

**ANALISIS ULTRAFINE PARTICLES (UFPs) DAN BLACK
CARBON (BC) DI INDOOR MICROENVIRONMENT
UNIVERSITAS: SUMBER POTENSIAL, FAKTOR INFILTRASI,
EXPOSURE, DAN MACHINE LEARNING MODEL**

SKRIPSI



Oleh :

MOHAMAD SHOLIKIN

NPM. 20034010013

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
SURABAYA
2024**

**ANALISIS ULTRAFINE PARTICLES (UFPs) DAN BLACK
CARBON (BC) DI INDOOR MICROENVIRONMENT
UNIVERSITAS: SUMBER POTENSIAL, FAKTOR INFILTRASI,
EXPOSURE, DAN MACHINE LEARNING MODEL
SKRIPSI**

**Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Fakultas Teknik dan Sains Program Studi Teknik Lingkungan Universitas
Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur**



Oleh:

MOHAMAD SHOLIKIN

NPM. 20034010013

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
SURABAYA**

2024

LEMBAR PERSETUJUAN
ANALISIS ULTRAFINE PARTICLES (UFPs) DAN BLACK
CARBON (BC) DI INDOOR MICROENVIRONMENT
UNIVERSITAS: SUMBER POTENSIAL, FAKTOR INFILTRASI,
EXPOSURE, DAN MACHINE LEARNING MODEL

Disusun Oleh:

MOHAMAD SHOLIKIN
NPM. 20034010013

Telah disetujui untuk mengikuti Ujian Penelitian/Verifikasi Artikel Ilmiah

Menyetujui,

PEMBIMBING 1


PEMBIMBING 2


Firra Rosariawati, S.T. M.T.
NIPPPK. 197504092021212004


Muhammad A. S. Jaywad, S.T. M.Sc.
NIP. 19940727 202406 1001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur


Prof. Dr. Dra. Sariyah, M.P.
NIP. 19650403 199103 2 001

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS ULTRAFINE PARTICLES (UFPs) DAN BLACK
CARBON (BC) DI INDOOR MICROENVIRONMENT
UNIVERSITAS: SUMBER POTENSIAL, FAKTOR INFILTRASI,
EXPOSURE, DAN MACHINE LEARNING MODEL

Disusun Oleh:

MOHAMAD SHOLIKIN
NPM. 20034010013

Telah diuji kebenaran oleh Tim Penguji dan diterbitkan
pada Jurnal Serambi Engineering (Terakreditasi SINTA 4)
Volume X, Nomor 1, Januari 2025

Menyetujui,

TIM PENGUJI

PEMBIMBING 1

1. Ketua

Firra Rosariawan, S.T., M.T.
NIP.PP. 19750469 202121 2004

Ir. Tuhu Agung Rachmanto, M.T.
NIP. 19620501 198303 1001

PEMBIMBING 2

2. Anggota

Muhammad A. S. Jawwad, S.T., M.Sc.
NIP. 19940727 202406 1001

Aussie Amalia, S.T., M.Sc.
NPT. 17219921124059

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur

Prof. Dr. Dra. Jarivah, M.P.
NIP. 19650403 199103 2 001

LEMBAR REVISI
ANALISIS *ULTRAFINE PARTICLES (UFPs)* DAN *BLACK CARBON (BC)* DI *INDOOR MICROENVIRONMENT*
UNIVERSITAS: SUMBER POTENSIAL, FAKTOR INFILTRASI,
EXPOSURE*, DAN *MACHINE LEARNING MODEL

Disusun Oleh:

MOHAMAD SHOLIKIN
NPM. 20034010013

Telah direvisi dan disahkan pada tanggal 4 Desember 2024

TIM PENILAI

KETUA



Ir. Tuhs Agung Rachmanto, M.T.
NIP. 19620501 198503 1001

ANGGOTA



Aussie Arnalia, S.T., M.Sc.
NPT. 17219921124059

SURAT PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mohamad Sholikin
NPM : 20034010013
Fakultas : Teknik dan Sains
Program Studi : Teknik Lingkungan
Email : mohamadsholikin31@gmail.com
Judul Skripsi/Tugas Akhir : Analisis *Ultrafine Particles* (UFPs) dan *Black Carbon* (BC) di *Indoor Microenvironment* Universitas: Sumber Potensial, Faktor Infiltrasi, *Exposure*, dan *Machine Learning* Model

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Hasil karya yang saya serahkan ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik baik di UPN "Veteran" Jawa Timur maupun di institusi pendidikan lainnya.
2. Hasil karya saya ini merupakan gagasan, rumusan dan hasil pelaksanaan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan pembimbing akademik.
3. Hasil karya saya ini merupakan hasil revisi akhir setelah diujikan yang telah diketahui dan disetujui oleh pembimbing.
4. Dalam karya saya ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali yang digunakan sebagai acuan dalam naskah dengan menyebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya. Apabila di kemudian hari terbukti ada penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini maka saya bersedia menerima konsekuensi apa pun, sesuai ketentuan yang berlaku di UPN "Veteran" Jawa Timur.

Surabaya, 4 Desember 2024

Yang Menyatakan



(Mohamad Sholikin)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “**Analisis Ultrafine Particles (UFPs) dan Black Carbon (BC) di Indoor Microenvironment Universitas: Sumber Potensial, Faktor Infiltrasi, Exposure, dan Machine Learning Model**” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi Teknik Lingkungan. Penulisan skripsi ini tidak akan dapat tercapai tanpa bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak yang telah meluangkan waktu dan perhatiannya. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P., selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur.
2. Ibu Firra Rosariawari, S.T., M.T., selaku Koordinator Program Studi Teknik Lingkungan dan dosen pembimbing tugas akhir, yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
3. Bapak M.A.S. Jawwad, S.T., M.Sc., yang juga telah memberikan bimbingan, arahan, bantuan, bahkan kesempatan-kesempatan berharga sepanjang perjalanan penulis menjadi mahasiswa hingga penulis dapat belajar dan merasakan atmosfer akademik internasional di Taiwan.
4. Prof. Ya-Fen Wang dan Prof. Sheng-Jie You dari Chung Yuan Christian University (CYCU), Taiwan, yang telah menjadi supervisor selama program internship di CYCU dan memberikan kesempatan serta arahan dalam penelitian untuk tugas akhir ini
5. Sultan F. I. Abdillah, S.Tr.T., M.Sc., Ph.D.(C), sebagai mentor dalam penelitian ini yang banyak memberikan ide, masukan, saran, dukungan, hingga kepercayaan selama proses penelitian di Taiwan.
6. Bapak Ir. Tuhu Agung Rachmanto, M.T. dan Ibu Aussie Amalia, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik maupun syarat untuk laporan ini.

7. Seluruh dosen dan *staff* pengajar Program Studi Teknik Lingkungan yang telah memberikan ilmu dan waktunya selama penulis menjalani pendidikan sebagai mahasiswa.
8. Bapak, Ibu, dan Kakak yang selalu ikhlas mendoakan, mendukung, dan memotivasi penulis selama proses penyelesaian tugas akhir ini, terutama almarhumah Ibu yang telah menemani hingga tugas akhir ini selesai serta berhasil menanamkan cinta dan semangat yang abadi dalam hati saya. Tugas Akhir ini saya persembahkan sebagai wujud bakti dan rasa terima kasih yang tak terhingga untuk beliau.
9. Sahabat, teman-teman seperjuangan, Barudak Well, Tim Riset, teman-teman TEEP Awardee 2024 di CYCU Taiwan, TL'20 kos gang senggol, dan lainnya yang telah menghibur, memberi warna, dan saling memberi semangat di tengah suka dan duka perjalanan ini.
10. Semua pihak yang terlibat dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Lingkungan, serta menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

Surabaya, 4 Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR/GRAFIK	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Mikroenvironment di Universitas	5
2.2 <i>Indoor Air Quality</i>	5
2.3 <i>Ultrafine Particles</i> (UFPs).....	7
2.3.1 Sumber <i>Ultrafine Particles</i>	8
2.3.2 Karakteristik <i>Ultrafine Particles</i>	9
2.3.3 Pengukuran <i>Ultrafine Particles</i>	11
2.4 <i>Black Carbon</i> (BC)	12
2.4.1 Sumber <i>Black Carbon</i> Dalam Ruangan	13
2.4.2 Sifat <i>Black Carbon</i>	13
2.4.3 Pengukuran <i>Black Carbon</i>	15

2.6	Faktor Infiltrasi Udara dalam Ruangan.....	16
2.7	Exposure Assessment.....	17
2.8	Pengembangan Model Prediksi Algoritma <i>Machine Learning</i>	18
2.5	Penelitian Terdahulu.....	24
BAB 3 METODE PENELITIAN.....		28
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	28
3.2	Kerangka Penelitian.....	29
3.3	Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.4	Data Penelitian.....	31
3.5	Cara Kerja.....	32
3.5.1	Persiapan Instrumen Pengukuran UFPs dan BC.....	32
3.5.2	Pengukuran Konsentrasi UFPs dan BC.....	32
3.5.3	Analisis dan Pemrosesan Data.....	33
1.	Analisis Variasi Konsentrasi.....	34
2.	Indikasi Infiltrasi melalui Rasio <i>Indoor/Outdoor</i>	35
3.	Klasifikasi Sumber UFPs dan BC.....	36
4.	<i>Exposure Assessment</i>	36
5.	Pengembangan Model Estimasi dengan Algoritma <i>Machine Learning</i>	38
3.6	Matriks Penelitian.....	39
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		41
4.1	Variasi Konsentrasi UFPs dan BC.....	41
4.1.1	Analisis Intra-Indoor Spasial Variabilitas Mikroenvironment.....	42
4.1.2	Analisis Konsentrasi Berdasarkan Waktu.....	47
4.2	Indikasi Infiltrasi UFPs dan BC.....	49
4.3	Klasifikasi Sumber UFPs dan BC.....	51

4.4	Analisis <i>Initial Exposure Assessment</i> UFPs dan BC.....	54
4.4.1	Total Exposure UFPs dan BC	54
4.4.2	Total dan Fractional Deposited Dose	56
4.5	Pengembangan Algoritma Machine Learning untuk Prediksi UFPs.....	58
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		64
5.1	Kesimpulan	64
5.2	Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....		66
LAMPIRAN A HASIL ANALISIS/PENGUKURAN.....		82
LAMPIRAN B PERHITUNGAN		97
LAMPIRAN C DOKUMENTASI KEGIATAN		98
LAMPIRAN D PENDUKUNG LAIN		99

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Sumber polutan dalam ruangan dan dampak kesehatan yang ditimbulkan	6
Tabel 2. 2 Rangkuman penggunaan machine learning untuk prediksi IAQ	19
Tabel 2. 3 Penelitian terdahulu	24
Tabel 3. 1 Alat Penelitian	30
Tabel 3. 2 Perangkat Lunak Penelitian.....	30
Tabel 3. 3 Bahan Penelitian.....	31
Tabel 3. 4 Desain Rolling Sampling	32
Tabel 3. 5 Parameter Pernapasan & Deposisi untuk Penghitungan Dosis Paparan UFP dan BC	37
Tabel 3. 6 Matriks Penelitian	40
Tabel 4. 1 Rangkuman Karakteristik Ruangan	41
Tabel 4. 2 Rangkuman Rata-rata Konsentrasi Polutan Hasil Pengukuran	45
Tabel 4. 3 Perbandingan Konsentrasi UFPs PNC dan BC dengan Studi Lain.....	45

DAFTAR GAMBAR/GRAFIK

Gambar 2. 1 Perbandingan Luas Permukaan Partikel dengan Diameter Berbeda..	8
Gambar 2. 2 Sumber Polutan Ultrafine Particles	9
Gambar 2. 3 Sifat Fisikokimia dari UFPs	10
Gambar 2. 4 Prinsip-prinsip pengoperasian metodologi utama yang digunakan untuk menangkap dan mengukur UFPs	12
Gambar 2. 5 Struktur partikel BC	14
Gambar 2. 6 Diagram skematik dari ANN.....	22
Gambar 3. 1 Sampling Sites Indoor Air Quality	28
Gambar 3. 2 Kerangka Penelitian	29
Gambar 3. 3 Detail Set-up Instrumen Pengukuran	33
Gambar 3. 4 Analisis Penelitian	34
Gambar 3. 5 Prosedur Pengembangan Model Prediksi.....	39
Gambar 4. 1 Distribusi Rata-rata Konsentrasi UFPs dan BC di Lokasi Penelitian	44
Gambar 4. 2 Rasio IQR/Median Konsentrasi UFP, BC, PM10, PM2.5, CO2, TVOC, Suhu, Kelembaban	47
Gambar 4. 3 Variasi Mingguan Rata-rata Konsentrasi UFPs dan BC.....	48
Gambar 4. 4 Indikasi Infiltrasi melalui Rasio Indoor/Outdoor	50
Gambar 4. 5 Analisis Korelasi Pearson's r Correlation dan Significance Mark Antar Polutan	52
Gambar 4. 6 Total UFPs PNC Exposure	55
Gambar 4. 7 Total BC Exposure	56
Gambar 4. 8 Fraksional Deposisi UFPs PNC pada Fraksi Extrathoracic (ET) Tracheobronchial (TB) Alveoli (ALV) dengan Implikasi Orang Dewasa	57
Gambar 4. 9 Fraksional Deposisi UFPs PNC pada Fraksi Extrathoracic (ET) Tracheobronchial (TB) Alveoli (ALV) dengan Implikasi Anak-anak.....	58
Gambar 4. 10 Metrik Model Machine Learning (RF Regressor & XGBoost) dan Deep Learning (ANN).....	60
Gambar 4. 11 Analisis Feature Importance pada Model Random Forest	61

Gambar 4. 12 Analisis SHAP pada Model XGBoost.....	62
Gambar 4. 13 Analisis Model Loss pada Model Artificial Neural Netwrok.....	62

ABSTRAK

ANALISIS *ULTRAFINE PARTICLES* (UFPs) DAN *BLACK CARBON* (BC) DI *INDOOR MICROENVIRONMENT* UNIVERSITAS: SUMBER POTENSIAL, FAKTOR INFILTRASI, *EXPOSURE*, DAN *MACHINE LEARNING MODEL*

MOHAMAD SHOLIKIN
NPM. 20034010013

Ambien *ultrafine particles* (UFPs; PM_{0.1}; partikel berdiameter kurang dari 0.1 μm) dan *black carbon* (BC) memiliki dampak negatif terhadap kesehatan manusia. Siswa menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan dan sepertiganya di sekolah, lingkungan pendidikan perlu mendapat perhatian khusus. Penelitian ini bertujuan untuk memperluas karakterisasi UFP dan BC di universitas dengan mempertimbangkan *indoor microenvironment* yang berbeda, faktor infiltrasi, dan memperkirakan paparan untuk anak-anak dan orang dewasa yang sehat. Selain itu, *machine learning* (ML) yang dapat secara akurat memprediksi jumlah partikel UFP dikembangkan dan digunakan dalam studi ini. Penelitian ini mengukur konsentrasi UFP dan BC di empat jenis ruangan: *classroom*, *officeroom*, *cafeteria*, dan *gym*. Rata-rata UFP PNC dan BC yang diamati *cafeteria* (13,355 # cm⁻³ & 599 ng m⁻³), *gym* (8,811 # cm⁻³ & 987 ng m⁻³), *office room* (7,679 # cm⁻³ & 830 ng m⁻³), dan *classroom* (6,420 # cm⁻³ & 548 ng m⁻³). Rasio I/O tertinggi untuk UFP ditemukan di *cafeteria* (0,80), yang menunjukkan pengaruh polusi luar ruangan, sementara BC memiliki rasio I/O tertinggi di *gym* (1,11), yang menunjukkan sumber BC dalam ruangan. UFP yang terhirup sebagian besar disimpan di fraksi pernapasan *tracheobronchial* untuk orang dewasa (67,7%) dan di fraksi *alveoli* untuk anak-anak (68,3%). Algoritma ML, *artificial neural network* menunjukkan kinerja terbaik untuk *classroom* dan *cafeteria*, dengan nilai R² masing-masing sebesar 0,958 dan 0,923, serta nilai MAE dan MSE yang rendah. Sementara itu, *random forest regressor* menunjukkan kinerja yang optimal untuk *classroom* dan *gym*, dengan nilai R² masing-masing sebesar 0,915 dan 0,865.

Kata kunci: *Black carbon*, *Exposure Assessment*, Faktor infiltrasi, *Machine Learning*, *Ultrafine particles*

ABSTRACT

ASSESSING UFPs AND BC CHARACTERISTICS AMONG DIFFERENT INDOOR MICROENVIRONMENTS IN UNIVERSITY: EMPHASIS ON SOURCES, INFILTRATION FACTOR, EXPOSURE, AND MACHINE LEARNING MODEL

MOHAMAD SHOLIKIN
NPM. 20034010013

Ambient ultrafine particles (UFPs; PM_{0.1}; particles of diameter less than or equal to 0.1 μ m) and black carbon (BC) have a negative on human health. As students spend most of their time indoor and one third in school, the educatory environment deserve special attention; however, majority of past research focused on UFPs and BC assessment itself in classroom. Thus, this work aims to expand the the characterization of UFPs and BC in university by considering different indoor microenvironment, infiltration factor, and estimating exposure for healthy children and adult. Additionally, machine learning (ML) that could accurately predict the particle number of UFPs was developed and utilized in this investigation. This study measured UFPs and BC concentrations across four room types: cafeteria, gym, office room, and classroom. The observed average UFPs PNC and BC in the cafeteria (13,355 # cm⁻³ & 599 ng m⁻³), gym (8,811 # cm⁻³ & 987 ng m⁻³), office room (7,679 # cm⁻³ & 830 ng m⁻³), and classroom (6,420 # cm⁻³ & 548 ng m⁻³). The highest I/O ratio for UFPs was found in the cafeteria (0.80), indicating outdoor pollution influence, while BC had the highest I/O ratio in the gym (1.11), suggesting indoor BC sources. The majority of inhaled UFPs were found in the alveoli (ALV) fraction in children (68.3%) and the tracheobronchial (TB) respiratory fraction in adults (67.7%). The ML algorithm, artificial neural network (ANN) demonstrated the best performance for the office room and cafeteria, with R² values of 0.958 and 0.923, respectively, and low MAE and MSE values. Meanwhile, the random forest regressor (RFRegressor) performed optimally for the classroom and gym, with R² values of 0.915 and 0.865, respectively.

Keywords: *Black carbon, Exposure Assessment, Infiltration Factor, Machine Learning, Ultrafine particles,*