

Pioneer Vegetation Analysis and Ecological Disturbance Interpretation in the Sidoarjo Mudflow (LUSI) Area Based on Hazard Microzonation Map Classification

[Analisis Vegetasi Pionir dan Interpretasi Gangguan Ekologi pada Kawasan Lumpur Sidoarjo (LUSI) Berdasarkan Klasifikasi Peta Mikrozonasi Tingkat Bahaya]

Muhammad Ide Trianjaya¹⁾, Intan Rohma Nurmalasari²⁾

¹⁾Program Studi Agroteknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Agroteknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: intan.rohma@umsida.ac.id

Abstract.. The Sidoarjo Mudflow (LUSI) disaster has altered landscape characteristics and environmental conditions, affecting pioneer vegetation colonization across different hazard zones. This study aimed to analyze pioneer vegetation structure, determine the Important Value Index (IVI) of pioneer plant species across microzonation hazard levels, and interpret the ecological conditions influencing vegetation distribution. The research was conducted from April to May 2026 in six hazard zones: very high hazard, high hazard, moderate hazard, alert, safe, and very safe. Vegetation data were collected using belt transects with purposive sampling in 1×1 m plots. Vegetation structure was evaluated through density, frequency, dominance, and IVI, followed by descriptive quantitative analysis and ecological interpretation based on environmental factors. No pioneer vegetation was recorded in the very high hazard zone. The dominant species in each subsequent zone were *Typha latifolia* (IVI = 222.18), *Panicum repens* (130.95), *Ischaemum rugosum* (113.30), *Cleome rutidosperma* (77.77), and *Bidens pilosa* (116.13). Vegetation structure varied along an ecological gradient primarily influenced by electrical conductivity and soil temperature. These findings demonstrate that pioneer vegetation structure can serve as a biological indicator for interpreting ecological conditions and assessing ecosystem recovery trajectories in the Sidoarjo Mudflow area.

Keywords -Pioneer Vegetation; Sidoarjo Mudflow; Microzonation; Important Value Index; Ecological Conditions.

Abstrak. Bencana Lumpur Sidoarjo (LUSI) telah mengubah karakteristik bentang lahan dan kondisi lingkungan, sehingga memengaruhi kolonisasi vegetasi pionir pada berbagai zona tingkat bahaya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur vegetasi pionir, menentukan Indeks Nilai Penting (INP) spesies tumbuhan pionir pada setiap tingkat bahaya berdasarkan mikrozonasi, serta menginterpretasikan kondisi ekologi yang memengaruhi distribusi vegetasi. Penelitian dilaksanakan pada bulan April hingga Mei 2026 di enam zona tingkat bahaya, yaitu zona sangat bahaya, bahaya, sedang, waspada, aman, dan sangat aman. Data vegetasi dikumpulkan menggunakan metode transek sabuk (belt transect) dengan teknik purposive sampling pada petak berukuran 1×1 m. Struktur vegetasi dianalisis berdasarkan parameter kerapatan, frekuensi, dominansi, dan Indeks Nilai Penting (INP), kemudian dilanjutkan dengan analisis deskriptif kuantitatif serta interpretasi ekologi berdasarkan faktor-faktor lingkungan. Tidak ditemukan vegetasi pionir pada zona sangat bahaya. Spesies yang mendominasi pada masing-masing zona berikutnya adalah *Typha latifolia* (INP = 222,18), *Panicum repens* (130,95), *Ischaemum rugosum* (113,30), *Cleome rutidosperma* (77,77), dan *Bidens pilosa* (116,13). Struktur vegetasi menunjukkan variasi sepanjang gradien ekologi yang terutama dipengaruhi oleh konduktivitas listrik (Electrical Conductivity/EC) dan suhu tanah. Temuan ini menunjukkan bahwa struktur vegetasi pionir dapat digunakan sebagai indikator biologis untuk menginterpretasikan kondisi ekologi serta menilai arah pemulihan ekosistem di kawasan Lumpur Sidoarjo (LUSI).

Kata Kunci -Vegetasi Pionir; Lumpur Sidoarjo; Mikrozonasi; Indeks Nilai Penting; Kondisi Ekologi.

I. PENDAHULUAN

Peristiwa lumpur Lapindo pada 29 Mei 2006 merupakan salah satu bencana geologi terbesar di Indonesia. Nama “Lapindo” dikaitkan masyarakat karena lokasi area pengeboran migas milik PT Lapindo Brantas, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo. Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 14 Tahun 2007 dibentuknya lembaga pemerintah PPLS (Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo) istilah nama diubah menjadi “Lumpur Sidoarjo” (LUSI) [1]. Berdasarkan peta PPLS, luasan genangan lumpur mencapai 2640 hektar (ha), terdiri atas 2000 ha kawasan daratan dan 640 ha kawasan genangan lumpur, meliputi tiga kecamatan yakni Kecamatan Porong, Tanggulangin, dan Jabon [2].

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

LUSI mengakibatkan kerusakan permukiman, area pertanian, perubahan bentang lahan, serta menurunnya potensi sumber daya alam. Selain kerusakan fisik lingkungan, kawasan ini juga mengalami pencemaran yang menyebabkan perubahan karakteristik lingkungan, terutama pada kondisi tanah sebagai media tumbuh bagi vegetasi. Material lumpur yang mengendap memiliki kandungan sifat fisik-kimia tertentu yang mempengaruhi perbedaan struktur vegetasi, seperti ketersediaan unsur hara, pH, dan lain sebagainya [3]. Perubahan kondisi tersebut menyebabkan hanya jenis vegetasi tertentu yang mampu bertahan dan beradaptasi pada lingkungan yang mengalami pencemaran, sehingga muncul keberadaan tanaman pionir sebagai vegetasi awal yang berperan dalam proses pemulihan ekosistem. Untuk mengetahui pola keberadaan vegetasi tersebut, diperlukan analisis vegetasi yang dapat menggambarkan struktur komunitas tumbuhan pada kawasan terdampak [4].

Analisis vegetasi adalah suatu metode pengamatan yang digunakan untuk mengetahui jenis, komposisi, dominansi, serta pola penyebaran tumbuhan pada suatu wilayah tertentu [5]. Tanaman pionir adalah tanaman yang pertama kali tumbuh dan mampu beradaptasi pada lahan yang mengalami kondisi atau kerusakan lingkungan. Keberadaan tanaman-tanaman tersebut menunjukkan bahwa mereka memiliki tingkat toleransi yang tinggi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem [6].

Persebaran vegetasi menunjukkan adanya beberapa jenis tanaman introduksi maupun tanaman pionir yang tumbuh secara alami di kawasan terdampak lumpur Sidoarjo. Penelitian sebelumnya telah mengkaji struktur vegetasi pada kawasan sekitar terdampak lumpur Sidoarjo, Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya 11 jenis vegetasi dengan dominasi utama *Panicum* sp., *Panicum maximum*, dan *Arthraxon* sp. Namun demikian, penelitian tersebut dilakukan pada wilayah desa yang berada di luar klasifikasi zona mikrozonasi kawasan terdampak LUSI [7]. Sementara itu, Kawasan terdampak Lumpur Sidoarjo telah diklasifikasikan dalam peta mikrozonasi yang ditetapkan oleh PPLS ke dalam beberapa tingkat bahaya, yaitu zona sangat aman, aman, awas, waspada, bahaya, dan zona sangat bahaya. Perbedaan tingkat bahaya tersebut ditentukan berdasarkan kondisi geologi, geoteknik, hidrogeologi, geofisika, hidrologi, kegempaan, lingkungan, serta aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang berbeda pada setiap zona [8]. Di antara berbagai parameter tersebut, aspek lingkungan memiliki kontribusi terhadap keberadaan dan persebaran vegetasi pionir [9]. Oleh karena itu, faktor lingkungan menjadi salah satu komponen penting yang perlu diperhatikan dalam kajian struktur vegetasi pada setiap tingkat bahaya mikrozonasi.

Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur vegetasi, serta mencari nilai Indeks Nilai Penting (INP) jenis tanaman pionir berdasarkan tingkat bahaya zona mikrozonasi di kawasan Lumpur Sidoarjo, serta melihat interpretasi terhadap kondisi ekologi terhadap sebaran tanaman pionir.

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April hingga Mei 2026 di enam lokasi yang mewakili klasifikasi tingkat bahaya berdasarkan peta mikrozonasi kawasan Lumpur Sidoarjo (LUSI), Kecamatan Porong. Lokasi penelitian meliputi zona sangat bahaya di Desa Renokenongo, zona bahaya di Desa Jatirejo, zona waspada di Desa Pejarakan, zona awas di Desa Mindi, zona aman di Desa Besuki, serta zona sangat aman di Desa Ketapang, Kecamatan Tanggulangin.



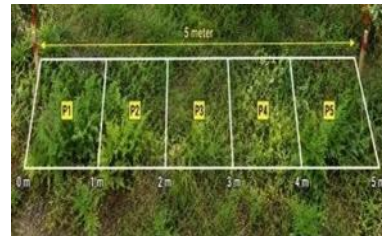
Gambar 1. Peta mikrozonasi

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi GPS atau aplikasi peta untuk menentukan koordinat plot, meteran sepanjang 5 m, tali rafia, patok kayu atau bambu, kamera untuk dokumentasi, alat tulis lapangan, laptop, serta perlengkapan keselamatan kerja. Penelitian menggunakan metode belt transect dengan teknik purposive sampling yang dipadukan dengan pendekatan deskriptif. Metode ini digunakan untuk memperoleh parameter vegetasi berupa densitas, dominansi, dan frekuensi yang selanjutnya dihitung menjadi Indeks Nilai Penting (INP) sebagai dasar analisis struktur vegetasi pionir [10].

Metode belt transect diterapkan menggunakan petak berukuran 1×1 m yang disusun secara berurutan. Pada penelitian ini, setiap transek dibuat sepanjang 5 m dan dibagi menjadi lima petak pengamatan berukuran 1×1 m sehingga mampu merepresentasikan kondisi vegetasi tumbuhan bawah pada masing-masing lokasi penelitian.



Gambar 2. Titik lokasi pengambilan anveg



Gambar 3. Desain plot belt transect

Pengumpulan data dilakukan melalui data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari pengamatan langsung di lapangan yang meliputi identifikasi vegetasi pionir, densitas, dominasi, serta frekuensi setiap spesies. Sementara itu, data sekunder diperoleh melalui dokumentasi berupa pengambilan foto objek, pencatatan koordinat lokasi, serta pengukuran faktor-faktor ekologi seperti suhu, kelembapan, sifat kimia dan biologi tanah, serta parameter lingkungan lainnya yang mendukung interpretasi kondisi lokasi penelitian.

Selain pengamatan lapangan, identifikasi vegetasi pionir juga dilakukan melalui studi literatur yang bersumber dari buku, jurnal ilmiah, dan website. Informasi yang diperoleh digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik fisiologi setiap spesies pionir sehingga mendukung proses identifikasi serta interpretasi hasil penelitian berdasarkan referensi ilmiah yang relevan.

Pada tahap analisis data, parameter densitas, dominasi, dan frekuensi dihitung menjadi nilai relatif berupa densitas relatif, dominasi relatif, dan frekuensi relatif, kemudian dijumlahkan untuk memperoleh Indeks Nilai Penting (INP). Seluruh perhitungan dilakukan menggunakan rumus yang telah ditetapkan. Selanjutnya, nilai INP dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk menggambarkan tingkat dominansi, persebaran, dan peranan masing-masing spesies pionir pada setiap lokasi penelitian. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan dengan mengaitkan kondisi gangguan ekologi pada masing-masing lokasi sehingga dapat menjelaskan hubungan antara tingkat gangguan ekologi dengan pola struktur vegetasi pionir yang terbentuk.

Perhitungan Indeks Nilai Penting (INP)

Densitas (D)	$D = \frac{\text{Jumlah individu suatu spesies}}{\text{Luas total plot}}$
Densitas Relatif (DR)	$DR = \frac{D \text{ suatu spesies}}{\sum D \text{ seluruh spesies}} \times 100\%$
Frekuensi (F)	$F = \frac{\text{Jumlah plot yang ditempati suatu spesies}}{\text{Jumlah seluruh plot}}$
Frekuensi Relatif (FR)	$FR = \frac{F \text{ suatu spesies}}{\sum F \text{ seluruh spesies}} \times 100\%$
Dominansi (Do)	$Do = \frac{\text{Total penutupan tajuk suatu spesies}}{\text{Luas total plot}}$
Dominansi Relatif (DoR)	$DoR = \frac{Do \text{ suatu spesies}}{\sum Do \text{ seluruh spesies}} \times 100\%$
Indeks Nilai Penting (INP)	
$INP = DR + FR + DoR$	

Gambar 4. Rumus perhitungan INP

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi temuan pionir

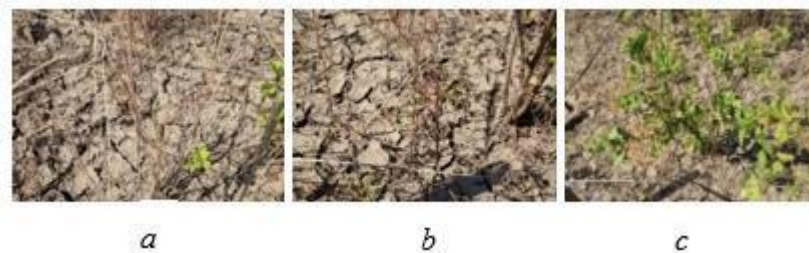
Desa Jatirejo (zona bahaya)



Gambar a menunjukkan spesies *Typha latifolia* yang toleran terhadap salinitas sedang–tinggi, pH tanah masam, dan kondisi tanah miskin oksigen melalui jaringan aerenkima. Spesies ini juga memiliki biomassa tinggi dan pertumbuhan cepat sehingga berperan sebagai tumbuhan pionir pada lahan terganggu.

Gambar b menunjukkan spesies *Panicum repens* yang merupakan rumput C4 dengan efisiensi fotosintesis tinggi pada kondisi cahaya dan suhu tinggi. Spesies ini memiliki rimpang yang mempercepat penyebaran vegetatif serta toleran terhadap kekeringan, genangan, dan salinitas sedang.

Desa Pejajaran (zona waspada)



Gambar a menunjukkan spesies *Panicum repens* yang merupakan rumput C4 dengan efisiensi fotosintesis tinggi pada cahaya dan suhu tinggi. Spesies ini memiliki rimpang yang mempercepat penyebaran vegetatif serta toleran terhadap kekeringan, genangan, dan salinitas sedang.

Gambar b menunjukkan spesies *Phyllanthus niruri* yang memiliki siklus hidup pendek, toleran terhadap tanah miskin hara, cepat menghasilkan biji, dan mampu mengkolonisasi lahan terbuka.

Gambar c menunjukkan spesies *Pluchea indica* yang toleran terhadap salinitas dan tanah tergenang, serta memiliki sistem perakaran yang kuat sehingga mampu tumbuh pada lahan yang mengalami gangguan.

Desa Mindi (zona awas)

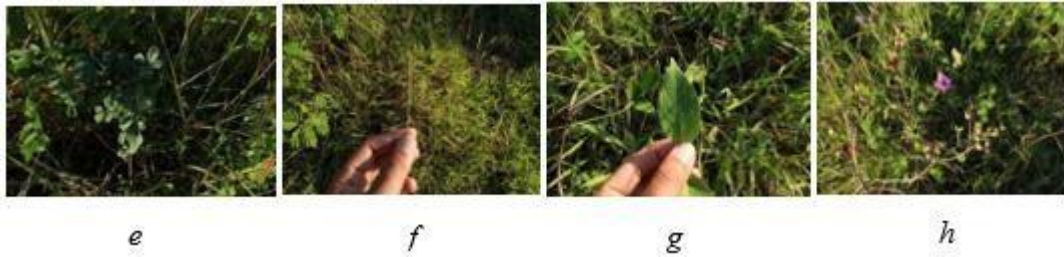


Gambar a menunjukkan spesies *Chloris virgata* yang merupakan rumput C4 dengan toleransi terhadap suhu tinggi, kekeringan, dan lahan terbuka. Spesies ini memiliki produksi biji yang tinggi sehingga cepat menyebar.

Gambar b menunjukkan spesies *Achyranthes aspera* yang toleran terhadap kekeringan dan tanah miskin hara, serta memiliki sistem perakaran yang kuat untuk bertahan pada habitat terganggu.

Gambar c menunjukkan spesies *Scleria microcarpa* yang toleran terhadap kelembapan tinggi dan tanah basah, serta memiliki pertumbuhan yang cepat pada habitat terbuka.

Gambar d menunjukkan spesies *Ipomoea obscura* yang memiliki pertumbuhan cepat sebagai tumbuhan merambat, toleran terhadap intensitas cahaya tinggi, dan mampu menutupi lahan terbuka dengan cepat.



Gambar e menunjukkan spesies *Indigofera hirsuta* yang merupakan leguminosa dengan kemampuan bersimbiosis bersama bakteri penambat nitrogen sehingga mampu tumbuh pada tanah miskin nitrogen.

Gambar f menunjukkan spesies *Ischaemum rugosum* yang merupakan rumput C4 dengan toleransi terhadap tanah lembap hingga tergenang serta memiliki kemampuan regenerasi yang cepat melalui biji.

Gambar g menunjukkan spesies *Centrosema virginianum* yang merupakan leguminosa penambat nitrogen, toleran terhadap tanah miskin hara, serta berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah.

Gambar h menunjukkan spesies *Vernonia gigantea* yang memiliki pertumbuhan cepat dan toleran terhadap cahaya penuh sehingga mampu mengkolonisasi lahan terbuka.



i

Gambar i menunjukkan spesies *Mimosa pudica* yang merupakan leguminosa dengan kemampuan bersimbiosis bersama bakteri penambat nitrogen sehingga mampu tumbuh pada tanah miskin hara dan habitat yang sering mengalami gangguan.

Desa Besukii (zona aman)



Gambar a menunjukkan spesies *Phyllanthus tenellus* yang merupakan herba semusim dengan produksi biji tinggi, cepat mengkolonisasi lahan terbuka, dan toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Gambar b menunjukkan spesies *Chloris virgata* yang merupakan rumput C4 dengan toleransi terhadap suhu tinggi, kekeringan, dan lahan terbuka. Spesies ini memiliki produksi biji yang tinggi sehingga cepat menyebar.

Gambar c menunjukkan spesies *Cyathula prostrata* yang toleran terhadap tanah terganggu dan tanah miskin hara, memiliki pertumbuhan cepat, sistem perakaran adaptif, serta menghasilkan biji melimpah sehingga mampu mengkolonisasi lahan terbuka.

Gambar d menunjukkan spesies *Cleome rutidosperma* yang memiliki pertumbuhan cepat, toleran terhadap cahaya tinggi dan tanah terganggu, serta menghasilkan biji dalam jumlah banyak sehingga cepat menyebar.



e

f

g

h

Gambar e menunjukkan spesies *Bidens pilosa* yang memiliki daya kecambah dan produksi biji yang tinggi, pertumbuhan cepat, serta toleran terhadap berbagai kondisi tanah sehingga mampu mengkolonisasi lahan terbuka.

Gambar f menunjukkan spesies *Vigna radiata* yang merupakan leguminosa penambat nitrogen sehingga mampu tumbuh pada tanah dengan kesuburan sedang dan membantu meningkatkan kesuburan tanah.

Gambar g menunjukkan spesies *Urena lobata* yang toleran terhadap tanah kering maupun lembap, serta memiliki sistem perakaran yang kuat untuk bertahan pada lahan terganggu.

Gambar h menunjukkan spesies *Asystasia gangetica* yang memiliki laju pertumbuhan tinggi, berkembang biak secara vegetatif maupun generatif, serta toleran terhadap berbagai kondisi lingkungan.



i

j

k

Gambar i menunjukkan spesies *Brachiaria mutica* yang merupakan rumput C4 dengan toleransi terhadap genangan serta memiliki pertumbuhan vegetatif yang cepat melalui stolon.

Gambar j menunjukkan spesies *Ageratum conyzoides* yang memiliki pertumbuhan cepat, menghasilkan biji dalam jumlah besar, toleran terhadap tanah miskin hara, serta memiliki sifat alelopati ringan terhadap spesies lain.

Gambar k menunjukkan spesies *Mimosa pudica* L. yang merupakan leguminosa dengan kemampuan bersimbiosis bersama bakteri penambat nitrogen sehingga mampu tumbuh pada tanah miskin hara dan habitat yang sering mengalami gangguan.

Desa Ketapang (zona sangat aman)



a

b

c

d

Gambar a menunjukkan spesies *Bidens pilosa* yang memiliki daya kecambah dan produksi biji yang tinggi, pertumbuhan cepat, serta toleran terhadap berbagai kondisi tanah sehingga mampu mengkolonisasi lahan terbuka.

Gambar b menunjukkan spesies *Phyllanthus tenellus* yang merupakan herba semusim dengan produksi biji tinggi, cepat mengkolonisasi lahan terbuka, dan toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Gambar c menunjukkan spesies *Cleome rutidosperma* yang memiliki pertumbuhan cepat, toleran terhadap cahaya tinggi dan tanah terganggu, serta menghasilkan biji dalam jumlah banyak sehingga cepat menyebar.

Gambar d menunjukkan spesies *Aerva lanata* yang toleran terhadap kekeringan, suhu tinggi, dan tanah miskin hara sehingga umum dijumpai pada lahan terbuka.



Gambar e menunjukkan spesies *Hyptis capitata* yang toleran terhadap cahaya tinggi, menghasilkan biji melimpah, serta mampu mengkolonisasi lahan terbuka dengan cepat.

Gambar f menunjukkan spesies *Cyperus brevifolius* yang toleran terhadap kelembapan tinggi serta berkembang biak melalui biji dan rimpang.

B. Rekapitulasi Indeks Nilai Penting

Tabel 1. Rekapitulasi Indeks Nilai Penting

No	Lokasi	Zona	Nama spesies	Kode	D	DR (%)	Doms	DoR (%)	F	FR (%)	INP
1.	Renokenongo	Sangat bahaya (kondisi terendam)	-	-	0	0	0	0	0	0	0
2	Jatirejo	Bahaya	<i>Typha latifolia</i>	A	60,2	79,00	0,492	93,18	1,0	50,00	222,18
			<i>Panicum repens</i>	B	16,0	21,00	0,036	6,82	1,0	50,00	77,82
3	Pejarakan	Waspada	<i>Panicum repens</i>	A	63,0	64,42	0,166	33,20	1,0	33,33	130,95
			<i>Phyllanthus niruri</i>	B	9,2	9,41	0,018	3,60	1,0	33,33	46,34
			<i>Pluchea indica</i>	C	25,6	26,18	0,316	63,20	1,0	33,33	122,71
4	Mindi	Awes	<i>Chloris virgata</i>	A	9,4	4,16	0,040	4,43	1,0	17,24	25,83
			<i>Scleria microcarpa</i>	B	85,8	37,96	0,460	52,99	1,0	17,24	108,19
			<i>Ipomoea obscura</i>	C	0,4	0,18	0	0	0,2	3,45	3,63
			<i>Ischaemum rugosum</i>	D	119,2	52,74	0,376	43,32	1,0	17,24	113,30
			<i>Centrosema virginianum</i>	E	2,4	1,06	0	0	0,8	13,79	14,85
			<i>Mimosa pudica</i>	F	2,2	0,97	0,026	3,00	0,4	6,90	10,87
			<i>Vernonia gigantea</i>	G	0,6	0,27	0	0	0,4	6,90	7,17
			<i>Indigofera hirsuta</i>	H	2,8	1,24	0	0	0,4	6,90	8,14
			<i>Achyranthes aspera</i>	I	3,2	1,42	0	0	0,6	10,34	11,76
5	Besuki	Aman	<i>Phyllanthus tenellus</i>	A	0,2	0,25	0,008	1,00	0,2	3,45	4,70
			<i>Cleome rutidosperma</i>	B	19,8	24,87	0,286	35,66	1,0	17,24	77,77
			<i>Vigna radiata</i>	C	22,0	27,64	0,256	31,92	1,0	17,24	76,80

			<i>Brachiaria mutica</i>	D	14,2	17,84	0,034	4,24	1,0	17,24	39,32
			<i>Ageratum conyzoides</i>	E	4,0	5,03	0,018	2,24	0,6	10,34	17,61
			<i>Mimosa pudica</i>	F	4,2	5,28	0,016	2,00	0,6	10,34	17,62
			<i>Bidens pilosa</i>	G	11,0	13,82	0,160	19,95	0,4	6,90	40,67
			<i>Chloris cucullata</i>	H	0,6	0,75	0	0	0,2	3,45	4,20
			<i>Cyathula prostrata</i>	I	3,0	3,77	0,024	2,99	0,4	6,90	13,66
			<i>Urena lobata</i>	J	0,4	0,50	0	0	0,2	3,45	3,95
			<i>Asystasia gangetica</i>	K	0,2	0,25	0	0	0,2	3,45	3,70
6	Ketapang	Sangat Aman	<i>Bidens pilosa</i>	A	31,8	51,13	0,276	41,19	1,0	23,81	116,13
			<i>Phyllanthus tenellus</i>	B	2,6	4,18	0,012	1,79	0,6	14,29	20,26
			<i>Cleome rutidosperma</i>	C	2,6	4,18	0,014	2,09	0,8	19,05	25,32
			<i>Aerva lanata</i>	D	2,6	4,18	0	0	0,4	9,52	13,70
			<i>Hyptis capitata</i>	E	9,4	15,11	0,194	28,96	0,8	19,05	63,12
			<i>Cyperus brevifolius</i>	F	13,2	21,22	0,174	25,97	0,8	19,05	66,24

Berdasarkan hasil analisis vegetasi, komposisi tumbuhan pionir berbeda pada setiap kategori zona mikrozonasi di kawasan Lumpur Sidoarjo (LUSI). Parameter yang dianalisis meliputi kerapatan (D), kerapatan relatif (KR), dominansi (DR), frekuensi relatif (FR), dan Indeks Nilai Penting (INP).

Pada zona sangat bahaya di Desa Renokenongo tidak ditemukan vegetasi tumbuhan pionir sehingga seluruh parameter analisis vegetasi tidak memiliki nilai pengamatan.

Pada zona bahaya di Desa Jatirejo ditemukan dua spesies, yaitu *Typha latifolia* dan *Panicum repens*, dengan *T. latifolia* memiliki nilai INP tertinggi sebesar 222,18, sedangkan *P. repens* sebesar 77,82.

Pada zona waspada di Desa Pejarakan ditemukan tiga spesies, yaitu *Panicum repens*, *Phyllanthus niruri*, dan *Pluchea indica*. *Panicum repens* memiliki nilai INP tertinggi sebesar 130,95, diikuti *Pluchea indica* sebesar 122,71 dan *Phyllanthus niruri* sebesar 46,34.

Pada zona awas di Desa Mindi ditemukan sembilan spesies tumbuhan pionir. Nilai INP tertinggi dimiliki *Ischaemum rugosum* (113,30), diikuti *Scleria microcarpa* (108,19), sedangkan tujuh spesies lainnya memiliki nilai INP lebih rendah.

Pada zona aman di Desa Besuki ditemukan sebelas spesies tumbuhan pionir. *Cleome rutidosperma* memiliki nilai INP tertinggi sebesar 77,77, diikuti *Vigna radiata* (76,80), sedangkan sembilan spesies lainnya memiliki nilai INP yang lebih rendah.

Pada zona sangat aman di Desa Ketapang ditemukan enam spesies tumbuhan pionir. *Bidens pilosa* memiliki nilai INP tertinggi sebesar 116,13, diikuti *Cyperus brevifolius* (66,24), *Hyptis capitata* (63,12), *Cleome rutidosperma* (25,32), *Phyllanthus tenellus* (20,26), dan *Aerva lanata* (13,70).

Secara keseluruhan, jumlah spesies tumbuhan pionir yang ditemukan pada masing-masing zona menunjukkan variasi, yaitu tidak ditemukan spesies pada zona sangat bahaya, dua spesies pada zona bahaya, tiga spesies pada zona waspada, sembilan spesies pada zona awas, sebelas spesies pada zona aman, dan enam spesies pada zona sangat aman.



Gambar 5 INP tertinggi setiap zona

Nilai Indeks Nilai Penting (INP) tertinggi pada masing-masing zona berturut-turut adalah *Typha latifolia* (222,18) pada zona bahaya, *Panicum repens* (130,95) pada zona waspada, *Ischaemum rugosum* (113,30) pada zona awas, *Cleome rutidospermae* (77,77) pada zona aman, dan *Bidens pilosa* (116,13) pada zona sangat aman.

C. Karakteristik faktor ekologi setiap zona

Tabel 2 Rekapitulasi faktor Ekologi setiap zona

Nama desa	Zona	Bahan organik tanah (ppm)			Ph (%)	Kelembaban tanah (%)	Kesuburan (EC)	Suhu tanah (C)	Intensitas cahaya
		N	P	K					
Renokenongo	Sangat bahaya	569	380	445	3,5	99%	3000	40,6	12.153 LUX
Jatirejo	Bahaya	288	337	408	6,0	88%	1897	39,8	12.096 LUX
Pejarakan	Waspada	178	217	390	7,5	47%	206	39,2	12.704 LUX
Mindi	Awas	159	308	291	4,5	65%	417	38,5	13.008 LUX
Besuki	aman	113	112	208	6,5	53%	230	36,3	12.999 LUX
ketapang	Sangat aman	85	98	225	6,6	68%	344	32,1	11.047 LUX

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa kondisi faktor-faktor ekologi pada setiap zona di kawasan Lumpur Sidoarjo menunjukkan variasi yang cukup jelas. Perbedaan tersebut meliputi kandungan unsur hara tanah (N, P, dan K), pH tanah, kelengasan tanah, konduktivitas listrik (EC), suhu tanah, serta intensitas cahaya. Variasi nilai pada setiap parameter mencerminkan adanya perubahan karakteristik lingkungan pada masing-masing zona mikrozonasi.

Pada zona sangat bahaya di Desa Renokenongo, kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) masing-masing sebesar 569 ppm, 380 ppm, dan 445 ppm. Tanah memiliki pH 3,5, kelengasan 99%, nilai EC 3000, suhu tanah 40,6°C, dan intensitas cahaya 12.153 lux.

Pada zona bahaya di Desa Jatirejo, kandungan N, P, dan K masing-masing sebesar 288 ppm, 337 ppm, dan 408 ppm. Tanah memiliki pH 6,0, kelengasan 88%, nilai EC 1897, suhu tanah 39,8°C, dan intensitas cahaya 12.096 lux.

Pada zona waspada di Desa Pejarakan, kandungan N, P, dan K berturut-turut sebesar 178 ppm, 217 ppm, dan 390 ppm. Nilai pH tanah mencapai 7,5, dengan kelengasan 47%, nilai EC 206, suhu tanah 39,2°C, serta intensitas cahaya 12.704 lux.

Pada zona awas di Desa Mindi, kandungan N, P, dan K masing-masing sebesar 159 ppm, 308 ppm, dan 291 ppm. Tanah memiliki pH 4,5, kelengasan 65%, nilai EC 417, suhu tanah 38,5°C, dan intensitas cahaya 13.008 lux.

Pada zona aman di Desa Besuki, kandungan N, P, dan K masing-masing sebesar 113 ppm, 112 ppm, dan 208 ppm. Nilai pH tanah sebesar 6,5, kelengasan 53%, nilai EC 230, suhu tanah 36,3°C, dan intensitas cahaya 12.999 lux.

Sementara itu, pada zona sangat aman di Desa Ketapang, kandungan N, P, dan K masing-masing sebesar 85 ppm, 98 ppm, dan 225 ppm. Tanah memiliki pH 6,6, kelengasan 68%, nilai EC 344, suhu tanah 32,1°C, serta intensitas cahaya 11.047 lux. Secara umum, kandungan unsur hara tanah (N, P, dan K) cenderung menurun dari zona sangat bahaya menuju zona sangat aman. Nilai pH bervariasi dari 3,5–7,5, kelengasan tanah berkisar antara 47–99%, sedangkan nilai EC berada pada rentang 206–3000. Suhu tanah menunjukkan kisaran 32,1–40,6°C, dengan suhu tertinggi pada zona sangat bahaya, sementara intensitas cahaya relatif seragam pada seluruh lokasi penelitian, yaitu berkisar 11.047–13.008 lux.

D. Pembahasan

Interpretasi Ekologi Berdasarkan Struktur Vegetasi Pionir

Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur vegetasi tumbuhan pionir di kawasan Lumpur Sidoarjo berubah mengikuti gradien tingkat bahaya berdasarkan klasifikasi mikrozonasi. Perubahan tersebut ditunjukkan oleh variasi jumlah spesies, nilai Indeks Nilai Penting (INP), dan dominansi spesies pada setiap zona. Zona dengan tingkat bahaya tinggi memiliki jumlah spesies yang lebih sedikit dan didominasi spesies yang toleran terhadap kondisi ekstrem, sedangkan zona dengan tingkat bahaya lebih rendah memiliki jumlah spesies yang lebih banyak dan komunitas yang lebih kompleks. Tidak ditemukannya vegetasi pionir di Desa Renokenongo (zona sangat bahaya) menunjukkan bahwa pembentukan komunitas tumbuhan dipengaruhi oleh kondisi faktor-faktor ekologi. [11]. Pola perubahan tersebut dapat

diinterpretasikan melalui konsep Environmental Filtering, Niche Theory, Stress-Gradient Hypothesis, dan Suksesi Primer [12] [13].

Environmental Filtering

Konsep Environmental Filtering menjelaskan bahwa kondisi lingkungan bertindak sebagai penyaring alami yang menentukan spesies yang mampu bertahan pada suatu habitat. Semakin ekstrem kondisi lingkungan, semakin sedikit spesies yang dapat hidup pada habitat tersebut [14].

Konsep ini tampak jelas di kawasan Lumpur Sidoarjo. Pada zona sangat bahaya (Desa Renokenongo) tidak ditemukan vegetasi pionir karena kondisi lingkungan sangat ekstrem, ditandai pH tanah 3,5, EC 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kelembapan tanah 99%, serta akumulasi endapan lumpur yang masih menutupi sebagian besar wilayah sebagai pusat semburan LUSI [11]. Kondisi tersebut menyebabkan penyerapan hara terganggu, tekanan osmotik meningkat, dan tanah menjadi anaerob sehingga proses perkecambahan maupun pertumbuhan vegetasi tidak dapat berlangsung [15] [18].

Sebaliknya, pada zona bahaya mulai terbentuk komunitas vegetasi yang didominasi *Typha latifolia*. Spesies ini mampu lolos dari proses environmental filtering karena memiliki jaringan aerenkima serta toleran terhadap tanah tergenang, pH masam, dan salinitas yang tinggi, sehingga memiliki nilai INP tertinggi [19]. Pada zona waspada hingga sangat aman, tekanan lingkungan semakin berkurang sehingga lebih banyak spesies mampu beradaptasi dan membentuk komunitas vegetasi yang lebih beragam.

Niche Theory

Selain dipengaruhi oleh environmental filtering, struktur vegetasi pada setiap zona mikrozonasi juga mencerminkan perbedaan relung ekologi (ecological niche) antarspesies. Menurut Niche Theory, distribusi spesies ditentukan oleh kebutuhan lingkungan, toleransi fisiologis, dan strategi adaptasinya [12].

Hal ini terlihat dari perbedaan spesies dominan pada setiap zona. *Typha latifolia* mendominasi zona bahaya karena sesuai dengan habitat tergenang, sedangkan *Panicum repens* mendominasi zona waspada berkat mekanisme fotosintesis C4 dan penyebaran melalui rimpang [20][21]. Pada zona awas hingga sangat aman, dominansi bergeser ke spesies ruderal seperti *Bidens pilosa*, *Cleome rutidosperma*, *Cyathula prostrata*, dan *Ageratum conyzoides* yang mampu tumbuh cepat dan menghasilkan biji dalam jumlah besar. Pergeseran dominansi ini menunjukkan bahwa struktur vegetasi dibentuk oleh kesesuaian relung ekologi masing-masing spesies [22][23].

Stress-Gradient Hypothesis

Perubahan struktur vegetasi di kawasan Lumpur Sidoarjo juga mencerminkan konsep Stress-Gradient Hypothesis, yang menyatakan bahwa semakin tinggi stres lingkungan, semakin sedikit spesies yang mampu bertahan sehingga komunitas didominasi oleh spesies yang toleran [24].

Pola ini terlihat dari tidak ditemukannya vegetasi pada zona sangat bahaya, kemudian munculnya *Typha latifolia* sebagai spesies pionir dominan di zona bahaya [25]. Pada zona waspada hingga sangat aman, jumlah spesies dan kompleksitas komunitas meningkat seiring menurunnya tingkat stres lingkungan. Pola tersebut menunjukkan bahwa struktur vegetasi pionir dapat menjadi indikator biologis kondisi ekologi pada setiap zona mikrozonasi di kawasan Lumpur Sidoarjo.

Suksesi Primer

Perubahan struktur vegetasi di kawasan Lumpur Sidoarjo menunjukkan berlangsungnya proses suksesi primer. Endapan lumpur membentuk substrat baru yang awalnya tidak ditumbuhi vegetasi sehingga kolonisasi diawali oleh spesies pionir yang toleran terhadap kondisi ekstrem. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa kawasan terdampak telah dikolonisasi oleh sedikitnya 11 spesies dengan dominasi *Panicum sp.*, *Panicum maximum*, dan *Arthraxon sp.*, namun penelitian tersebut hanya dilakukan pada zona sangat aman sehingga belum menggambarkan seluruh gradien mikrozonasi [26].

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada zona sangat aman, komunitas vegetasi telah berkembang menjadi lebih beragam dan tidak lagi didominasi oleh ketiga spesies tersebut, mengindikasikan terjadinya pergantian spesies selama proses suksesi primer. Berdasarkan gradien mikrozonasi, suksesi diawali oleh habitat tanpa vegetasi pada zona sangat bahaya, diikuti kolonisasi *Typha latifolia* pada zona bahaya, kemudian berkembang menjadi komunitas rumput, herba, semak, dan leguminosa yang semakin beragam pada zona waspada hingga sangat aman. Pola tersebut menunjukkan bahwa struktur vegetasi pionir tidak hanya mencerminkan kondisi ekologi saat ini, tetapi juga arah pemulihan ekosistem di kawasan Lumpur Sidoarjo.

VII. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, perbedaan faktor ekologi pada setiap zona mikrozonasi di kawasan Lumpur Sidoarjo membentuk gradien lingkungan yang memengaruhi struktur vegetasi tumbuhan pionir. Zona sangat bahaya tidak memiliki vegetasi, sedangkan pada zona bahaya hingga sangat aman terjadi peningkatan jumlah spesies dan pergantian spesies dominan dari *Typha latifolia*, *Panicum repens*, *Ischaemum rugosum*, *Cleome rutidosperma*, hingga *Bidens pilosa*. Pola tersebut menunjukkan bahwa faktor ekologi berperan sebagai environmental filtering, perbedaan dominansi mencerminkan ecological niche antarspesies, dan peningkatan kekayaan spesies mendukung konsep Stress-Gradient Hypothesis. Secara keseluruhan, perubahan struktur vegetasi menunjukkan berlangsungnya suksesi primer, sehingga vegetasi tumbuhan pionir dapat digunakan sebagai indikator biologis untuk menginterpretasikan kondisi ekologi dan arah pemulihan ekosistem pada setiap zona mikrozonasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan arahan, masukan, serta dukungan selama proses penyusunan hingga penyelesaian tugas akhir ini. Ucapan terima kasih dan penghormatan yang tulus penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta atas doa, kasih sayang, pengorbanan, serta dukungan yang tiada henti sehingga penulis mampu menyelesaikan pendidikan dan tugas akhir ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para dosen, pembimbing, penguji, keluarga, sahabat, dan semua pihak yang telah memberikan bantuan, semangat, serta dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung. Semoga segala kebaikan, bantuan, dan ketulusan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya..

REFERENSI

- [1] R. Indonesia, Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2007 tentang Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2007.
- [2] R. Indonesia, "Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 48 Tahun 2008 tentang Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo." Jakarta, Indonesia, 2008.
- [3] B. D. Krisnayanti and D. S. Agustawijaya, "Characteristics of Lusi mud volcano and its impacts on the Porong River," *J. Degrad. Min. Lands Manag.*, vol. 1, no. 4, pp. 207–210, 2014, doi: 10.15243/jdmlm.2014.014.207.
- [4] M. A. Ashraf, M. J. Maah, and I. Yusoff, "Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment," *J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 401–416, 2011.
- [5] M. Kent, *Vegetation description and data analysis: a practical approach*. J. nature., vol. 5, no 7. p. 5, 2011.
- [6] D. Nuryanti, A. S. Soma, S. M. Ayu, "Composition, diversity and association of pioneer plants on postlandslide areas in Palopo, South Sulawesi, Indonesia.," *J. Biol. Divers.*, vol. 24, no. 3, 2023.
- [7] S. A. Listriani, "Analisis Vegetasi dan Perkembang-Biakan Tumbuhan Penutup Tanah Pada Lahan Terdampak Lumpur Sidoarjo," Open Access, 2016, [Online]. Available: 10.21070/nabatia.v4i1.246
- [8] Pusat Pengendalian. L. Sidoarjo, "Peta Kawasan Terdampak Lumpur Sidoarjo." 2008.
- [9] C. Agus and D. Wulandari, "The abundance of pioneer vegetation and their interaction with endomycorrhiza at different land qualities after Merapi eruption," *J. Manaj. Hutan Trop.*, vol. 18, no. 3, pp. 145–154, 2012.
- [10] N. Wijanaalian, "Metode Analisis Vegetasi." p. 109, 2014.
- [11] R. J. Davies, R. E. Swarbrick, R. J. Evans, and M. Huuse, "Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006," *J. Gsa Today*, vol. 17, no. 2, pp. 4–9, 2007.
- [12] R. De Wit, "Does the environment 'filter' or 'select' species? Bridging the ecologies of microbes and macro-organisms for a common niche assembly theory," *J. Environ.*, vol. 12, no. 10, p. 350, 2025.
- [13] M. Van Breugel et al., "Feedback loops drive ecological succession: towards a unified conceptual framework," *J. Biol. Rev.*, vol. 99, no. 3, pp. 928–949, 2024.
- [14] L. Erdős et al., "Environmental filtering is the primary driver of community assembly in forest–grassland mosaics: A case study based on CSR strategies," *J. Veg. Sci.*, vol. 35, no. 1, p. e13228, 2024.
- [15] N. C. Brady and R. R. Weil, "The Nature and Properties of Soils". *J. Plants.*, vol. 9, no. 6, p. 7, 2017.
- [16] D. Ford, *The dynamics of plant growth: Integrating morphology, physiology, and development*. J. dyamic plants, Oxford University Press, 2024.
- [17] S. Hardjowigeno, "Ilmu Tanah Jakarta: Akademika Pressindo," *J. Ilmu Tanah Jakarta Akad. Press.*, 2012.

- [18] T. D. Colmer and L. Voesenek, "Flooding tolerance: suites of plant traits in variable environments," *J. Funct. plant Biol.*, vol. 36, no. 8, pp. 665–681, 2009.
- [19] G. Bonanno and M. Orlando-Bonaca, "Common cattail (*Typha latifolia* L.) as a model species for wetland restoration and phytoremediation: A review. *Plants*," *J. Plants*, 2023.
- [20] C.A.B.I., "Panicum repens (torpedograss) Datasheet," *J. Agric.*, 2024.
- [21] A. Geng et al., "Molecular mechanisms and regulatory pathways underlying drought stress response in rice," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 25, no. 2, p. 1185, 2024.
- [22] Q. He, M. D. Bertness, and A. H. Altieri, "Global shifts towards positive species interactions with increasing environmental stress," *J. Ecol. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 695–706, 2013.
- [23] J. H. Connell and R. O. Slatyer, "Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization," *J. Am. Nat.*, vol. 111, no. 982, pp. 1119–1144, 1977.
- [24] A. E. Adams, E. M. Besozzi, G. Shahrokhi, and M. A. Patten, "A case for associational resistance: Apparent support for the stress gradient hypothesis varies with study system," *J. Ecol. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 202–217, 2022.
- [25] A. B. Jensen, F. Eller, and B. K. Sorrell, "Comparative flooding tolerance of *Typha latifolia* and *Phalaris arundinacea* in wetland restoration: insights from photosynthetic CO₂ response curves, photobiology and biomass allocation," *J. Heliyon*, vol. 10, no. 1, 2024.
- [26] I. M. de Oliveira Abrantes and I. Esteves, "Pratylenchus penetrans (northern root lesion nematode)," *J. Veg. Anal.*, 2024.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.