

**BIOMONITORING PENCEMARAN UDARA DI AREA MELIPONIKULTUR
Heterotrigona itama MELALUI ANALISIS SARANG, FUNGSI POLEN,
KUALITAS MADU, DAN DETEKSI MIKROPLASTIK**

DISERTASI

**Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Doktor**



**ANANG KADARSAH
NIM. 2141213310005**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT**

2025

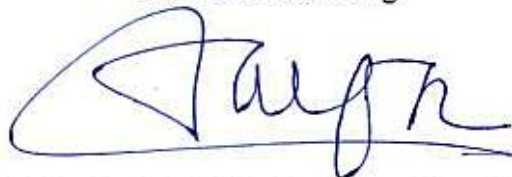
LEMBAR PENGESAHAN

Judul Disertasi : **Biomonitoring Pencemaran Udara di Area Meliponikultur *Heterotrigona itama* Melalui Analisis Sarang, Fungsi Polen, Kualitas Madu, dan Deteksi Mikroplastik**

Nama : Anang Kadarsah

NIM : 2141213310005

disetujui,
Komisi Pembimbing



Prof. Dr. H. Aminuddin Prahatama Putra, M.Pd.
Ketua



Anni Nurliani, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Anggota I



Prof. Dr. Eko Suhartono, Drs., M.Si.
Anggota II

Diketahui,

Direktur Pascasarjana ULM



Prof. Dr. Danang Biyatmoko, M.Si.

Koordinator Prodi S3



Dr. Isnasyauqiah, S.T., M.T.

Tanggal Lulus:
15 Mei 2025

Tanggal Wisuda:

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI DISERTASI

JUDUL DISERTASI:

**BIOMONITORING PENCEMARAN UDARA DI AREA
MELIPONIKULTUR *Heterotrigona itama* MELALUI ANALISIS SARANG,
FUNGSI POLEN, KUALITAS MADU, DAN DETEKSI MIKROPLASTIK**

Nama : Anang Kadarsah
NIM : 2141213310005
Program Studi : Program Doktor Ilmu Lingkungan

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Prof. Dr. Aminuddin Prahatama Putra, M.Pd
Anggota : Anni Nurliani, S.Si.,M.Sc.,Ph.D.
Anggota : Prof. Dr. Eko Suhartono, Drs., M.Si.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Samharinto, SU
Dosen Penguji 2 : Dr. Drs. Dharmono, M.Si.
Dosen Penguji 3 : Dr. Ir. Trisnu Satriadi, S.Hut., M.Si.
Dosen Penguji Tamu : Dr. drh. Tri Wulandari Kesetyaningsih, M.Kes.

Tanggal Ujian Tertutup : 16 April 2025
Tanggal Ujian Terbuka : 15 Mei 2025
SK Penguji : 72.1/UN8.4/DT.04.03/2025

PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Anang Kadarsah
NIM : 2141213310005
Program Studi : Ilmu Lingkungan
Fakultas : Program Pascasarjana
Perguruan Tinggi : Universitas Lambung Mangkurat
Judul Disertasi : **“Biomonitoring Pencemaran Udara di Area Meliponikultur *Heterotrigona itama* Melalui Analisis Sarang, Fungsi Polen, Kualitas Madu, dan Deteksi Mikroplastik”**

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dicantumkan sebagai kutipan/acuan dalam naskah dengan disebutkan sumber kutipan/ acuan dan dicantumkan dalam daftar Pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan Disertasi ini hasil jiplakan, plagiasi maupun manipulasi, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sehat dan tanpa paksaan dari siapapun.

Banjarmasin, 15 Mei 2025
Yang membuat



Anang Kadarsah
NIM 2141213310005

LEMBAR PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, disertasi ini saya dedikasikan kepada:

Keluarga tercinta – *Ibunda saya, Ema Asih, semoga Allah senantiasa menjaga beliau; Bapak Usman rahimahullah, istri saya : Sry Suraty Indriastuty,S.Pd., serta anak-anak saya : Abdul Wahhab, Asiyah, Athiyyah Al Haura, Ibrahim Abdillah, dan Amatullah Hindun, yang selalu mendoakan, mendukung, dan dengan penuh kesabaran menemani setiap langkah perjalanan akademik ini.*

Para pembimbing – *Bapak Prof. Dr. H. Aminuddin Prahatama Putra, M.Pd., sebagai pembimbing utama, serta Ibu Anni Nurliani, Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. Eko Suhartono, sebagai pembimbing pendamping, yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan berharga dalam setiap tahap penelitian ini.*

Seluruh dosen dan staf akademik FMIPA ULM – *Terima kasih kepada dosen-dosen Jurusan Biologi yang telah membagikan ilmunya. Juga kepada tim penguji internal ULM : Prof. Dr. Samharinto, Dr. Dharmono, M.Si., dan Dr. Ir. Trisnu Satriadi, S.Hut., M.Si., dan Dosen Penguji Tamu : Ibu Dr. drh. Tri Wulandari Kesetyaningsih, M.Kes. atas masukan berharga dalam penyempurnaan disertasi.*

Rekan-rekan peneliti dan mahasiswa Biologi FMIPA ULM – *Bapak Achmad Ridho, Bapak Sapruddin, Bapak Khairil Anwar, Bapak Ozi, Bapak Kadis, Siti Rezaqina Kamilya, Novilia Ulanda, Siti Afifah, dan Nadia Nurjannah serta semua pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam berbagai bentuk selama proses penyelesaian disertasi ini.*

Semoga segala kebaikan yang diberikan mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah Subhanahu wata`ala.

RIWAYAT HIDUP PENULIS

Anang Kadarsah, lahir di Ciamis, Jawa Barat pada 14 Oktober 1978, merupakan anak keenam dari enam bersaudara, anak dari Bapak Usman Wiradinata dan Ibu Asih. Bersekolah di SDN Jungga Kabupaten Ciamis, Jawa Barat lulus tahun 1991 kemudian lanjut ke SMPN 2 Panawangan, Kabupaten Ciamis, Jawa Barat lulus tahun 1994 dan meneruskan ke SMAN 2 Tasikmalaya, Jawa Barat dan lulus tahun 1997. Meneruskan pendidikan Sarjana di Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) Purwokerto, Jawa Tengah dan lulus pada tahun 2002. Melanjutkan pendidikan Magister Biologi di Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati (SITH) - Institut Teknologi Bandung (ITB), Jawa Barat dan lulus pada tahun 2012. Melanjutkan pendidikan Doktor Ilmu Lingkungan di Program Pascasarjana – Universitas Lambung Mangkurat (ULM), Kalimantan Selatan dan lulus pada tahun 2025. Menikah dengan Sry Suryati Indriastuty, S.Pd. dan Alhamdulillah dikaruniai lima orang anak. Pengalaman kerja sejak tahun 2005 - sekarang sebagai pengajar di Program Studi Biologi - Fakultas MIPA - Universitas Lambung Mangkurat (ULM).

Banjarmasin, 15 Mei 2025



Anang Kadarsah

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Aminuddin Prahatama Putra, M.Pd, selaku promotor, Ibu Anni Nurliani, S.Si.,M.Sc.,Ph.D., selaku ko-promotor 1 dan Bapak Prof. Dr. Eko Suhartono, Drs., M.Si, selaku ko-promotor 2 yang telah membimbing sampai penulis bisa menyelesaikan disertasi ini.
2. Koordinator dan Sekretaris serta seluruh staff Program studi Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Lambung Mangkurat.
3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lambung Mangkurat dan seluruh staf Program Pascasarjana Universitas Lambung Mangkurat
4. Bapak Rektor Universitas Lambung Mangkurat, Bapak Dekan Fakultas dan Bapak Ketua Program Studi Universitas Lambung Mangkurat.
5. Rekan-rekan teman kerja di Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lambung Mangkurat. Terutama kepada Dr.Witiyasti Imaningsih, Dr. Muhamat, Prof.Dr.Heri Budi Santoso, Dr. Badruzsaufari, Dr. Krisdianto, dan Sasi Gendro Sari, M.Sc.
6. Rekan-rekan Program Doktor Ilmu Lingkungan ULM angkatan 2021 yang telah memberi bantuan dan dorongan motivasi agar disertasi ini segera diselesaikan.
7. Terima kasih yang dalam penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, istri serta seluruh keluarga atas doa-doa serta dukungan yang telah diberikan.

Banjarmasin, Mei 2025



Penulis

RINGKASAN

Anang Kadarsah. NIM. 2141213310005. 2025. Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana. Biomonitoring Pencemaran Udara di Area Meliponikultur *Heterotrigona itama* Melalui Analisis Sarang, Fungsi Polen, Kualitas Madu, dan Deteksi Mikroplastik. Pembimbing : Prof. Dr. H. Aminuddin Prahatama Putra, M.Pd.; Anni Nurliani, S.Si., M.Sc., Ph.D; Prof. Dr. Drs. Eko Suhartono, M.Si.

Perubahan lingkungan global, termasuk pencemaran udara dan mikroplastik, telah mengancam keberlanjutan ekosistem, keamanan pangan, dan kesehatan manusia. Sebagai penyerbuk utama dan penghasil madu berkualitas tinggi, lebah kelulut (*Heterotrigona itama*) tidak hanya berperan penting dalam meliponikultur tetapi juga berpotensi sebagai bioindikator sensitif untuk memantau dampak pencemaran udara. Penelitian ini mendesak dilakukan karena minimnya studi tentang respons biologis lebah kelulut terhadap polusi, padahal praktik meliponikultur semakin meluas di Indonesia. Manfaat penelitian mencakup pengembangan metode biomonitoring berbasis lebah, penyediaan data ilmiah untuk kebijakan lingkungan, serta peningkatan kesadaran masyarakat tentang hubungan antara kualitas udara, kesehatan lebah, dan keamanan produk madu.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis struktur sarang dan morfologi *Heterotrigona itama* sebagai indikator dampak pencemaran udara di area meliponikultur; (2) mengidentifikasi keragaman polen sebagai penanda ketersediaan pakan dan tekanan lingkungan; (3) menilai pengaruh polusi terhadap kualitas madu melalui parameter fisikokimia dan nutrisi; serta (4) mendeteksi mikroplastik dalam produk lebah untuk mengevaluasi risiko pencemaran plastik. Dengan pendekatan multidisiplin, penelitian ini diharapkan dapat menyediakan rekomendasi strategis bagi pelestarian lebah kelulut, praktik meliponikultur berkelanjutan, dan perlindungan lingkungan.

Hasil penelitian dampak pencemaran udara pada lebah kelulut terkait **Struktur Sarang** dan adaptasi morfologi mengungkapkan perbedaan signifikan struktur sarang *Heterotrigona itama* berdasarkan tingkat pencemaran. Di daerah urban, sarang menunjukkan adaptasi stres dengan volume lebih kecil ($<2000 \text{ cm}^3$), pintu masuk sempit berbentuk corong ($1.38 \pm 0.20 \text{ cm}$), dan ketebalan involukrum menipis (2.3-3.0 mm). Sebaliknya, sarang di daerah rural memiliki ukuran optimal ($>6000 \text{ cm}^3$) dengan pintu masuk tabung lebar ($1.99 \pm 0.35 \text{ cm}$) dan ketebalan involukrum bervariasi (1.0-3.7 mm). Perbedaan ini juga terlihat pada morfologi lebah pekerja, dimana spesimen urban berukuran lebih kecil (6.50 mm) dengan sayap menyempit dibanding rural (7.11 mm). **Perubahan Komposisi Polen.** Analisis polen menunjukkan gradasi kualitas habitat yang jelas. Daerah urban didominasi Asteraceae (42.9%) terutama *Ageratum conyzoides* dengan indeks keanekaragaman rendah (Shannon 1.2), sementara rural menunjukkan keragaman tinggi (indeks 2.8) dengan dominasi Araceae (51.6%) dan Fabaceae (28.8%). Pola transisi terlihat di semi-urban dengan dominasi Araceae (57.6%). Temuan ini mengindikasikan bahwa polusi udara mengurangi diversitas sumber pakan dan mengubah preferensi lebah terhadap spesies tumbuhan toleran polusi. **Dampak pada Kualitas Madu.** Parameter kualitas madu menunjukkan beberapa penyimpangan dari standar SNI. Kadar air melebihi batas (26.5-32% vs 22%) dengan fluktuasi gula pereduksi yang ekstrim (16.04-54.01%). Analisis statistik

menunjukkan korelasi negatif signifikan antara TVOC dengan kadar air ($r=-0.632$, $p=0.005$). Namun, hasil positif terlihat pada tidak terdeteksinya logam berat (Pb, Cd <0.001 mg/kg) dan potensi antioksidan yang tetap tinggi di semua lokasi penelitian. **Kontaminasi Mikroplastik.** Terungkap ada kontaminasi mikroplastik yang meluas pada produk lebah. Konsentrasi tertinggi ditemukan di urban (118 partikel/100 ml polen) dengan dominasi fiber (80.4%). Yang mengkhawatirkan, kontaminasi juga terdeteksi di daerah rural (47-55 partikel/100 ml madu) dengan ukuran partikel mencapai 154.1 μm . Pola distribusi ini menunjukkan bahwa polusi mikroplastik telah menyebar melalui berbagai mekanisme termasuk deposisi atmosferik dan aktivitas pertanian.

Temuan penelitian ini mengungkap dampak signifikan pencemaran udara terhadap ekosistem meliponikultur *Heterotrigona itama* melalui empat temuan kunci. Pertama, adaptasi morfologi sarang menunjukkan respons stres yang jelas di daerah urban, berupa penyusutan volume sarang (<2000 cm^3), perubahan struktur pintu masuk (corong sempit 1.38 ± 0.20 cm), dan penurunan kapasitas reproduksi (1-2 sel anakan). Kedua, analisis polen mengungkap reduksi keanekaragaman sumber pakan di daerah tercemar (Indeks Shannon Wiener di area urban (1,2) vs area rural (2,8)) dengan pergeseran dominansi ke spesies toleran polusi seperti *Ageratum conyzoides*. Ketiga, kualitas madu menunjukkan penyimpangan parameter fisikokimia, terutama kadar air yang melebihi SNI (26.5-32%) dengan korelasi negatif terhadap TVOC ($r=-0.632$). Keempat, deteksi mikroplastik pada produk lebah (hingga 118 partikel/100 ml) membuktikan kontaminasi telah menyebar hingga daerah rural. Temuan ini memiliki implikasi luas bagi praktik meliponikultur berkelanjutan, menegaskan perlunya pemantauan lingkungan berbasis indikator biologis dan penguatan regulasi keamanan pangan produk lebah tanpa sengat di era antropogenik..

Kata Kunci : biomonitoring, kualitas madu, lebah kelulut, mikroplastik, pencemaran udara

SUMMARY

Anang Kadarsah. NIM. 2141213310005. 2025. Environmental Science Doctoral Study Program, Postgraduate Program. Environmental Health Biomonitoring in *Heterotrigona itama* Meliponiculture Areas Through Nest Analysis, Pollen Function, Honey Quality, and Microplastic Detection. Advisors: Prof. Dr. H. Aminuddin Prahutama Putra, M.Pd .; Anni Nurliani, S.Si., M.Sc., Ph.D; Prof. Dr. Drs. Eko Suhartono, M.Si.

Global environmental changes, including air pollution and microplastics, have threatened ecosystem sustainability, food security, and human health. As primary pollinators and producers of high-quality honey, stingless bees (*Heterotrigona itama*) not only play a crucial role in meliponiculture but also have potential as sensitive bioindicators for monitoring the impacts of air pollution. This research is urgently needed due to the limited studies on the biological responses of stingless bees to pollution, despite the expanding practice of meliponiculture in Indonesia. The study's benefits include developing bee-based biomonitoring methods, providing scientific data for environmental policies, and raising public awareness about the relationship between air quality, bee health, and honey product safety.

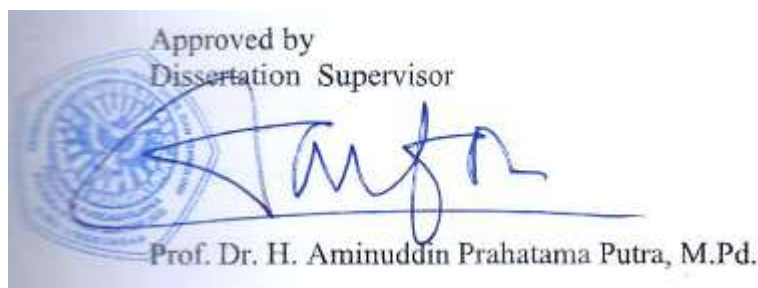
This research aims to: (1) analyze the nest structure and morphology of *Heterotrigona itama* as indicators of air pollution impacts in meliponiculture areas; (2) identify pollen diversity as markers of food availability and environmental stress; (3) assess the effect of pollution on honey quality through physicochemical and nutritional parameters; and (4) detect microplastics in bee products to evaluate plastic pollution risks. Using a multidisciplinary approach, this study is expected to provide strategic recommendations for stingless bee conservation, sustainable meliponiculture practices, and environmental protection.

The research findings on the impact of air pollution on stingless bees regarding **Nest Structure** and morphological adaptation reveal significant differences in *Heterotrigona itama* nest structures based on pollution levels. In urban areas, nests showed stress adaptations with smaller volumes (<2000 cm³), narrow funnel-shaped entrances (1.38±0.20 cm), and thinning involucre (2.3-3.0 mm). In contrast, rural nests had optimal sizes (>6000 cm³) with wide tubular entrances (1.99±0.35 cm) and variable involucre thickness (1.0-3.7 mm). These differences were also evident in worker bee morphology, where urban specimens were smaller (6.50 mm) with narrower wings compared to rural ones (7.11 mm). **Pollen Composition Changes.** Pollen analysis showed clear habitat quality gradation. Urban areas were dominated by Asteraceae (42.9%), particularly *Ageratum conyzoides*, with low diversity (Shannon index 1.2), while rural areas showed high diversity (index 2.8) dominated by Araceae (51.6%) and Fabaceae (28.8%). A transitional pattern was observed in semi-urban areas with Araceae dominance (57.6%). These findings indicate that air pollution reduces food source diversity and shifts bee preferences toward pollution-tolerant plant species. **Impact on Honey Quality.** Honey quality parameters showed some deviations from SNI standards. Water content exceeded limits (26.5-32% vs 22%) with extreme reducing sugar fluctuations (16.04-54.01%). Statistical analysis revealed a significant negative correlation between TVOC and water content ($r=-0.632$, $p=0.005$). However, positive findings included undetectable heavy metals (Pb, Cd

<0.001 mg/kg) and consistently high antioxidant potential across all study sites. **Microplastic Contamination.** The findings revealed widespread microplastic contamination in bee products. The highest concentration was found in urban areas (118 particles/100 ml pollen) dominated by fibers (80.4%). Alarmingly, contamination was also detected in rural areas (47-55 particles/100 ml honey) with particle sizes reaching 154.1 μm . This distribution pattern indicates that microplastic pollution has spread through various mechanisms including atmospheric deposition and agricultural activities.

These research findings reveal the significant impact of air pollution on *Heterotrigena itama* meliponiculture ecosystems through **four key discoveries**. First, nest morphological adaptations showed clear stress responses in urban areas, including nest volume reduction (<2000 cm^3), structural changes in entrances (narrow funnel 1.38 ± 0.20 cm), and decreased reproductive capacity (1-2 brood cells). Second, pollen analysis revealed reduced food source diversity in polluted areas (Shannon index 1.2 urban vs 2.8 rural) with a shift toward pollution-tolerant species like *Ageratum conyzoides*. Third, honey quality showed physicochemical parameter deviations, particularly water content exceeding SNI standards (26.5-32%) with a negative correlation to TVOC ($r = -0.632$). Fourth, microplastic detection in bee products (up to 118 particles/100 ml) proved contamination has spread to rural areas. These findings have broad implications for sustainable meliponiculture practices, emphasizing the need for biological indicator-based environmental monitoring and strengthened regulations for stingless bee product safety in the Anthropocene era.

Keywords: biomonitoring, honey quality, stingless bees, microplastics, air pollution



Approved by
Dissertation Supervisor

Prof. Dr. H. Aminuddin Prahatama Putra, M.Pd.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wata`ala* Rabb Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul *Biomonitoring Pencemaran Udara di Area Meliponikultur Heterotrigona itama Melalui Analisis Sarang, Fungsi Polen, Kualitas Madu, dan Deteksi Mikroplastik* ini dengan baik. Salawat dan salam kepada Nabi Besar Muhammad *Shallallahu Alaihi Wasallam*.

Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar doktor pada bidang yang saya tekuni di Program Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Lambung Mangkurat. Melalui pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian dapat berkontribusi terhadap upaya pelestarian lingkungan, pengembangan metode pemantauan pencemaran, serta peningkatan keberlanjutan praktik meliponikultur.

Saya menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki keterbatasan, sehingga saya terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun guna pengembangan penelitian lebih lanjut. Semoga disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang biomonitoring lingkungan dan meliponikultur yang berkelanjutan.

Akhir kata, saya berharap hasil penelitian ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi akademisi, praktisi, serta pihak-pihak yang berkepentingan dalam upaya pelestarian lingkungan dan peningkatan kualitas produk lebah kelulut.

Banjarmasin, Mei 2025



Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI DISERTASI	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI.....	iv
LEMBAR PERSEMBAHAN.....	v
RIWAYAT HIDUP PENULIS	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	7
1.3. Tujuan Penelitian	8
1.4. Batasan Masalah Penelitian.....	9
1.5. Manfaat Penelitian	10
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1. <i>State of the Art</i> Penelitian.....	11
2.2. <i>Fish Bone</i> Penelitian	12
2.3. Analisis Sarang.....	14
2.3.1. Struktur Sarang Eksternal	14
2.3.2. Pintu Masuk Sarang	17
2.3.3. Struktur Sarang Internal	18
2.3.3.1. <i>Involucrum</i>	18
2.3.3.2. Sel Anakan (<i>Brood Cell</i>).....	20
2.3.3.3. Pot Penyimpanan (Madu dan Polen).....	22
2.3.4. Karakteristik Morfologi	23
2.4. Fungsi Polen.....	25
2.4.1. Karakteristik Polen.....	26

2.4.2. Pola Keragaman Polen	28
2.4.3. Ketersediaan Tumbuhan Sumber Pakan	29
2.5. Kualitas Madu	31
2.5.1. Kualitas Madu Kelulut	31
2.5.2. Indikator Kualitas Udara	34
2.5.3. Pencemaran Udara	36
2.6. Deteksi Mikroplastik	39
2.6.1. Jenis Mikroplastik	39
2.6.2. Sumber Pencemaran Plastik	41
2.6.3. Jalur Perpindahan Sampah Plastik	44
III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN	46
3.1. Landasan Teori	46
3.2. Kerangka Pemikiran	47
3.3. Hipotesis Penelitian	48
3.4. Kerangka Operasional Pelaksanaan Penelitian	49
3.5. Kerangka Analisis Penelitian	50
3.6. Definisi Operasional Variabel dan Pengukuran Variabel	53
3.7. Kebaharuan (<i>Novelty</i>) Penelitian	55
IV. METODOLOGI PENELITIAN	57
4.1. Tempat dan Waktu Penelitian	57
4.1.1. Tempat Penelitian	56
4.1.2. Waktu Penelitian	61
4.2. Metode Penelitian	62
4.2.1. Analisis Sarang sebagai Bioindikator Pencemaran Udara	62
4.2.2. Fungsi Polen sebagai Indikator Tekanan Pencemaran Udara	65
4.2.3. Kualitas Madu Kelulut terhadap Tekanan Pencemaran Udara	68
4.2.4. Deteksi Mikroplastik Sebagai Bukti Pencemaran Udara	71
4.3. Pengumpulan Data	74
4.3.1. Tahap Persiapan	74
4.3.2. Tahap Pelaksanaan	77
4.3.3. Tahap Analisis Data	82
4.3.3.1. Analisis Data	82
4.3.3.2. Pengamatan Peubah	88

V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	92
5.1. Analisis Sarang sebagai Bioindikator Pencemaran Udara.....	92
5.1.1. Struktur Sarang.....	92
5.1.1.1. Struktur Sarang Eksternal	92
5.1.1.2. Pintu Masuk Sarang	98
5.1.1.3. Struktur Internal Sarang	105
5.1.1.4. Morfologi Lebah Pekerja	114
5.1.3. Diskusi Komparatif antar Lokasi Meliponikultur	120
5.1.4. Pencemaran Udara di Area Meliponikultur	122
5.1.5. Hubungan Pencemaran Udara dengan Struktur Sarang.....	125
5.2. Fungsi Polen sebagai Indikator Tekanan Pencemaran Udara.....	130
5.2.1. Karakteristik Polen pada Sarang <i>Heterotrigona itama</i>	130
5.2.2. Ketersediaan Sumber Pakan di Area Meliponikultur.....	142
5.2.3. Kesesuaian Polen dalam Sarang dan Ketersediaan Pakan	144
5.2.4. Preferensi Sumber Pakan Lebah Kelulut	145
5.2.5. Tekanan PENCEMARAN Udara Karakteristik Polen.....	148
5.3. Kualitas Madu Kelulut terhadap Tekanan Pencemaran Udara	150
5.3.1. Parameter Fisiko-Kimia	150
5.3.2. Komposisi Gula dan Asam.....	151
5.3.3. Kandungan Bahan pencemar.....	153
5.3.4. Pengaruh Pencemaran Udara terhadap Kualitas Madu Kelulut.....	155
5.4. Deteksi Mikroplastik Sebagai Bukti Pencemaran Udara	157
5.4.1. Identifikasi Bentuk Mikroplastik	157
5.4.2. Jumlah Mikroplastik Pada Produk Lebah	161
5.4.3. Ukuran Diameter Mikroplastik (μm) Pada Madu	168
5.4.4. Rancangan Standar Baku Batas Pencemaran Mikroplastik	169
5.4.5. Hubungan Struktur dengan Fungsi Sarang	171
VI. IMPLIKASI HASIL PENELITIAN	180
6.1.Implikasi Teoritis	180
6.1.1 Analisis Sarang.....	180
6.1.2 Fungsi Polen.....	181
6.1.3. Kualitas Madu	182
6.1.4. Deteksi Mikroplastik.....	183

6.2.Implikasi Praktis.....	184
6.2.1. Struktur Sarang	184
6.2.2. Fungsi Polen.....	184
6.2.3. Kualitas Madu	185
6.2.4. Deteksi Mikroplastik.....	186
VII. PENUTUP	187
7.1. Kesimpulan	187
7.2. Saran.....	188
DAFTAR PUSTAKA	190
LAMPIRAN.....	205
A. Hasil Penelitian	205
B. Prosedur Penelitian.....	225
C. Prosedur Uji.....	231
D. Peraturan Perundangan Yang Diacu Pada Penelitian.....	248
E. Dokumentasi Penelitian	253
E. Publikasi Penelitian	262

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Fisiko-kimia pada Madu Kelulut (SNI 2018).....	32
Tabel 3.1 Landasan teori biomonitoring Pencemaran Udara di area meliponikultur	47
Tabel 4.1 Pemilihan lokasi penelitian biomonitoring Pencemaran Udara.....	58
Tabel 5.1 Perbandingan jenis dan bahan sarang eksternal lebah kelulut (%) ..	95
Tabel 5.2 Perbandingan volume kayu log, topping dan tinggi dari tanah.....	96
Tabel 5.3 Analisis Tukey kayu log, tinggi dari tanah, dan jarak antar sarang .	97
Tabel 5.4 Karakteristik pintu masuk sarang lebah kelulut (<i>Heterotrigona itama</i>)	99
Tabel 5.5 Analisis statistik diameter dan panjang pintu masuk sarang lebah kelulut (<i>Heterotrigona itama</i>)	103
Tabel 5.6 Struktur internal sarang lebah kelulut (<i>Heterotrigona itama</i>).....	110
Tabel 5.7 Uji lanjut perbandingan struktur internal sarang lebah kelulut (<i>Heterotrigona itama</i>)	112
Tabel 5.8 Perbandingan morfometri lebah pekerja	117
Tabel 5.9 Uji <i>Multiple Comparison</i> morfologi lebah pekerja.....	119
Tabel 5.10 Perbandingan spektrum kerentanan lebah di area meliponikultur .	121
Tabel 5.11 Perbandingan lokasi paling terdampak dan paling stabil secara ekologis	122
Tabel 5.12. Perbandingan ciri sarang lebah kelulut: koloni lemah vs. kuat.....	123
Tabel 5.13 Perbandingan indikator kualitas udara di area meliponikultur	125
Tabel 5.14 Perbandingan parameter pencemar udara di area meliponikultur..	126
Tabel 5.15 Korelasi parameter pencemar udara dengan dampak pada struktur sarang dan tingkat tekanan lingkungan	127
Tabel 5.16 Sintesis dampak pencemaran udara dan pintu masuk sarang kelulut.....	129
Tabel 5.17 Pola umum struktur internal sarang lebah kelulut terkait tekanan aktivitas antropogenik.....	130
Tabel 5.18. Pola umum yang muncul dari data kuantitatif morfometri lebah pekerja	132
Tabel 5.19 Bukti visual dan numerik validasi bioindikator: <i>Heterotrigona itama</i>	133

Tabel 5.20 Frekuensi kemunculan (dominansi / persentase) masing-masing jenis polen	134
Tabel 5.21. Perbandingan bentuk unit polen sebagai indikator jenis tanaman asal.....	137
Tabel 5.22 Perbandingan bentuk apertura polen sebagai indikator jenis tanaman asal.....	138
Tabel 5.23 Perbandingan ornamentasi polen sebagai indikator jenis tanaman asal.....	140
Tabel 5.24. Perbandingan ukuran polen sebagai indikator jenis tanaman asal	141
Tabel 5.25 Perhitungan indeks keragaman polen dalam sarang lebah kelulut.	145
Tabel 5.26 Perbandingan jumlah jenis, kerapatan,dan indeks keanekaragaman tumbuhan sumber pakan lebah kelulut	146
Tabel 5.27 Perbandingan spesies dominan dari area meliponikultur.....	147
Tabel 5.28 Indeks kesesuaian jenis polen dan ketersediaan tumbuhan di area meliponikultur	147
Tabel 5.29 Hubungan antara karakteristik polen dan ketersediaan pakan	150
Tabel 5.30. Hubungan tekanan pencemaran udara dan karakteristik polen...	152
Tabel 5.31 Perbandingan parameter fisiko-kimia madu lebah kelulut	154
Tabel 5.32. Perbandingan parameter komposisi gula dan asam dalam madu lebah kelulut	156
Tabel 5.33. Perbandingan parameter bahan pencemar lebah kelulut	157
Tabel 5.34. Pengaruh pencemaran udara terhadap kualitas madu kelulut dan kadar logam berat	159
Tabel 5.35 Bentuk mikroplastik yang ditemukan dari sampel madu, polen dan propolis	162
Tabel 5.36. Perbandingan bentuk dan total partikel mikroplastik pada produk lebah kelulut (partikel/100 ml)- analisis di Laboratorium Anatomi dan Fisiologi FMIPA ULM.....	171
Tabel 5.37. Rancangan standar baku pencemaran mikroplastik pada madu lebah kelulut.....	175

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Perbedaan bentuk sarang lebah bersengat (A) dan lebah kelulut (B) (Saud et al., 2024).....	2
Gambar 1.2 Struktur sarang eksternal kelulut dalam praktik meliponikultur (Koleksi pribadi, 2024)	4
Gambar 1.3 Bentuk pintu masuk sarang lebah kelulut (<i>Heterotrigona itama</i>) A - Pintu masuk berbentuk corong dan B - Pintu masuk melingkar (Kelly et al., 2014).	5
Gambar 1.4 Tata letak Struktur sarang internal lebah kelulut (Monita, 2023)	5
Gambar 1.5 Kerangka konsep penelitian biomonitoring Pencemaran Udara di area meliponikultur <i>Heterotrigona itama</i>	6
Gambar 2.1. <i>State of the art</i> penelitian	11
Gambar 2.2 <i>Fish-bone</i> penelitian	12
Gambar 2.3 Model struktur sarang lebah kelulut dengan sistem topping (Askary et al., 2022).....	15
Gambar 2.4. Bentuk Pintu Masuk Sarang <i>Heterotrigona itama</i> : A. pintu masuk : corong pendek dan besar; B. pintu masuk : corong panjang dan ramping; C. pintu masuk : corong panjang dan besar dan D. pintu masuk : corong panjang dan ramping (Febrianti et al., 2020) ..	18
Gambar 2.5 a. Penampilan Struktur sarang internal lebah kelulut terdiri dari i= involucrem, ii=sel anakan, iii=pot (kantong) madu dan polen (Roubik, 2023). b. Struktur sarang internal lebah kelulut <i>Heterotrigona itama</i> dari lokasi penelitian (koleksi pribadi, 2023)..	19
Gambar 2.6. Diagram sarang meliponini yang umum dijumpai pada pohon berlubang, dan bagian-bagian yang diberi label (Michener, 2007)	20
Gambar 2.7. Posisi sisir anakan (brood cells) pot madu serta polen yang terbuat dari serumen berupa campuran lilin dengan resin dan plat batumen sebagai pelindung (Shanahan & Spivak, 2021).	21
Gambar 2.8 Pot madu dan polen pada sarang kelulut <i>Heterotrigona itama</i> (Sriwahyuni et al., 2023).....	22
Gambar 2.9 Morfologi luar lebah kelulut pekerja (Kwapong et al., 2010).....	23
Gambar 2.10. Bentuk dan aperture polen (Erdtman, 1972)	26

Gambar 2.11. Kehilangan biodiversitas berdampak terhadap keterbatasan sumber bunga, parasit dan patogen serta zat-zat beracun seperti : neonicotinoid, ergosterol-biosynthesis-inhibiting (EBI) fungicides, dan pyrethroids yang menyerang lebah liar maupun lebah yang dipelihara (Goulson et al., 2015).....	30
Gambar 2.12 Sumber dan penyebab pencemaran udara (Swawikanti, 2022)..	33
Gambar 2.13 Pencemaran udara mencegah penyerbuk seperti lebah menemukan bunga (Langford dkk., 2023).....	35
Gambar 2.14 Aliran massa partikel mikroplastik dan potensi konversinya menjadi produk lebah madu dan sarang lainnya (Naggar et al., 2021)	40
Gambar 2.15 Mekanisme akumulasi mikroplastik dalam tubuh lebah (Bashir et al., 2024).....	41
Gambar 2.16 Jalur perpindahan pencemar mikroplastik ke dalam sarang lebah dan produknya (Basaran et al., 2024).....	44
Gambar 3.1 Kerangka pemikiran penelitian	48
Gambar 3.2 Kerangka operasional pelaksanaan penelitian.....	50
Gambar 3.3 Kerangka analisis penelitian.....	52
Gambar 3.4 Definisi operasional variabel dan pengukuran variabel	54
Gambar 4.1 Lokasi penelitian biomonitoring Pencemaran Udara di area meliponikultur	57
Gambar 4.2 Perbandingan jenis lebah kelulut yang dipelihara di area meliponikultur.....	59
Gambar 4.3 Waktu penelitian.....	61
Gambar 4.4 Metode penelitian analisis sarang.....	62
Gambar 4.5 Metode penelitian fungsi polen	67
Gambar 4.6 Metode penelitian kualitas madu.....	69
Gambar 4.7 Alur penelitian untuk deteksi mikroplastik	72
Gambar 4.8 Tahap persiapan penelitian biomonitoring kesehatan lingkungan di area meliponikultur	75
Gambar 4.9 Tahap pelaksanaan penelitian biomonitoring kesehatan lingkungan di area meliponikultur	77
Gambar 4.10 Tahap analisis data penelitian biomonitoring kesehatan	

lingkungan di area meliponikultur	83
Gambar 4.11 Pengamatan peubah penelitian biomonitoring kesehatan lingkungan di area meliponikultur	88
Gambar 5.1. Modifikasi sarang eksternal lebah kelulut dalam sistem toping di wilayah urban dan semi-urban (A,B,C) dan wilayah rural (D,E,F) (Koleksi pribadi, 2024)	93
Gambar 5.2. A. Desain sarang lebah kelulut <i>Heterotrigona itama</i> ; B. Batang kayu atau batang pohon berongga untuk budidaya sarang; C. Penutup atas dari kayu. Skala batang: 5 cm (koleksi pribadi, 2023).	94
Gambar 5.3. Ornamen pintu masuk sarang <i>Heterotrigona itama</i> : A. Pintu masuk berbentuk corong dengan propolis menyebar, B. Bentuk corong dengan propolis seperti tetesan, dan C. bentuk seperti tabung silinder dan tonjolan tidak beraturan. Skala 1 cm (koleksi pribadi, 2023).	99
Gambar 5.4. Perbandingan ukuran pintu masuk sarang lebah kelulut (cm)	101
Gambar 5.5. A1. Penampakan Struktur sarang internal pada koloni super. A1. Sel anakan (brood cell) ; A2 dan B1. Pot penyimpanan makanan (madu dan polen); B2. Batumen atau involucreum yang mengalami penebalan karena berfungsi sebagai alat perlindungan struktur sarang bagian dalam. Skala 1:10 cm (koleksi pribadi, 2023).	105
Gambar 5.6. C1. Involucreum yang berbentuk akar untuk memperkuat sarang internal disebut serumen; D1. Involukrum yang berupa lapisan seperti selimut yang berfungsi sebagai lapisan pelindung pot penyimpanan. Skala 1:10 cm (koleksi pribadi, 2023).	106
Gambar 5.7. Penampakan involucreum sebagai bagian Struktur sarang internal pada koloni lemah (weak colony). E1. Pot madu dan polen di lubang penghubung. Pada F1. Pot madu dan polen dipisahkan. Skala 1:10 cm (koleksi pribadi, 2023).	107
Gambar 5.8. A. Sisir berlapis horizontal sel induk <i>H. itama</i> ; B. Sel induk ditutupi dengan involucreum dan pilar serta telur ratu; C. Telur ratu siap menetas. Skala batang: 5 cm (koleksi pribadi, 2023).	107
Gambar 5.9. Pot penyimpanan madu dan polen dalam sarang lebah kelulut...	108
Gambar 5.10. Ciri morfologi <i>Heterotrigona itama</i> ; A. Tampak samping; B. Dari; C. Sayap depan dan belakang; D. Kaki depan dan kaki	

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Analisis sarang eksternal.....	212
Lampiran 2 Analisis karakteristik morfologi lebah pekerja	216
Lampiran 3 Data fungsi polen sebagai indikator diagnostik	221
Lampiran 4 Hasil uji kualitas madu di Lab. Anatomi dan Fisiologi FMIPA	227
Lampiran 5 Hasil uji kualitas madu di BSPJI Banjarbaru	228
Lampiran 6 Analisis korelasi pencemaran udara dan kualitas madu.....	230
Lampiran 7 Uji deteksi mikroplastik sebagai indikator peringatan dini.....	231
Lampiran 8 Prosedur analisis struktur sarang lebah kelulut	232
Lampiran 9 Prosedur analisis karakteristik morfologi lebah pekerja	233
Lampiran 10 Prosedur pengukuran bahan pencemar udara.....	235
Lampiran 11 Prosedur analisis fungsi polen.....	238
Lampiran 12 Prosedur analisis kualitas madu	239
Lampiran 13 Prosedur analisis mikroplastik	240
Lampiran 14 Prosedur uji struktur sarang lebah kelulut.....	241
Lampiran 15 Prosedur uji karakteristik morfologi lebah pekerja.....	243
Lampiran 16 Prosedur uji parameter kualitas dan pencemaran udara.....	246
Lampiran 17 Prosedur uji fungsi polen.....	247
Lampiran 18 Prosedur uji kualitas madu	249
Lampiran 19 Prosedur uji deteksi mikroplastik.....	256
Lampiran 20 Peraturan perundangan penilaian indeks pencemaran udara.....	260
Lampiran 21 Peraturan yang diacu pada penelitian struktur sarang	261
Lampiran 22 Peraturan yang diacu pada penelitian fungsi polen	262
Lampiran 23 Peraturan yang diacu pada penelitian kualitas madu	263
Lampiran 24 Peraturan yang diacu pada penelitian deteksi mikroplastik	264
Lampiran 25 Profil tampilan masing-masing lokasi meliponikultur	265
Lampiran 26 Dokumentasi pengamatan Pencemaran Udara.....	266
Lampiran 27 Dokumentasi analisis sarang di area meliponikultur.....	269
Lampiran 28 Dokumentasi penelitian karakteristik morfologi di Lab Anatomi dan Fisiologi FMIPA	270
Lampiran 29 Dokumentasi fungsi polen di Lab Anatomi dan Fisiologi	271
Lampiran 30 Dokumentasi kualitas madu di Lab Anatomi dan Fisiologi.....	272
Lampiran 31 Dokumentasi deteksi mikroplastik di Lab Anatomi dan Fisiologi ..	273

Lampiran 32 Publikasi penelitian pada jurnal internasional (Scopus Q4).....	274
Lampiran 33 Publikasi penelitian pada prosiding internasional ICW-SDGs	275