

**KORELASI KEPADATAN LALU LINTAS TERHADAP KADAR NITROGEN DIOKSIDA DAN KLOOROFIL TALUS LIKEN PADA TEGAKAN POHON ANGSANA (*Pterocarpus indicus*) DI KAWASAN INDUSTRI MEDAN 2*****Correlation of Traffic Density on Nitrogen Dioxide Levels and Thallus Chlorophyll Content in Lichen Thallus on Angsana Trees (*Pterocarpus indicus*) in Medan Industrial Area 2***Tiara Bunga Nainggolan<sup>1\*</sup>, Ashar Hasairin<sup>1</sup><sup>1</sup>Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Medan\*Email: [nainggolantiara253@gmail.com](mailto:nainggolantiara253@gmail.com)**Abstract**

Industrial areas are centers of economic activity that contribute significantly to air pollution, particularly Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>). This research aimed to explore the relationship between traffic density, NO<sub>2</sub> levels, and chlorophyll content in lichen thalli on angsana trees (*Pterocarpus indicus*) in Medan Industrial Area 2. This quantitative descriptive study was conducted over three months, with lichen samples collected using purposive sampling method at two locations with different traffic densities. Data collection included measurements of traffic density, environmental parameters, lichen identification, NO<sub>2</sub> level analysis, and chlorophyll content measurement. The results showed a very strong positive correlation between traffic density and NO<sub>2</sub> levels in lichen thalli, and a strong negative correlation between traffic density and total chlorophyll content. A significant negative correlation was also found between NO<sub>2</sub> levels and total chlorophyll content in lichen thalli. Six lichen species from five families with two different thallus types were identified on angsana trees, showing variations in coverage area and physiological responses to pollution levels. This study concludes that lichens are effective bioindicators for detecting NO<sub>2</sub> pollution in industrial areas with varying traffic densities.

**Keywords:** *Bioindicator; Chlorophyll; Industrial Area; Lichen; Nitrogen Dioxide.***Abstrak**

Kawasan industri merupakan pusat aktivitas ekonomi yang berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara, khususnya gas nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>). Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi hubungan antara kepadatan lalu lintas, kadar NO<sub>2</sub>, dan kandungan klorofil talus liken pada tegakan pohon angšana (*Pterocarpus indicus*) di Kawasan Industri Medan 2. Penelitian deskriptif kuantitatif ini dilaksanakan selama tiga bulan dengan pengambilan sampel liken menggunakan metode *purposive sampling* pada dua lokasi dengan kepadatan lalu lintas berbeda. Pengumpulan data meliputi pengukuran kepadatan lalu lintas, parameter lingkungan, identifikasi liken, analisis kadar NO<sub>2</sub>, dan pengukuran kadar klorofil talus. Hasil penelitian menunjukkan terdapat korelasi positif yang sangat kuat antara kepadatan lalu lintas dengan kadar NO<sub>2</sub> pada talus liken, serta korelasi negatif yang kuat antara kepadatan lalu lintas dengan kadar klorofil total. Ditemukan juga korelasi negatif signifikan antara kadar NO<sub>2</sub> dengan kadar klorofil total pada talus liken. Enam spesies liken dari lima famili dengan dua tipe talus teridentifikasi pada tegakan pohon angšana, dengan variasi luas tutupan dan respons fisiologis yang berbeda terhadap tingkat polusi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa liken merupakan bioindikator efektif untuk mendeteksi pencemaran NO<sub>2</sub> di kawasan industri dengan tingkat kepadatan lalu lintas berbeda.

**Kata Kunci:** *Bioindikator; Kawasan Industri; Klorofil; Liken; Nitrogen Dioksida.*

## PENDAHULUAN

Kawasan industri merupakan infrastruktur strategis yang berperan sebagai tulang punggung pembangunan ekonomi suatu wilayah dengan mengkonsentrasikan berbagai kegiatan produktif dalam satu area (Hariz *et al.*, 2018). Sebagai pusat aktivitas ekonomi yang vital, kawasan industri tidak hanya menjadi motor penggerak pertumbuhan ekonomi dan penyedia lapangan kerja, tetapi juga membawa berbagai permasalahan lingkungan yang kompleks, terutama pencemaran udara. Polusi udara di kawasan perkotaan, khususnya di area industri, telah menjadi perhatian global karena dampaknya yang signifikan terhadap kesehatan manusia dan keseimbangan ekosistem (Hartanto *et al.*, 2024; WHO, 2024). Sebagai upaya pemantauan kualitas udara, pemerintah Indonesia telah menetapkan tujuh parameter polutan utama dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, yaitu Sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), Karbon monoksida (CO), Nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>), Hidrokarbon non metana (NMHC), Partikulat debu (TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), dan Timbal (Pb).

Nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) merupakan salah satu polutan udara paling signifikan yang umumnya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di sektor transportasi dan industri (Mardiani *et al.*, 2024). Gas ini telah diidentifikasi sebagai polutan yang konsentrasinya sering melebihi baku mutu udara di kawasan perkotaan dan industri. Menurut data Organisasi Kesehatan Dunia (WHO, 2024), paparan jangka panjang terhadap NO<sub>2</sub> berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan serius hingga meningkatkan risiko kematian pada manusia. Lebih lanjut, interaksi NO<sub>2</sub> dengan komponen atmosfer lainnya dapat membentuk hujan asam yang berdampak negatif pada vegetasi dan ekosistem akuatik (Safira *et al.*, 2022). Dalam konteks pengendalian pencemaran, pemantauan kualitas udara yang efektif menjadi sangat penting, terutama di kawasan industri dengan tingkat aktivitas tinggi seperti Kawasan Industri Medan 2.

Pemantauan kualitas udara secara konvensional menggunakan instrumen fisikokimia memiliki beberapa keterbatasan, termasuk biaya operasional yang tinggi, kebutuhan infrastruktur pendukung seperti internet berkecepatan tinggi, dan keterbatasan dalam mengevaluasi dampak sistemik polutan terhadap organisme hidup (Winatama *et al.*, 2023; Diskominfo Medan, 2022). Meskipun Kota Medan telah menerapkan berbagai inisiatif pemantauan udara seperti Air Quality Monitoring System (AQMS), keterbatasan dalam cakupan pemantauan masih menjadi tantangan (IQAir, 2024). Beberapa penelitian telah mengembangkan metode alternatif untuk pemantauan kualitas udara, seperti penginderaan jauh melalui platform Google Earth Engine (Hartanto *et al.*, 2024), sistem monitoring berbasis NodeMCU ESP32 (Harpad *et al.*, 2022), dan implementasi *fuzzy logic* pada platform Internet of Things (Prayudha *et al.*, 2018). Namun, metode-metode tersebut masih belum optimal dalam mengevaluasi dampak polutan terhadap organisme hidup secara komprehensif.

Salah satu pendekatan yang semakin mendapatkan perhatian dalam evaluasi kualitas udara adalah penggunaan bioindikator. Bioindikator adalah organisme yang keberadaannya dapat digunakan untuk mendeteksi, mengidentifikasi, dan mengkuilifikasi pencemaran lingkungan (Conti & Cecchetti, 2001). Dibandingkan dengan metode instrumentasi fisikokimia, bioindikator menawarkan keunggulan dalam menggambarkan dampak kumulatif polutan terhadap ekosistem (Laelasari *et al.*, 2021). Liken (lumut kerak) telah diakui secara luas sebagai bioindikator yang efektif untuk pemantauan kualitas udara karena sensitivitasnya terhadap perubahan lingkungan, terutama terhadap polutan atmosfer (Hasairin, 2015; Rasyidah, 2018; Ananda *et al.*, 2023; Khoerurrahmah *et al.*, 2024). Sebagai organisme simbiosis antara fungi dan alga, liken memiliki morfologi dan fisiologi yang unik yang membuatnya sangat responsif terhadap fluktuasi polutan udara (Faisal, 2016; Hasairin, 2023; Roziaty *et al.*, 2023).

Indonesia memiliki potensi keanekaragaman liken yang sangat besar dengan perkiraan 40.000 jenis, namun penelitian tentang liken masih sangat terbatas. Liken tidak hanya berfungsi sebagai bioindikator tetapi juga memiliki berbagai manfaat lain seperti bahan obat, makanan hewan, bahan pembuatan parfum, penentu umur batuan, dan sediaan pewarna (Hasairin & Siregar, 2018). Beberapa penelitian telah membuktikan efektivitas liken sebagai bioindikator pencemaran udara, seperti

kemampuannya mengakumulasi logam Pb di wilayah dengan lalu lintas tinggi di Jambi (Anggraini *et al.*, 2021), akumulasi logam Pb dan Cr di Sentul, Bogor (Kurniasih *et al.*, 2020), dan sebagai indikator kualitas udara di Bandung (Rohim *et al.*, 2024).

Talus liken yang tidak memiliki lapisan kutikula menjadikannya sangat efektif dalam menyerap partikel-partikel polutan dari udara. Proses akumulasi polutan terjadi ketika polutan terserap ke dalam jaringan talus liken bersamaan dengan penyerapan air dan nutrisi dari atmosfer (Raimundo *et al.*, 2021). Ketidakmampuan liken dalam mengolah, mengisolasi, atau mengeliminasi polutan yang terserap menyebabkan akumulasi polutan dalam talus, yang tercermin dalam perubahan warna talus (Mardiani *et al.*, 2024). Perbedaan sensitivitas liken terhadap polusi udara berkaitan erat dengan kemampuannya mengakumulasi polutan, dimana jenis liken yang toleran dapat bertahan di lingkungan tercemar, sementara jenis liken sensitif umumnya tidak ditemukan pada area dengan kualitas udara buruk (Conti & Cecchetti, 2001).

Paparan NO<sub>2</sub> memberikan berbagai dampak pada talus liken, baik secara morfologis maupun fisiologis. Secara morfologis, liken yang terpapar NO<sub>2</sub> menunjukkan perubahan warna talus menjadi lebih gelap, penipisan talus yang menyebabkan talus menggulung, penyusutan, dan bahkan hilangnya bagian ujung talus (Roziaty *et al.*, 2023). Secara fisiologis, NO<sub>2</sub> mempengaruhi kandungan klorofil dalam talus liken, dimana semakin tinggi paparan NO<sub>2</sub>, semakin rendah kandungan klorofil dalam talus. Level kritis NO<sub>2</sub> pada liken adalah 30µgm<sup>3</sup>, dimana paparan melebihi nilai tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada talus karena gangguan proses fisiologis dalam sel-sel talus, termasuk fotosintesis dan respirasi.

Meskipun penelitian tentang liken sebagai bioindikator pencemaran udara telah dilakukan di berbagai kota di Indonesia, kajian mendalam tentang korelasi antara kepadatan lalu lintas, kadar NO<sub>2</sub>, dan klorofil talus liken masih sangat terbatas. Penelitian-penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada keanekaragaman liken sebagai indikator pasif tingkat polusi, atau pada akumulasi logam berat dalam talus liken. Masih sedikit penelitian yang secara spesifik mengkaji hubungan langsung antara paparan polutan gas seperti NO<sub>2</sub> dan perubahan fisiologis liken, khususnya kadar klorofil. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang signifikan dalam pemahaman tentang mekanisme respons liken terhadap polutan spesifik seperti NO<sub>2</sub> dan dampaknya terhadap proses fotosintesis yang tercermin dalam kadar klorofil.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi hubungan antara kepadatan lalu lintas, kadar NO<sub>2</sub>, dan kandungan klorofil talus liken pada tegakan pohon angšana (*Pterocarpus indicus*) di Kawasan Industri Medan 2. Secara spesifik, penelitian ini akan mengidentifikasi jenis-jenis liken yang terdapat pada tegakan pohon Angšana, mengukur tingkat kepadatan lalu lintas serta kadar NO<sub>2</sub> dan klorofil talus liken, menganalisis korelasi antara kepadatan lalu lintas dengan kadar NO<sub>2</sub> dan klorofil talus liken, serta menganalisis korelasi antara kadar NO<sub>2</sub> dengan kadar klorofil talus liken. Dengan fokus pada perubahan fisiologis liken sebagai respons terhadap paparan NO<sub>2</sub>, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang mekanisme bioindikasi dan membantu dalam pengembangan metode pemantauan kualitas udara yang lebih efektif dan ekonomis di kawasan industri.

## **METODE**

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif yang dilaksanakan selama tiga bulan (Februari-April 2025) di Kawasan Industri Medan 2, tepatnya di sepanjang Jl. Pulau Nias Selatan dan Jl. Pulau Sebir. Proses identifikasi sampel liken dan uji kadar NO<sub>2</sub> dilakukan di UPTD Laboratorium Lingkungan DLHKSU Medan. Uji kadar klorofil talus liken dilaksanakan di Laboratorium Biologi Universitas Sumatera Utara. Populasi dalam penelitian adalah seluruh spesies liken yang tumbuh di lokasi penelitian, sedangkan sampel diambil menggunakan metode *Purposive Sampling* yang berfokus pada liken yang tumbuh pada tegakan pohon angšana (*Pterocarpus indicus*) di dua lokasi dengan

kepadatan lalu lintas berbeda yaitu kepadatan tinggi (Jl. Pulau Nias Selatan) dan kepadatan rendah (Jl. Pulau Sebir).

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kadar nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) dan kepadatan lalu lintas, sementara variabel terikat meliputi kadar klorofil dan morfologi talus liken pada tegakan pohon angšana. Instrumen yang digunakan dalam penelitian meliputi kertas milimeter, plastik transparan, tali rafia, meteran, pisau, kamera, plastik klip, kertas label, alat tulis, *hand counter*, termometer, higrometer, pinset, timbangan analitik, *cover glass*, objek glass, mikroskop stereo, pipet volume, cawan porselen, *furnace*, gunting, mortar, tabung reaksi, rak tabung reaksi, tissue, kuvet, spektrofotometer, sedangkan bahan yang digunakan adalah liken dari lokasi penelitian, aquades, aseton 80%, kertas saring, reagen standar, plastik sampel steril, label, dan kertas pH universal.

Pengumpulan data kepadatan lalu lintas dilakukan dengan menghitung jumlah kendaraan yang melintas di kedua lokasi penelitian menggunakan *hand tally counter* pada tiga waktu berbeda (pagi pukul 07.00-10.00, siang pukul 11.00-14.00, dan sore pukul 15.00-18.00) selama dua minggu pada hari Senin, Rabu, dan Jumat. Pengukuran faktor lingkungan dilakukan bersamaan dengan perhitungan kepadatan lalu lintas, meliputi suhu udara menggunakan termometer, kelembaban udara menggunakan higrometer, dan kecepatan angin menggunakan anemometer, dengan pengukuran dilakukan satu kali sehari selama dua minggu masa pengamatan untuk mendapatkan gambaran menyeluruh kondisi fisika-kimia lingkungan di lokasi penelitian.

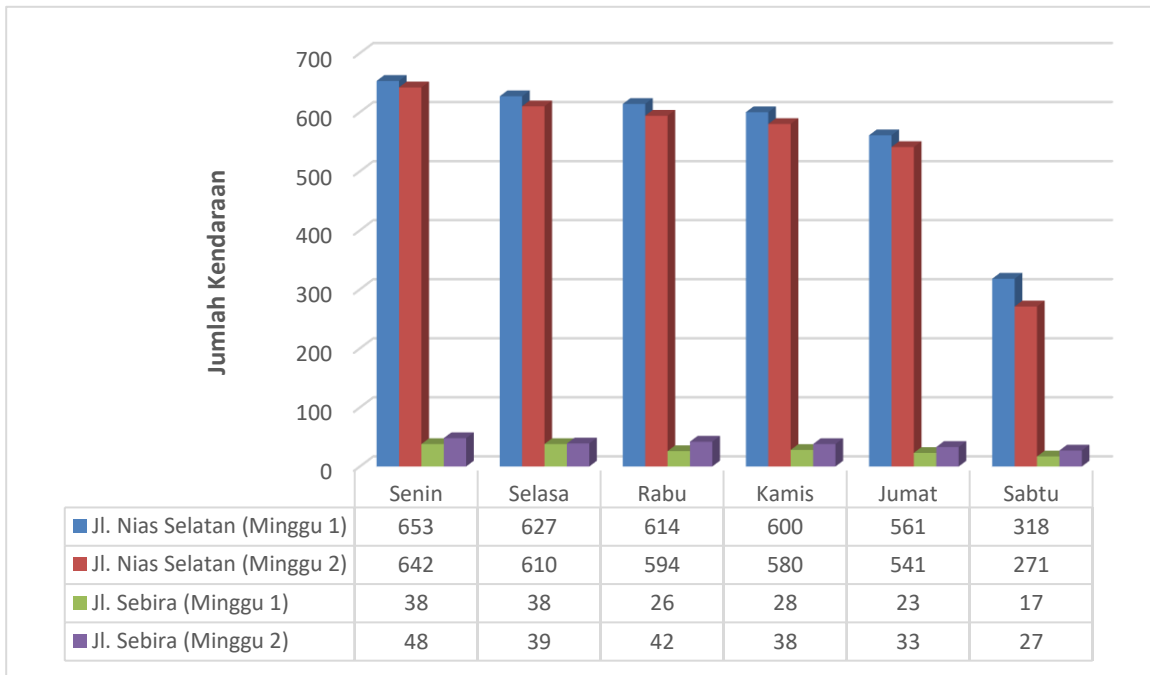
Pengambilan sampel liken dilakukan dengan teknik transek vertikal setinggi 150 cm dari permukaan tanah pada batang pohon angšana yang menghadap langsung ke arah jalan. Ciri-ciri liken yang diamati meliputi tipe talus, warna, bentuk, dan luas tutupan talus, dengan proses pengambilan spesimen liken dilakukan dengan mengupas kulit pohon angšana setebal 0,5-3 mm pada area yang ditumbuhi liken. Pengukuran luas talus liken menggunakan plastik transparan yang kemudian dipotong dan ditimbang untuk dikonversikan ke dalam satuan luas ( $\text{cm}^2$ ) dengan bantuan kertas milimeter, kemudian sampel dimasukkan ke dalam plastik sampel berlabel dan disimpan dalam box styrofoam berisi es batu untuk menjaga kesegaran sampel hingga tiba di laboratorium (Agnan *et al*, 2017).

Prosedur uji kadar  $\text{NO}_2$  dilakukan dengan memisahkan talus liken dari kulit batang pohon, menghaluskan sampel, menimbang 0,5 g sampel, memasukkan ke dalam tabung reaksi dengan 10 ml aquades, mengocok dengan vortex mixer selama 2 menit, memanaskan dalam *water bath* pada suhu  $95^\circ\text{C}$  selama 15 menit, melakukan sentrifugasi (3000 rpm, 10 menit), menyaring ekstrak, menambahkan aquades hingga 25 ml, mengambil 10 ml ekstrak, menambahkan 1 ml larutan penjerat  $\text{NO}_2$ , mendinginkan 15 menit dalam kondisi gelap, dan mengukur absorbansi pada panjang gelombang 550 nm menggunakan spektrofotometer. Sementara itu, prosedur uji klorofil dilakukan dengan memisahkan dan membersihkan talus liken, menimbang 0,5 g sampel, mengekstraksi dengan 50 ml pelarut (aseton/etanol 80%), menyaring, dan mengukur absorbansi pada panjang gelombang 645 nm dan 663 nm menggunakan spektrofotometer untuk menghitung kadar klorofil a, klorofil b, dan klorofil total menggunakan rumus standar.

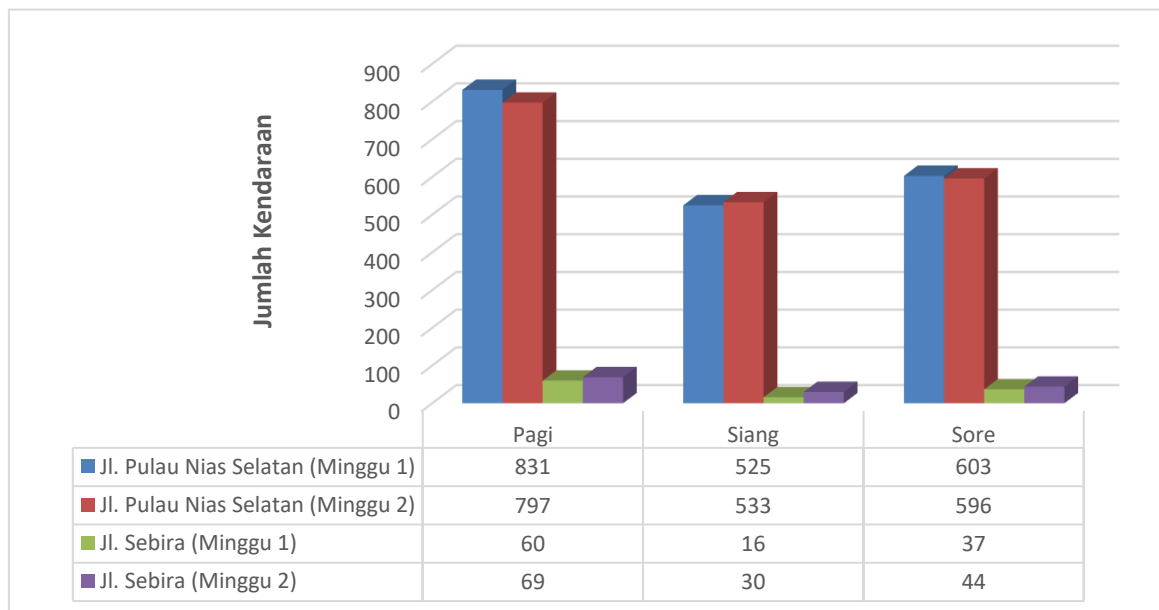
Analisis data hasil identifikasi sampel liken dan pengukuran sifat fisika-kimia lingkungan dilakukan secara deskriptif, sedangkan korelasi antara kepadatan lalu lintas dengan kadar  $\text{NO}_2$  dan korelasi kadar  $\text{NO}_2$  dengan klorofil talus liken dianalisis menggunakan Analisis Korelasi Product Moment dengan bantuan program SPSS versi 25. Interpretasi koefisien korelasi dilakukan berdasarkan interval koefisien: 0,00-0,199 (sangat rendah), 0,20-0,339 (rendah), 0,40-0,599 (cukup), 0,60-0,799 (kuat), dan 0,80-1,000 (sangat kuat). Selanjutnya, uji signifikansi dilakukan untuk mencari makna hubungan variabel dengan menggunakan kriteria: jika angka signifikansi hasil riset  $\leq 0,05$  maka  $H_0$  ditolak dan jika angka signifikansi hasil riset  $\geq 0,05$  maka  $H_0$  diterima.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berdasarkan hasil pengamatan kepadatan lalu lintas di Jalan Pulau Nias Selatan dan Jalan Pulau Sebira selama 2 minggu pengamatan, terdapat perbedaan signifikan pada intensitas kendaraan yang melintas di kedua lokasi tersebut. Jalan Pulau Nias Selatan menunjukkan angka kepadatan lalu lintas yang jauh lebih tinggi dengan rata-rata 550,92 kendaraan per jam, sedangkan Jalan Pulau Sebira hanya memiliki rata-rata 32.25 kendaraan per jam (Grafik 1). Pola fluktuasi kepadatan lalu lintas di kedua lokasi pada Grafik 2 menunjukkan kecenderungan dimana kepadatan tertinggi terjadi pada pagi hari (07.00-10.00) ketika jam berangkat kerja. Kepadatan lalu lintas di kawasan industri membentuk pola dengan puncak di pagi hari saat jam masuk kerja dan sore hari saat jam pulang kerja (Dewapandhu & Pribadi, 2023).



**Grafik 1.** Data Kepadatan Lalu Lintas di Lokasi Penelitian Berdasarkan Hari

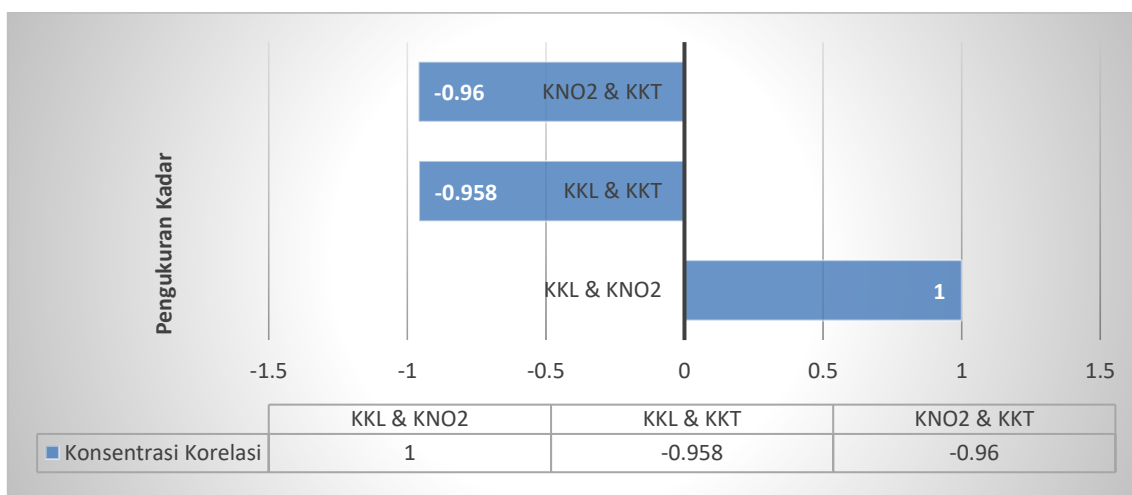


**Grafik 2.** Data Kepadatan Lalu Lintas di Lokasi Penelitian Berdasarkan Waktu Pengamatan

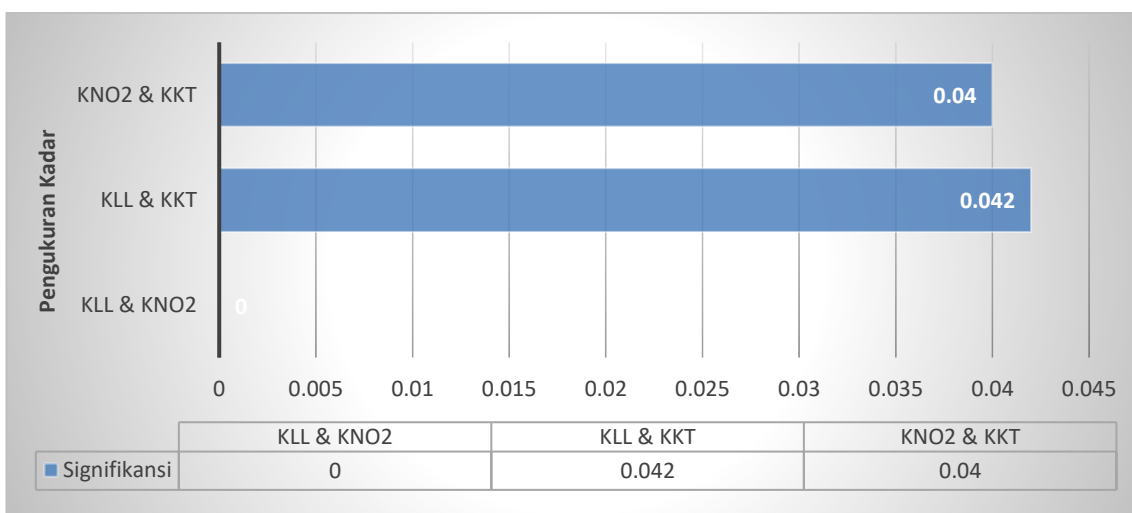
Kadar NO<sub>2</sub> dan klorofil pada talus liken yang terdapat pada tegakan pohon angšana di Kawasan Industri Medan 2 dianalisis dengan menggunakan alat spektrofotometer. Data hasil pengukuran kadar NO<sub>2</sub> dan klorofil dari tiap spesies liken disajikan dalam Tabel 1. Kemudian dilakukan analisis korelasi Product Moment antar variabel (Grafik 3) dan dilanjutkan dengan uji signifikansi pada SPSS25 (Grafik 4).

**Tabel 1.** Data Kadar Klorofil dan NO<sub>2</sub> Talus Liken pada Tegakan Pohon Angšana

| Nama Spesies Liken           | Kadar Klorofil    |                   |                       | Kadar NO <sub>2</sub> (ppm) |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                              | Klorofil a (mg/L) | Klorofil b (mg/L) | Klorofil Total (mg/L) |                             |
| <i>Lepraria incana</i> (LN1) | 2,45              | 1,32              | 3,77                  | 4,926412                    |
| <i>Dirinaria picta</i> (LN2) | 2,67              | 1,22              | 3,89                  | 4,902780                    |
| <i>Lepraria incana</i> (LS1) | 2,78              | 1,37              | 4,15                  | 0,042758                    |
| <i>Dirinaria picta</i> (LS2) | 2,64              | 1,47              | 4,11                  | 0,084748                    |



**Grafik 3.** Analisis Korelasi Product Moment



**Grafik 4.** Uji Signifikansi pada SPSS25







Hasil penelitian ini mengungkapkan adanya korelasi yang kuat antara kepadatan lalu lintas di Kawasan Industri Medan 2 dengan kadar NO<sub>2</sub> pada talus liken (KLL & KNO<sub>2</sub>), dengan nilai korelasi Pearson  $r = 1,000$  ( $p < 0,01$ ). Temuan ini mengindikasikan bahwa tingginya volume kendaraan bermotor, terutama di Jalan Pulau Nias Selatan, secara signifikan meningkatkan akumulasi NO<sub>2</sub> pada talus liken. Kadar NO<sub>2</sub> pada liken di lokasi dengan kepadatan lalu lintas tinggi mencapai 4,926412 ppm

pada *Lepraria incana*, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi kepadatan rendah yang hanya 0,042758 ppm. Hasil ini sejalan dengan penelitian Gombert et al. (2004) yang menemukan akumulasi NO<sub>2</sub> pada talus liken meningkat signifikan pada lokasi dengan kepadatan lalu lintas >10.000 kendaraan per hari. Mardiani et al. (2024) juga mengkonfirmasi bahwa peningkatan lalu lintas berkorelasi dengan penurunan keberadaan lumut dan kualitas udara. Tingginya kadar NO<sub>2</sub> pada lokasi dengan kepadatan lalu lintas tinggi menunjukkan bahwa emisi kendaraan bermotor merupakan kontributor utama pencemaran nitrogen di kawasan industri.

Analisis korelasi antara kepadatan lalu lintas dan kadar klorofil total pada talus liken (KLL & KKT) menghasilkan korelasi negatif yang kuat ( $r = -0,958$ ;  $p < 0,05$ ), mengindikasikan bahwa polusi udara dari kendaraan bermotor berdampak negatif terhadap proses fisiologis liken. Penurunan kadar klorofil pada *Lepraria incana* (9,2%) dan *Dirinaria picta* (5,4%) di lokasi kepadatan lalu lintas tinggi menunjukkan respons yang berbeda terhadap stres lingkungan. Hasil ini memperkuat temuan Garty et al. (1997) yang mendemonstrasikan bahwa paparan polutan udara dapat menginduksi peroksidasi lipid pada membran tilakoid kloroplas, menyebabkan degradasi pigmen fotosintesis. Bačkor et al. (2009) lebih lanjut menjelaskan bahwa akumulasi NO<sub>2</sub> mengganggu aktivitas enzim dalam jalur biosintesis klorofil. Perbedaan respons antara kedua spesies liken dalam penelitian ini menunjukkan variasi mekanisme adaptasi terhadap polutan, seperti yang dikemukakan oleh Bargagli dan Mikhailova (2018).

Korelasi negatif yang kuat antara kadar NO<sub>2</sub> dan kadar klorofil (KNO<sub>2</sub> & KKT) ( $r = -0,960$ ;  $p < 0,05$ ) memberikan bukti empiris dampak toksik NO<sub>2</sub> terhadap sistem fotosintesis liken. Spesies dengan kadar NO<sub>2</sub> tertinggi (*Lepraria incana* di Jalan Pulau Nias Selatan) menunjukkan kadar klorofil terendah, sesuai dengan penelitian Conti dan Cecchetti (2001) yang melaporkan kerusakan pada struktur kloroplas dalam fotobion liken akibat paparan NO<sub>2</sub> jangka panjang. Menariknya, penurunan kadar klorofil (5-9%) tidak proporsional dengan peningkatan kadar NO<sub>2</sub> (>100 kali lipat), menunjukkan adanya mekanisme hormesis seperti yang dijelaskan oleh Paoli et al. (2015), dimana liken dapat meningkatkan produksi klorofil b sebagai adaptasi terhadap stres lingkungan. Fenomena ini memperkaya pemahaman tentang respons fisiologis liken terhadap gradien polusi udara yang berbeda.

Distribusi dan karakteristik liken pada kedua lokasi penelitian menunjukkan perbedaan yang signifikan, mencerminkan respons adaptif terhadap tingkat polusi. Hasil identifikasi pada 55 dan 35 tegakan pohon Angsana di Jl. Pulau Nias Selatan dan Jl. Pulau Sebira, terdapat enam spesies liken yang teridentifikasi (Gambar 1) sebagai berikut.

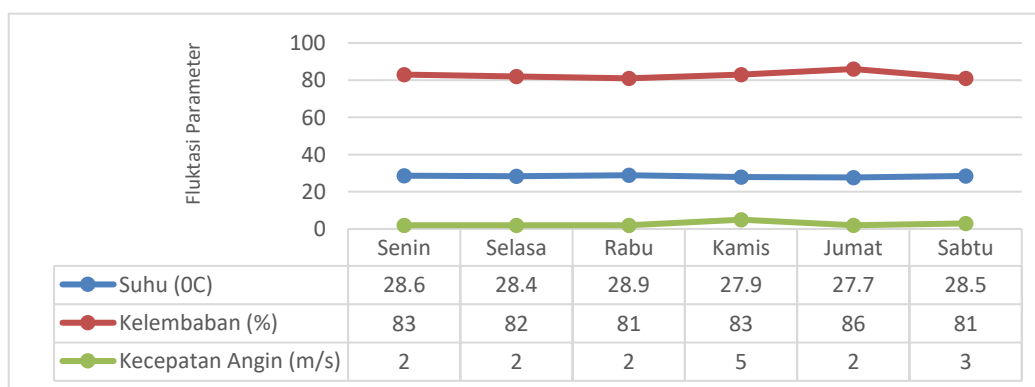
|   |   |   |
|---|---|---|
|  |  |  |
| <i>Lepraria incana</i>  | <i>Dirinaria picta</i>  | <i>Parmelia caperata</i>  |
|  |  |  |
| <i>Melanelixia subaurifera</i>  | <i>Chrysothrix</i> sp.  | <i>Phaeophyscia hispidula</i>   |

**Gambar 1.** Liken yang Teridentifikasi pada Tegakan Pohon Angsana di Kedua Lokasi Penelitian

*Chrysothrix* sp. hanya ditemukan di lokasi dengan kepadatan lalu lintas tinggi, menunjukkan toleransi khusus terhadap polutan nitrogen. Temuan ini konsisten dengan penelitian Aptroot dan Van Herk (2007) yang melaporkan bahwa beberapa spesies dari genus *Chrysothrix* memiliki toleransi tinggi terhadap nitrogen oksida. Menurut Hauck (2010), mekanisme toleransi ini melibatkan kemampuan mengasimilasi nitrogen tambahan dalam metabolisme dan mengubahnya menjadi senyawa yang kurang toksik. Sebaliknya, luas tutupan *Flavoparmelia caperata* dan *Melanelixia subaurifera* yang signifikan lebih rendah di lokasi kepadatan lalu lintas tinggi mengkonfirmasi sifat sensitifnya sebagai bioindikator udara, mendukung penelitian Munzi *et al.* (2010) yang mengklasifikasi kedua spesies ini sebagai liken sensitif terhadap NO<sub>2</sub>.

*Phaeophyscia hispidula* menunjukkan adaptabilitas luar biasa dengan luas tutupan tertinggi di lokasi kepadatan lalu lintas tinggi (768,5 cm<sup>2</sup>), berbeda dengan mayoritas spesies liken lainnya. Temuan ini konsisten dengan penelitian Gombert *et al.* (2003) yang menjelaskan bahwa beberapa spesies dari genus *Phaeophyscia* dapat beradaptasi dengan baik terhadap lingkungan urban yang terpolusi berkat kemampuannya mengasimilasi nitrogen dalam jumlah lebih tinggi untuk pertumbuhan. Davies *et al.* (2007) mengkonfirmasi bahwa beberapa liken, termasuk dari genus *Phaeophyscia*, menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik pada konsentrasi nitrogen yang lebih tinggi. Penelitian ini menambahkan bukti empiris tentang variasi respons ekofisiologis liken terhadap polutan udara, menggarisbawahi kompleksitas interaksi antara polutan, kondisi lingkungan, dan adaptasi spesies.

Parameter fisika-kimia lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan kecepatan angin relatif stabil di kedua lokasi penelitian, sehingga pengaruhnya terhadap distribusi dan kondisi liken tidak signifikan (Grafik 5). Kecepatan angin yang relatif rendah (1,83-2,16 m/s) mendukung konsentrasi polutan yang lebih tinggi di lokasi penelitian, seperti dikemukakan oleh Çelik dan Kadi (2007) bahwa polutan dapat terakumulasi akibat kecepatan angin yang lambat. Kelembaban udara yang tinggi (80,3-82,6%) juga mendukung konsentrasi NO<sub>2</sub> yang lebih tinggi, sesuai dengan penelitian Asrudin *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa tingginya kadar NO<sub>2</sub> dipengaruhi oleh kelembaban udara yang tinggi. Meskipun parameter lingkungan mendukung pertumbuhan liken, kombinasi kelembaban tinggi dan kecepatan angin rendah berkontribusi pada peningkatan paparan polutan udara terhadap liken.



**Grafik 5.** Fluktuasi Parameter Lingkungan di Lokasi Penelitian

Liken memiliki tingkat kepekaan yang berbeda terhadap polutan, liken yang toleran akan bertahan hidup pada lingkungan dengan tingkat polutan yang tinggi dibandingkan dengan spesies yang sensitif (Kuldeep & Prodyut, 2015). Tidak semua spesies liken yang tergolong toleran dapat bertahan hidup pada lingkungan dengan polusi tinggi, dimana perbedaan sensitifitas ini sangat berguna dalam menentukan tingkat polusi udara pada suatu lingkungan (Muslim dan Hasairin, 2018; Kurniasih *et al.*, 2020). Penelitian Madjeni *et al.*, (2019) bahwa tingkat polusi udara dari aktivitas kendaraan bermotor dapat menurunkan keanekaragaman liken. Penelitian lain dilakukan oleh Mardiani *et al.*, (2024) menunjukkan bahwa liken efektif digunakan untuk biomonitoring pencemaran NO<sub>2</sub>, karena peningkatan

lalu lintas berkorelasi dengan penurunan keberadaan lumut dan kualitas udara. Secara keseluruhan, lumut kerak terbukti sebagai indikator yang mampu merefleksikan tingkat pencemaran NO<sub>2</sub> di lingkungan perkotaan, dengan sensitivitas terhadap perubahan tingkat polusi yang diamati melalui penurunan jumlah dan keberagaman lumut.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan peran penting liken sebagai bioindikator pencemaran udara di Kawasan Industri Medan 2. Berdasarkan penelitian, teridentifikasi enam spesies liken dari lima famili dengan dua tipe talus yang berbeda pada tegakan pohon angsa (*Pterocarpus indicus*). Hasil analisis menunjukkan adanya korelasi positif yang sangat kuat antara kepadatan lalu lintas dengan kadar nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) pada talus liken, yang mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas transportasi di kawasan industri berkontribusi signifikan terhadap akumulasi polutan udara. Ditemukan juga korelasi negatif yang kuat antara kepadatan lalu lintas dengan kadar klorofil total pada talus liken, serta korelasi negatif signifikan antara kadar NO<sub>2</sub> dengan kadar klorofil total. Temuan ini membuktikan bahwa polusi udara yang berasal dari kendaraan bermotor berpengaruh terhadap degradasi klorofil pada talus liken, yang mengakibatkan gangguan proses fotosintesis. Penelitian ini memperkuat bukti ilmiah bahwa liken merupakan bioindikator yang efektif dalam mendeteksi pencemaran udara, khususnya dari polutan NO<sub>2</sub> di kawasan industri yang memiliki tingkat kepadatan lalu lintas berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agnan, Y., Probst, A., & Séjalon-Delmas, N. (2017). Evaluation of lichen species resistance to atmospheric metal pollution by coupling diversity and bioaccumulation approaches: A new bioindication scale for French forested areas. *Ecological Indicators*, 27, 99-110.
- Ananda, T. T., Kaswinarni, F., & Rachmawati, R. C. (2023). Keaneekaragaman jenis lichenes sebagai bioindikator kualitas udara di objek wisata Wono Sreni Indah Kota Jepara. *JITEK (Jurnal Ilmiah Teknosains)*, 9(2), 39-44.
- Anggraini, F. J., Oktapiani, R. R., Ilfan, F., & Rodhiyah, Z. (2021). Lichen sebagai bioindikator pencemaran udara di gerbang kota (gateway) Kota Jambi. *Jurnal Daur Lingkungan*, 4(1), 6-11.
- Aptroot, A., & van Herk, C. M. (2007). Further evidence of the effects of global warming on lichens, particularly those with *Trentepohlia phycobionts*. *Environmental Pollution*, 146(2), 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.018>
- Asrudin, N., Assiddieq, M., & Rosdiana, R. (2023). Analisis nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) terhadap penurunan kualitas udara ambien: Studi kasus: Desa Puuruy, Kecamatan Morosi, Kabupaten Konawe, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal TELUK: Teknik Lingkungan UM Kendari*, 3(1), 022-026.
- Bačkor, M., Klejdus, B., Vantová, I., & Kováčik, J. (2009). Physiological adaptations in the lichens *Peltigera rufescens* and *Cladonia arbuscula* var. *mitis*, and the moss *Racomitrium lanuginosum* to copper-rich substrate. *Chemosphere*, 76(10), 1340-1343.
- Bargagli, R., & Mikhailova, I. (2018). Accumulation of inorganic contaminants. In P. L. Nimis, C. Scheidegger, & P. A. Wolseley (Eds.), *Monitoring with lichens - monitoring lichens* (pp. 65-84). Kluwer Academic Publishers.
- Çelik, M. B., & Kadi, I. (2007). The relation between meteorological factors and pollutants concentrations in Karabük city. *Gazi University Journal of Science*, 20(4), 87-95.
- Conti, M. E., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: Lichens as bioindicators of air pollution assessment—A review. *Environmental Pollution*, 114(3), 471-492.
- Davies, L., Bates, J. W., Bell, J. N. B., James, P. W., & Purvis, O. W. (2007). Diversity and sensitivity of epiphytes to oxides of nitrogen in London. *Environmental Pollution*, 146(2), 299-310.
- Dewapandhu, B. A., & Pribadi, A. (2023). analisis penyebaran gas nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) di Jalan Raya Dramaga–Ciampea Kabupaten Bogor dengan menggunakan Model Caline-4. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(1), 67-76.

- Diskominfo Medan. (2022). *Jaga kualitas udara agar tetap bersih, DLH Kota Medan secara rutin melakukan uji emisi gas buang kendaraan bermotor dan memasang alat AQMS.* <https://portal.medan.go.id/berita/jaga-kualitas-udara-agar-tetap-bersih-dlh-kota-medan-secara-rutin-melakukan-uji-emisi-gas-buang-kendaraan-bermotor-dan-memasang-alat-aqmsread2171.html>
- Faisal, M. (2016). Identifikasi jenis-jenis lichenes sebagai indikator pencemaran udara asap kendaraan bermotor di hutan lindung Aek Nauli-Parapat Kab. Simalungun. *Jurnal Biosains*, 2(1).
- Garty, J., Cohen, Y., Kloog, N., & Karnieli, A. (1997). Effects of air pollution on cell membrane integrity, spectral reflectance and metal and sulfur concentrations in lichens. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(7), 1396-1402.
- Gombert, S., Asta, J., & Seaward, M. R. D. (2004). Assessment of lichen diversity by index of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). *Science of the Total Environment*, 324(1-3), 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.036>
- Hariz, A. R., Purwanto, P., & Suherman, S. (2018). Pengembangan kawasan industri ramah lingkungan sebagai upaya untuk menjaga keseimbangan ekosistem (Studi kasus di Taman Industri BSB Semarang). *Al-Hayat: Journal of Biology and Applied Biology*, 1(1), 58-65.
- Harpad, B., Salmon, S., & Saputra, R. M. (2022). Sistem monitoring kualitas udara di kawasan industri dengan NODEMCU ESP32 Berbasis IoT. *Jurnal Informatika Wicida*, 12(2), 39-47.
- Hartanto, N., Mauliya, D. J., Al fath'qi, R. R., Julpa, I. S., Fariz, T. R., Haris, A., & Jabbar, A. (2024). Kajian konsentrasi nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) dan sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) di Pulau Kalimantan menggunakan Google Earth Engine. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 16(1).
- Hasairin, A., & Siregar, R. (2018). Deteksi kandungan gas karbon monoksida (CO) hubungan dengan kepadatan lalu-lintas di Medan Sunggal, Kota Medan. *Jurnal Biosains Unimed*, 4(1), 62-68.
- Hasairin, A., Hartono, A., & Siregar, R. (2023). Characterization of lichens in rocks (saxicolous) in the Bukit Barisan Forest Park, Tongkoh, Karo District, Indonesia. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 21(1), 221-235.
- Hasairin, A., Pasaribu, N., Sudirman, L. I., & Widhiastuti, R. (2015). Accumulation of lead (Pb) in the talus lichenes contained in mahogany tree stands of Roadside of Medan City. *Environment and Pollution*, 4(1), 19.
- Hauck, M. (2010). Ammonium and nitrate tolerance in lichens. *Environmental Pollution*, 158(5), 1127-1133.
- IQAir. (2024). *Live most polluted major city ranking.* <https://www.iqair.com/world-air-quality-ranking>
- Khoerurrahmah, A., Alphabeni, A., Aulia, C. S., & Supriyatna, A. (2024). Identifikasi Lumut Kerak (Lichen) sebagai bioindikator pencemaran udara di area kampus Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati. *Konstanta: Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 2(3), 37-47.
- Kuldeep, S., & Prodyut, B. (2015). Lichen as a bio-indicator tool for assessment of climate and air pollution vulnerability. *Int. Res. J. Environ. Sci*, 4, 107-117.
- Kurniasih, S., Munarti, M., Prasaja, D., & Lestari, A. A. (2020). Potensi liken sebagai bioindikator kualitas udara di kawasan Sentul Bogor. *Jurnal Penelitian Ekosistem Dipterokarpa*, 6(1), 17-24.
- Laelasari, I. (2021). Morfologi tipe talus lichen sebagai bioindikator pencemaran udara di Kudus. *BIOMA: Jurnal Biologi dan Pembelajarannya*, 3(1), 36-42.
- Madjeni, H. D., & Bullu, N. I. (2019). Keanekaragaman lumut kerak (lichen) sebagai bioindikator pencemaran udara di Taman Wisata Alam Camplong Kabupaten Kupang. *Indigenous Biologi: Jurnal Pendidikan dan Sains Biologi*, 2(2), 65-72.
- Mardiani, T., Khoiron, N., & Meilinda, M. (2024). The utilization of lichen as biomonitoring NO<sub>2</sub> Gas Emission in The City of Palembang. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 17(2), 278-285.

- Munzi, S., Pisani, T., Paoli, L., & Loppi, S. (2010). Time-and dose-dependency of the effects of nitrogen pollution on lichens. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(7), 1785-1788.
- Muslim, & Hasairin, A. (2018). Eksplorasi lichenes pada tegakan pohon di area Taman Margasatwa (Medan Zoo) Simalingkar Medan Sumatera Utara. *Jurnal Biosains*, 4(3), 145-153. <https://doi.org/10.24114/jbio.v4i3.9715>
- Paoli, L., Munzi, S., Guttová, A., Senko, D., Sardella, G., & Loppi, S. (2015). Lichens as suitable indicators of the biological effects of atmospheric pollutants around a municipal solid waste incinerator (S Italy). *Ecological Indicators*, 52, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.018>
- Peraturan Pemerintah RI Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021).
- Prayudha, J., Pranata, A., & Al Hafiz, A. (2018). Implementasi metode fuzzy logic untuk sistem pengukuran kualitas udara di Kota Medan berbasis Internet of Things (IoT). *JURTEKSI (Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi)*, 4(2), 141-148.
- Raimundo, C. W., Ferreira, D. C., Anhô, A. C. B. M., & Senhuk, A. P. M. D. S. (2021). The use of *Parmotrema tinctorum* (Parmeliaceae) as a bioindicator of air pollution. *Rodriguésia*, 72, e01872019.
- Rasyidah, R. (2018). Kelimpahan Lumut Kerak (Lichens) sebagai bioindikator kualitas udara di kawasan perkotaan Kota Medan. *Klorofil*, 1(2), 88-92. <http://dx.doi.org/10.30821/kfl:jibt.v1i2.1601>
- Rohim, R., Musthofa, M. H., Noerdin, I., & Supriatna, A. (2024). Morfologi tipe thalus lichen sebagai bioindikator pencemaran udara di Taman Bundaran Cibiru Desa Cipadung Kecamatan Cibiru Kota Bandung. *Polygon: Jurnal Ilmu Komputer dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 2(4), 96-104.
- Roziaty, E., Sutarno, S., Suntoro, S., & Sugiyarto, S. (2023). The effects of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> fumigation on the chlorophyll of *Parmotrema perlatum* from Mt. Lawu, Cemoro Sewu, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(5).
- Safira, M. C., Fauzan, A., & Adhiwibawa, M. A. S. (2022). Interpolasi polutan nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) dengan pendekatan ordinary kriging dan inverse distance weighted (Studi Kasus di Kota Yogyakarta). *Jurnal Aplikasi Statistika & Komputasi Statistik*, 14(2), 55-66.
- Winatama, D., Widayat, W., & Syafrudin, S. (2023). Analisis kualitas udara pada kawasan transportasi, industri, perkotaan, permukiman, dan perdagangan di Kota Tegal. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(2), 381-386.
- World Health Organization (WHO). (2024). *Air pollution*. <https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab 2>
- World Health Organization (WHO). (2024). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)