligus peruntukan lahannya, sehingga harga area tersebut akan jauh lebih mahal dibanding area berwarna kuning solid.

Tabel 5. Estimasi Pendekatan Harga Konstruksi Kolam A dalam Konsesi PT XYZ

No.	Project Work	Amount (IDR)
1	Mobilization and demobilization all equipment and tools needed for construction. Total distance mobilization from check point to the project area. Include temporary access preparation and maintenance during project.	623,250,000.00
2	Clearing all of project area (dam body/embankment, wet perimeter, labyrinth, spillway, channel, TSSP, borrow, road access, etc)	513,867,187.50
3	Chemical treatment along project duration	491,687,433.00
4	Earthwork preparation for borrow area	4,163,075,683.50
5	Main earthwork of body dam and labyrinth (cut)	2,112,426,937.50
6	Main earthwork of body dam and labyrinth (fill)	1,898,536,406.25
7	Earthwork support for environmental, safety and maintenance & treatment (road and rehab)	959,482,055.25
8	Geotextile non-woven reinforcement	120,000,000.00
9	Culvert Installation	1,377,750,000.00
10	Water gate (iron wood) installation	575,625,000.00
11	Concrete, wood structure, sign board and fence	1,961,776,950.00
12	Chemical treatment facilities	568,500,000.00
13	All items procurement	155,232.75
	Total (IDR)	**15,366,132,885.75**

Variabel performa ekonomi tidak hanya bergantung pada CAPEX dan OPEX, juga berbagai faktor lain seperti harga energi dan manfaat ekonomis dalam jangka panjang.

Implementasi Pendekatan FCM

Pengimplementasian FCM pada studi optimalisasi perencanaan fasilitas pengelolaan fasilitas air pada kegiatan pertambangan batubara. Berikut adalah prosesnya:

Tabel 6. Matriks Hubungan Antar Variabel

Variabel	Kualitas Air	Keanekaragaman Hayati	Geologi dan Hidrologi	Kepatuhan Regulasi
Kualitas air	0.00	0.75	0.75	1.00
Keanekaragaman Hayati	0.75	0.00	-1.00	0.50
Geologi dan Hidrologi	0.50	-1.00	0.00	0.50
Kepatuhan Regulasi	1.00	0.50	0.50	0.00
Iklim dan Cuaca	-0.75	-0.50	1.00	-1.00
Keterlibatan Masyarakat	-0.75	0.25	-1.00	1.00
Performa Ekonomi	-1.00	-1.00	-0.50	1.00

Matriks hubungan antar variabel menunjukkan bahwa Kepatuhan Regulasi berperan penting dalam menjaga Kualitas Air (1.00) dan Keanekaragaman Hayati (0.50), serta mengurangi dampak negatif dari faktor ekonomi dan sosial. Geologi dan Hidrologi memiliki pengaruh positif terhadap kualitas air (0.50) tetapi berdampak negatif pada biodiversitas (-1.00), menunjukkan bahwa perubahan geologi dapat mengancam ekosistem. Iklim dan Cuaca cenderung berdampak negatif pada kualitas air (-0.75), biodiversitas (-0.50), dan kepatuhan regulasi (-1.00), meskipun berhubungan positif dengan geologi (1.00). Performa Ekonomi juga menunjukkan hubungan negatif dengan kualitas air (-1.00), biodiversitas (-1.00), dan geologi (-0.50), tetapi regulasi yang kuat dapat menyeimbangkan kepentingan ekonomi dan lingkungan (1.00). Sementara itu, Keterlibatan Masyarakat memiliki dampak positif terhadap regulasi (1.00) dan biodiversitas (0.25), tetapi dapat menantang pengelolaan air (-0.75) dan geologi (-1.00).

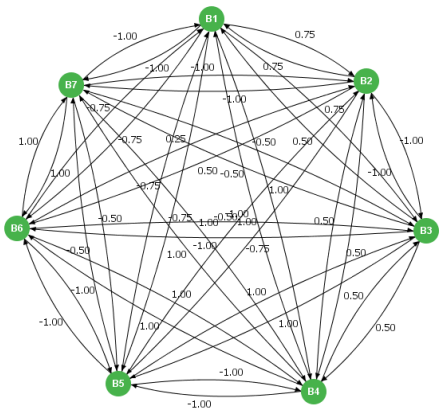
Tabel 7. Matriks Hubungan Antar Variabel (lanjutan)

Variabel	Iklim dan Cuaca	Keterlibatan Masyarakat	Performa Ekonomi
Kualitas air	-0.75	-0.75	-1.00
Keanekaragaman Hayati	-0.75	0.50	-1.00
Geologi dan Hidrologi	1.00	-1.00	-0.50
Kepatuhan Regulasi	-1.00	1.00	1.00
Iklim dan Cuaca	0.00	-1.00	-0.50
Keterlibatan Masyarakat	-1.00	0.00	1.00
Performa Ekonomi	-0.50	1.00	0.00

Matriks hubungan antar variabel menunjukkan bahwa Iklim dan Cuaca memiliki dampak negatif terhadap Kualitas Air (-0.75), Keanekaragaman Hayati (-0.75), dan Kepatuhan Regulasi (-1.00), namun berkontribusi positif terhadap Geologi dan Hidrologi (1.00). Keterlibatan Masyarakat berdampak positif pada Keanekaragaman Hayati (0.50), Kepatuhan Regulasi (1.00), dan Performa Ekonomi (1.00), tetapi memiliki dampak negatif terhadap Geologi dan Hidrologi (-1.00) dan Iklim dan Cuaca (-1.00). Sementara itu, Performa Ekonomi menunjukkan pengaruh negatif terhadap Kualitas Air (-1.00), Keanekaragaman Hayati (-1.00), dan Geologi dan Hidrologi (-0.50), tetapi memiliki hubungan positif dengan Kepatuhan Regulasi (1.00) dan Keterlibatan Masyarakat (1.00).

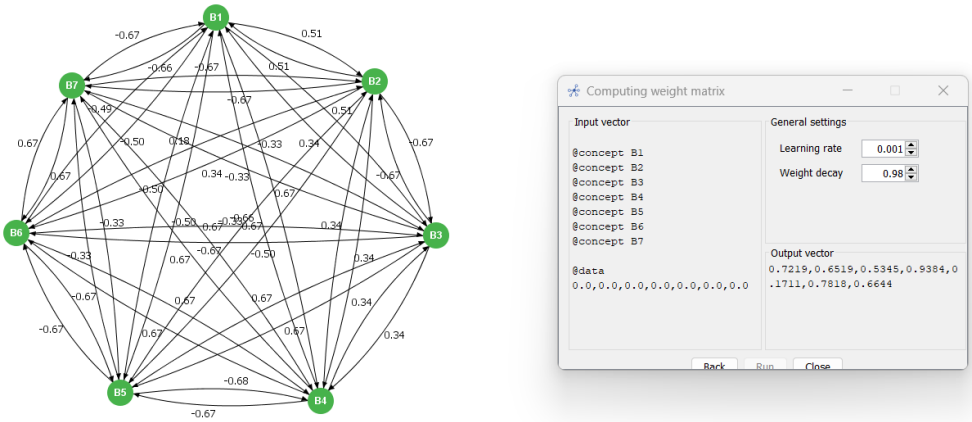
Pemodelan FCM

Setelah proses pengumpulan data-data yang dibutuhkan dalam penelitian, data-data tersebut kemudian diolah untuk disimulasikan. Gambar berikut merepresentasikan hasil klastering menggunakan algoritma Fuzzy C-Means (FCM). Grafis ini digunakan untuk visualisasi hasil klastering pada data yang bersifat fuzzy atau tidak memiliki batas yang tegas antara kelompok satu dengan lainnya.



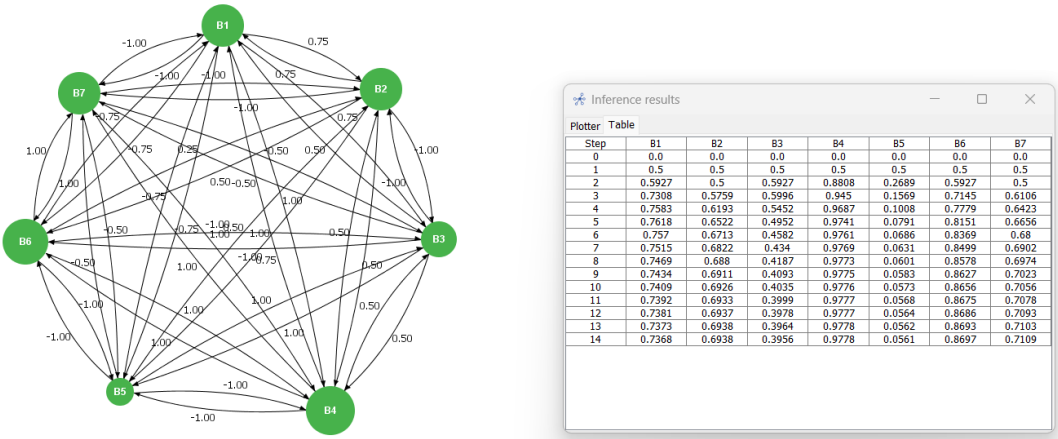
Gambar 4. Hubungan Antar Variabel berdasarkan Bobot Pengaruh Inisial

Diagram yang ditunjukkan pada gambar di atas merupakan representasi variabel atau konsep dalam sistem, dengan arah panah menunjukkan pengaruh satu variabel terhadap variabel lainnya. Semakin tinggi nilai bobot suatu variabel, menunkukkan pengaruh yang sangat kuat antara dua variabel, begitu pula sebaliknya, Sedangkan ketika terdapat panah dua arah, berarti variabel saling mempengaruhi. Setelah dimodelkan dengan simulasi bobot awal, kemudian model dirunning.



Gambar 5. Komputasi Pembobotan Matriks

Learning rate menunjukkan kecepatan proses pembaruan bobot selama iterasi. Nilai yang kecil menunjukkan bahwa proses perubahan bobot berjalan secara perlahan untuk meningkatkan akurasi. Sedang *weight decay* mengontrol pengurangan bobot agar model tidak terlalu sensitif terhadap data noise atau overfitting. Vektor input di awal sistem adalah 0,0, 0, …, 0, yang berarti kondisi awal semua variabel bernilai nol. Sedangkan vektor output merupakan output setelah iterasi yang menunjukkan hasil akhir dari aktivasi sistem. Hal ini menggambarkan tingkat pengaruh atau aktivitas masing-masing variabel setelah simulasi.



Step	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.5927	0.5	0.5927	0.8808	0.2689	0.5927	0.5
3	0.7308	0.5759	0.5996	0.945	0.1569	0.7145	0.6106
4	0.7583	0.6193	0.5452	0.9687	0.1008	0.7779	0.6423
5	0.7618	0.6522	0.4952	0.9741	0.0791	0.8151	0.6656
6	0.757	0.6713	0.4582	0.9761	0.0686	0.8369	0.68
7	0.7515	0.6822	0.434	0.9769	0.0631	0.8499	0.6902
8	0.7469	0.688	0.4187	0.9773	0.0601	0.8578	0.6974
9	0.7434	0.6911	0.4093	0.9775	0.0583	0.8627	0.7023
10	0.7409	0.6926	0.4035	0.9776	0.0573	0.8656	0.7056
11	0.7392	0.6933	0.3999	0.9777	0.0568	0.8675	0.7078
12	0.7381	0.6937	0.3978	0.9777	0.0564	0.8686	0.7093
13	0.7373	0.6938	0.3964	0.9778	0.0562	0.8693	0.7103
14	0.7368	0.6938	0.3956	0.9778	0.0561	0.8697	0.7109

Gambar 6. Hasil Simulasi Pembobotan FCM

Hasil simulasi menunjukkan bahwa hubungan dengan bobot positif terbesar (0,67) terjadi pada simulasi dari B6 ke B5, B6 ke B7, B2 ke B3, dan B4 ke B5, yang mengindikasikan bahwa peningkatan pada variabel asal akan meningkatkan variabel tujuan secara signifikan. Sebaliknya, bobot negatif terbesar (-0,68) terdapat pada simulasi dari B5 ke B4, diikuti oleh hubungan dari B6 ke B4, B3 ke B6, dan B1 ke B6 dengan nilai -0,67, yang berarti peningkatan pada variabel asal akan menghambat atau menurunkan nilai variabel tujuan. Proses iterasi inferensi model FCM menunjukkan bahwa setelah 14 iterasi, sistem mencapai kestabilan, di mana nilai aktivasi setiap variabel tidak lagi mengalami perubahan signifikan. Dari hasil simulasi, variabel *kepatuhan regulasi* (B4) memiliki nilai tertinggi (0,977), menunjukkan bahwa faktor ini paling dominan dalam sistem dan memiliki dampak besar terhadap optimalisasi pengelolaan fasilitas air dalam pertambangan batubara. Selain itu, variabel *keterlibatan masyarakat* (B6) dan *kualitas air* (B1) juga menunjukkan pengaruh yang cukup besar dengan nilai masing-masing 0,869 dan 0,736. Sebaliknya, variabel *iklim dan cuaca* (B5) serta *geologi dan hidrologi* (B3) memiliki nilai yang lebih rendah, menandakan bahwa faktor-faktor tersebut memiliki pengaruh yang lebih kecil dalam sistem.

Validasi Model FCM

Validasi model bertujuan untuk mengevaluasi apakah struktur dan hasil dari model Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) yang dibangun telah merepresentasikan dinamika sistem nyata dengan baik.

Tabel 8. Validasi Simulasi Model FCM

Variabel	Bobot observasi	Bobot hasil	Deviasi
Kualitas air	0.500	0.737	0.237
Keanekaragaman Hayati	1.000	0.694	0.306
Geologi dan Hidrologi	0.500	0.396	0.104
Kepatuhan Regulasi	1.000	0.978	0.022
Iklim dan Cuaca	0.500	0.056	0.444
Keterlibatan Masyarakat	0.500	0.870	0.370
Performa Ekonomi	1.000	0.711	0.289
Rata-Rata	**0.714**	**0.634**	**0.253**
Standar Deviasi	**0.267**	**0.312**	**0.147**

Validasi model menunjukkan bahwa standar deviasi antara bobot observasi dan bobot hasil pemodelan menunjukkan kedekatan. Penyimpangan terbesar terdapat pada variabel iklim dan cuaca. Sedang penyimpangan terkecil terdapat pada variabel kepatuhan regulasi. Rerata deviasi pada kedua bobot sebesar 0,253, sehingga dapat dikatakan model cukup mewakili terhadapa kondisi awal.

Analisis Hasil FCM

Analisis hasil FCM dilakukan untuk memahami bagaimana model merepresentasikan hubungan antar variabel berdasarkan bobot simulasi yang dihasilkan. Simulasi ini memberikan gambaran mengenai variabel-variabel yang memiliki peran signifikan dalam sistem berdasarkan nilai bobot hasil simulasi. Hasil simulasi model FCM menunjukkan bobot hubungan antar variabel tanpa adanya variabel pengaruh utama secara langsung. Namun, variabel-variabel dengan bobot simulasi terbesar diidentifikasi sebagai variabel yang memberikan kontribusi paling signifikan dalam sistem. Dalam penelitian ini, kepatuhan regulasi diidentifikasi sebagai variabel yang memberikan kontribusi paling signifikan dalam sistem. Hal ini menunjukkan tingkat keterkaitan variabel kepatuhan regulasi yang tinggi terhadap dinamika sistem. Hasil simulasi menunjukkan distribusi bobot yang cukup merata, meskipun terdapat beberapa variabel dengan bobot lebih dominan.

Analisis penyimpangan dalam sistem dilakukan untuk mengukur akurasi model dengan membandingkan bobot hasil simulasi dan bobot observasi. Penyimpangan terbesar terdapat pada variabel iklim dan cuaca, yang sifatnya dinamis dan sulit diprediksi. Sedang penyimpangan terkecil terdapat pada variabel kepatuhan regulasi, yang cenderung lebih stabil. Hasil analisis menunjukkan bahwa model FCM cukup akurat dalam memetakan hubungan antar variabel. Tidak terdapat variabel pengaruh utama, tetapi beberapa variabel memiliki bobot hasil simulasi yang lebih besar dibandingkan lainnya, mencerminkan kontribusi yang signifikan terhadap dinamika sistem. Penyimpangan yang ditemukan bersifat wajar dan dapat diterima dalam konteks pemodelan sistem yang kompleks.

Analisis Sensitivitas Model FCM

Analisa sensitivitas dilakukan terhadap variabel yang paling berpengaruh berdasarkan hasil pemodelan, yaitu variabel kepatuhan regulasi, Salah satu tujuan adanya fasilitas pengelolaan air di bagian hilir kegiatan pertambangan adalah untuk meminimalisir kerusakan atau pencemaran lingkungan hidup.

Tabel 9. Nilai Unit Pencemaran untuk Berbagai Parameter Air Limbah / Limbah Cair

Parameter	Nilai 1 Unit Pencemaran *)
COD	50 Kg
TSS	50 Kg
Oil & Grease	3 Kg
Merkuri *(Mercury)*	20 g
Chromium	500 g
Nikel *(Nickle)*	500 g
Timbal *(Lead)*	500 g
Copper	1000 g
Cadmium	100 g
Pestisida dan Herbisida *(Pesticides and Herbicides)*	100 g

*) Nilai 1 unit pencemaran setiap parameter ditetapkan para ahli berdasarkan pertimbangan tingkat bahaya dan level toksisitasnyan serta kemampuan alam untuk mendegradasi, bila dilepas/terlepas ke lingkungan hidup. Makin kecil berarti makin bahaya dan/atau makin sulit didegradasi oleh alam.

Tabel 10. Basis Biaya per Unit Pencemaran

Basis Tarif Per Unit Pencemaran (UP)	Rp. 24.750

Berikut merupakan simulasi kalkulasi kerugian lingkungan jika salah satu variabel berupa kepatuhan regulasi tidak terpenuhi atau dilampauinya baku mutu lingkungan hidup sebagai akibat tidak dilaksanakannya seluruh atau sebagian kewajiban pengolahan air limbah, Metode perhitungan berdasar akumulasi nilai unit pencemaran. Kejadian *breaches* berupa nilai TSS yang melebihi baku mutu yang seharusnya maksimal sebesar 300 mg/L terdeteksi sebesar 4,784 mg/L. Kondisi *breaches* berlangsung selama enam hari dengan nilai debit rata-rata sebesar 13,95 m^3/s.

Perhitungan kerugian lingkungan menggunakan Permen No. 7 Tahun 2014, yaitu:

1. Debit rata-rata = 13,95 m^3/s
2. Rentang waktu pencemaran = 6 hari
   = 6 x 3.600 x 24
   = 518.400 detik
3. Beban pencemaran netto selama 6 hari = (4.784 – 300) x 13,95 x 518.400 / 1000
   = 32.426.853 kg
4. Jumlah unit pencemar selama 6 hari= 32.426.853 / 50 (nilai 1 unit pencemaran)
   = 648.537 UP (unit pencemar)
5. Nilai kerugian lingkungan selama 6 hari = 648.537 x 24.750 (basis tarif per UP)
   = 16.051.292.235 (IDR)
6. Volume run-off per hari = 13,95 x 3600 x 24
   = 1.204.416 m^3

Simulasi di atas menunjukkan nilai kerugian atau denda yang harus dibayarkan perusahaan saat terdapat adanya pencemaran TSS yang terjadi selama 6 hari, yaitu sebesar Rp 16.051.292.235. Nilai tersebut merujuk pada satu jenis pencemar saja, yaitu TSS (Total Suspended Solids). Jika terjadi pencemaran lain seperti pH yang melebihi ambang batas atau pelanggaran debit air yang keluar, total kerugian akan meningkat signifikan. Biaya investasi untuk proyek konstruksi fasilitas pengelolaan air sebesar Rp 15.366.132.886. Biaya ini mencakup pengeluaran awal untuk membangun fasilitas pengelolaan air. Estimasi biaya operasional selama 5 tahun sebesar Rp 4.000.000.000. Biaya ini mencakup biaya pemeliharaan, energi, bahan kimia, tenaga kerja, dan operasional fasilitas pengelolaan air. Sehingga dapat disimpulkan bahwa total biaya investasi selama 5 tahun adalah Rp 19.366.132.886. Jika dibandingkan, kerugian akibat pencemaran (Rp 16,05 miliar) sudah hampir setara dengan CAPEX proyek pengelolaan air (Rp 15,36 miliar). Dengan tambahan OPEX selama 5 tahun (Rp 4 miliar), total biaya investasi (Rp 19,37 miliar) sedikit lebih tinggi dari nilai kerugian akibat pencemaran selama 6 hari.

Oleh karena itu, membangun dan mengoperasikan fasilitas pengelolaan air (CAPEX dan OPEX) lebih efisien dibandingkan membayar denda besar akibat pencemaran. Jika pencemaran terjadi lebih dari sekali atau melibatkan lebih banyak jenis pencemar, kerugian dapat jauh melampaui biaya investasi dan jika terjadi pelanggaran lain seperti pH atau debit air, kerugian akan bertambah, sehingga fasilitas pengelolaan air menjadi solusi untuk menghindari risiko ini. Selain kerugian finansial, pencemaran dapat merusak reputasi perusahaan, mempengaruhi hubungan dengan masyarakat, dan menciptakan masalah hukum. Dengan menghindari denda pencemaran yang potensial, perusahaan dapat mencapai pengembalian investasi (ROI) yang positif dalam jangka panjang melalui efisiensi operasional dan kepatuhan lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian mengenai optimalisasi perencanaan fasilitas pengelolaan air di PT XYZ menghasilkan dua kesimpulan utama. Pertama, terdapat tujuh faktor kunci yang mempengaruhi optimalisasi perencanaan fasilitas, dengan kepatuhan regulasi sebagai faktor paling dominan. Faktor ini mengharuskan fasilitas memenuhi standar lingkungan yang berlaku, termasuk batas kualitas air buangan dan kapasitas pengelolaan limbah. Faktor lainnya adalah keterlibatan masyarakat, kualitas air, performa ekonomi, keanekaragaman hayati, geologi dan hidrologi, serta iklim dan cuaca, yang memiliki pengaruh berbeda-beda terhadap optimalisasi perencanaan. Meskipun iklim dan cuaca mempengaruhi dinamika pengelolaan air, faktor ini lebih sulit dikontrol dibandingkan faktor lain yang dapat dikelola langsung oleh perusahaan. Kedua, kepatuhan regulasi menjadi faktor utama dalam perencanaan fasilitas pengelolaan air, yang harus memperhitungkan karakteristik air tambang, kondisi geologi dan hidrologi, serta teknologi yang digunakan.

Studi kasus perencanaan konstruksi kolam A menunjukkan bahwa model optimal adalah kombinasi antara kolam atenuasi dan kolam pengendap. Kolam atenuasi dirancang dengan slope tertentu dan pelapisan geotextile untuk meningkatkan stabilitas, serta dilengkapi sistem pipa untuk mengurangi debit keluaran. Sementara itu, kolam pengendap berbentuk kolam labirin dengan kedalaman lima meter dan dilengkapi pintu besi sebagai outlet. Air yang masuk ke kolam pengendap terlebih dahulu melalui proses pengolahan dengan kapur dan alum untuk memastikan kualitas air sesuai baku mutu sebelum dialirkan ke badan air terdekat. Dari segi ekonomi, biaya konstruksi fasilitas harus diintegrasikan dengan potensi profit tambang untuk menjaga keseimbangan antara investasi dan manfaat. Meskipun efisiensi biaya menjadi prioritas, kepatuhan terhadap regulasi tetap menjadi hal utama agar terhindar dari risiko penalti atau gangguan operasional. Oleh karena itu, perencanaan harus mencakup analisis keekonomian, evaluasi risiko, dan desain modular yang fleksibel agar fasilitas dapat diperluas sesuai kebutuhan di masa depan.

REFERENSI

Bazaluk, O., Ashcheulova, O., Mamaikin, O., Khorolskyi, A., Lozynskyi, V., & Saik, P. (2022). Innovative activities in the sphere of mining process management. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 878977.

Dey, S., Tripathy, B., Kumar, M. S., & Das, A. P. (2023). Ecotoxicological consequences of manganese mining pollutants and their biological remediation. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *5*, 55–61.

Habib, M. A., & Khan, R. (2021). Environmental impacts of coal-mining and coal-fired power-plant activities in a developing country with global context. *Spatial Modeling and Assessment of Environmental Contaminants: Risk Assessment and Remediation*, 421–493.

Habibi, A. (2022). *Pencemaran Lingkungan Akibat Tambang Batu Bara di Desa Serongga Kabupaten Kotabaru*.

Kumari, M., & Bhattacharya, T. (2023). A review on bioaccessibility and the associated health risks due to heavy metal pollution in coal mines: Content and trend analysis. *Environmental Development*, *46*, 100859.

Liu, Y., Wang, P., Gojenko, B., Yu, J., Wei, L., Luo, D., & Xiao, T. (2021). A review of water pollution arising from agriculture and mining activities in Central Asia: Facts, causes and effects. *Environmental Pollution*, *291*, 118209.

Rahma, N. (2021). Dampak Pertambangan Batu Bara Pada Kesehatan Lingkungan: A Systematic Review. *Health Safety Environment Journal*, *2*(2).

Razi, M. F. (2021). *Dampak Aktivitas Pertambangan Batubara Terhadap Lingkungan dan Masyarakat Kalimantan Timur*.