

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Dasar Teori

Analisis dari hasil pengamatan sirkulasi dan kualitas udara pada tugas akhir ini didasarkan pada standar-standar yang berhubungan dengan kualitas udara dan sistem ventilasi bangunan. Digunakan standar kualitas udara dalam ruang (*indoor air quality*) untuk mendekati kondisi ruang terbuka pada lokasi studi kasus karena belum ada standar nasional maupun internasional yang secara khusus meninjau ruang terbuka / *open air*.

2.1.1 Standar-standar yang Ditinjau

2.1.1.1 ASHRAE 62.1-2013: *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*

ASHRAE 62.1-2007 digunakan sebagai salah satu pedoman pengamatan sistem ventilasi dalam bangunan [9]. Batasan-batasan yang ditentukan standar ini antara lain adalah ketentuan untuk sebuah ventilasi (alami dan mekanik), laju aliran udara, pengukuran laju ventilasi dan kualitas udara.

2.1.1.2 SNI 03-6572-2001: **Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung**

SNI 03-6572-2001 digunakan sebagai salah satu pedoman sistem ventilasi dan pengkondisian udara dalam bangunan [10]. Batasan-batasan yang ditentukan standar ini lebih berkaitan dengan keadaan di iklim Indonesia, mencakupi ketentuan-ketentuan kenyamanan dan pengkondisian udara, ventilasi udara, laju udara, dan lainnya.

2.1.1.3 Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)

ISPU digunakan sebagai tinjauan terhadap standar pencemar udara ambien yang spesifik untuk daerah Indonesia [11]. Ketentuan-ketentuannya berupa parameter pencemaran udara, kategori tingkat bahaya pencemaran udara, dan pengukuran pencemaran udara.

2.1.1.4 Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077 Tahun 2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah

Peraturan Menteri Kesehatan No. 1077 digunakan sebagai pedoman pencemaran udara dalam suatu hunian [12]. Peraturan ini berisi acuan untuk membantu menyehatkan kualitas udara dalam ruang rumah, termasuk persyaratan kualitas udara dalam rumah, faktor risiko, dan langkah pengawasan kualitas udara dalam ruang rumah.

2.1.2 Kualitas Udara Dalam Ruang (*Indoor Air Quality*)

Berdasarkan standar ASHRAE 62.1-2013, kualitas udara dalam ruang yang dapat diterima (*acceptable indoor air quality*) adalah udara yang tidak mengandung konsentrasi kontaminan yang berbahaya, sesuai dengan ketentuan dari pengurus daerah yang berkaitan, tanpa keluhan dari mayoritas (80% atau lebih) penduduk [9, p. 3].

Dalam pembahasan udara dalam ruang dengan ventilasi, udara dibagi menjadi kategori berikut, antara lain [9, p. 4]:

- *Ambient air* / udara ambien adalah udara di sekeliling sebuah bangunan.
- *Indoor air* / udara dalam ruang adalah udara di dalam sebuah ruang hunian yang tertutup.

- *Outdoor air* / udara luar ruang adalah udara ambien yang masuk ke dalam ruang melalui ventilasi, bukaan yang disengaja, atau infiltrasi lainnya.

Sehingga, dalam analisis kualitas udara dalam ruang, perlu diingat bahwa udara ambien akan mempengaruhi udara dalam ruang (yang masuk sebagai udara luar ruang).

Di Indonesia, kualitas udara ambien dapat dibandingkan dengan merujuk kepada Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Dalam ISPU, terdapat 5 parameter yang diamati [11, p. 1]:

- Partikulat (PM 10)
- Partikulat (PM 2,5)
- Karbon monoksida (CO)
- Sulfur dioksida (SO₂)
- Nitrogen dioksida (NO₂)
- Ozon (O₃)
- Hidrokarbon (HC)

Kelima parameter tersebut juga memiliki batas konsentrasi yang dihubungkan dengan angka indeks yang menunjukkan kategori bahaya pencemaran.

Tabel 2.1 Batas Indeks Standar Pencemar Udara (dalam Satuan SI) [11]

Indeks Standar Pencemar Udara	PM ₁₀ ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM _{2,5} ($\frac{\mu g}{m^3}$)	SO ₂ ($\frac{\mu g}{m^3}$)	CO ($\frac{\mu g}{m^3}$)	O ₃ ($\frac{\mu g}{m^3}$)	NO ₂ ($\frac{\mu g}{m^3}$)	HC ($\frac{\mu g}{m^3}$)
0-50	50	15,5	52	4000	120	80	45
51-100	150	55,4	180	8000	235	200	100
101-200	350	150,4	400	15000	400	1130	215
201-300	420	250,4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	2100	45000	1000	3000	648

Keterangan:

- Data pengukuran selama 24 jam secara terus-menerus.
- Hasil perhitungan ISPU parameter PM 2,5 disampaikan tiap jam selama 24 jam.
- Hasil perhitungan ISPU parameter PM 10, SO₂, CO, O₃, NO₂, dan HC diambil nilai ISPU parameter tertinggi dan paling sedikit disampaikan setiap jam 09.00 dan 15.00.

Sumber: PERMENLHK 14 (2020)

Angka indeks tersebut menentukan kategori bahaya pencemaran udara, yang dijelaskan pada tabel berikut:

Tabel 2.2 Angka dan Kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) [11]

INDEKS	KATEGORI	PENJELASAN
1 - 50	Baik	Tingkat kualitas udara yang tidak memberikan efek bagi manusia atau hewan dan tidak berpengaruh pada tumbuhan, bangunan, atau nilai estetika
51 - 100	Sedang	Tingkat kualitas udara yang tidak berpengaruh pada kesehatan manusia ataupun hewan tetapi berpengaruh pada tumbuhan yang sensitif, dan nilai estetika
101 - 200	Tidak Sehat	Tingkat kualitas udara yang bersifat merugikan pada manusia ataupun kelompok hewan yang sensitif atau bisa menimbulkan kerusakan pada tumbuhan ataupun nilai estetika
201 - 300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat kualitas udara yang dapat merugikan kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terparah
≥ 300	Berbahaya	Tingkat kualitas udara berbahaya yang secara umum dapat merugikan kesehatan yang serius

Sumber: PERMENLHK 14 (2020)

Untuk menentukan indeks standar pencemar udara, data yang diperoleh dalam pengukuran dapat dihitung dalam rumus:

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad (2.1)$$

di mana:

- I = ISPU terhitung
- I_a = ISPU batas atas
- I_b = ISPU batas bawah
- X_a = Ambien batas atas
- X_b = Ambien batas bawah
- X_x = Kadar ambien nyata hasil pengukuran

Selain ISPU, Peraturan MenKes No. 1077 juga menjelaskan persyaratan kualitas udara dalam ruang rumah untuk kualitas fisik (termasuk PM 10 dan PM 2,5) dan kualitas kimia (termasuk HCHO dan TVOC). Rincian persyaratannya sebagai berikut:

Tabel 2.3 Persyaratan Fisik Kualitas Udara dalam Ruang Rumah [12]

Jenis Parameter	Satuan	Kadar yang Dipersyaratkan
Suhu	°C	18-30
Pencahayaan	Lux	minimal 60
Kelembaban	% Rh	40-60
Laju Ventilasi	m/detik	0,15-0,25
PM 2,5	$\frac{\mu g}{m^3}$	35 dalam 24 jam
PM 10	$\frac{\mu g}{m^3}$	≤ 70 dalam 24 jam

Sumber: PERMENKES 1077 (2011)

Tabel 2.4 Persyaratan Kimia Kualitas Udara dalam Ruang Rumah [12]

Jenis Parameter	Satuan	Kadar Maksimal yang Dipersyaratkan	Keterangan
Sulfur dioksida (SO ₂)	ppm	0,1	24 jam
Nitrogen dioksida (NO ₂)	ppm	0,04	24 jam
Karbon monoksida (CO)	ppm	9,00	8 jam
Karbon dioksida (CO ₂)	ppm	1000	8 jam
Timbal (Pb)	$\frac{\mu g}{m^3}$	1,5	15 menit
Asbes	serat/mL	5	panjang serat 5μ
Formaldehid (HCHO)	ppm	0,1	30 menit
<i>Volatile Organic Compound (VOC)</i>	ppm	3	8 jam
<i>Environmental Tobacco Smoke (ETS)</i>	$\frac{\mu g}{m^3}$	35	24 jam

Sumber: PERMENKES 1077 (2011)

Terdapat juga pedoman-pedoman lain, dari badan pengatur lokal dan internasional, yang menentukan batasan kadar udara dalam ruang, seperti:

- Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja, pasal 40 ayat 4, yang menentukan standar kadar oksigen tempat kerja dalam bentang 19,5 - 23,5 persen memenuhi KUDR (Kualitas Udara Dalam Ruang) yang sehat dan bersih. [13]
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration) menentukan standar oksigen (O₂) di udara antara 19,5-23,5 persen,

dengan kadar oksigen di bawah 19,5 persen sebagai kekurangan oksigen (*oxygen-deficient*) [14].

- WHO (*World Health Organization*) menentukan pedoman untuk beberapa parameter pencemaran udara berupa [15]:

Tabel 2.5 Standar Pencemaran Udara WHO

Parameter	Batasan
PM _{2,5}	Tahunan: $10 \frac{\mu g}{m^3}$; Setiap 24 jam: $25 \frac{\mu g}{m^3}$
PM ₁₀	Tahunan: $20 \frac{\mu g}{m^3}$; Setiap 24 jam: $50 \frac{\mu g}{m^3}$
Ozon (O ₃)	Setiap 8 jam: $100 \frac{\mu g}{m^3}$
Nitrogen Dioksida (NO ₂)	Tahunan: $40 \frac{\mu g}{m^3}$; Setiap 1 jam: $200 \frac{\mu g}{m^3}$
Sulfur Dioksida (SO ₂)	Tahunan: $20 \frac{\mu g}{m^3}$; Setiap 10 menit: $500 \frac{\mu g}{m^3}$

Sumber: *World Health Organization* (2018)

2.1.3 Ventilasi Udara Alami (*Natural Ventilation*)

ASHRAE 62.1-2007 mendefinisikan *Natural Ventilation* (NV) sebagai ventilasi yang disediakan oleh efek termal, angin, ataupun difusi melalui pintu, jendela, atau bukaan pada bangunan [9, p. 5]. Dalam standar tersebut, ASHRAE juga menentukan kriteria sebuah ruangan dengan NV:

- Ruangan secara permanen berjarak 8 m dari bukaan pada dinding atau atap yang mengarah ke luar ruangan.
- Luas bukaan minimal adalah 4% dari luas lantai yang dihuni; dengan luas bukaan tidak terhalang oleh kisi-kisi ataupun penghalang lainnya.
- Ruangan dalam tanpa bukaan langsung ke luar ruangan dan terventilasi melalui ruangan yang bersebelahan, perlu memiliki bukaan antar ruangan minimal 8% dari luas ruangan dalam dan tidak kurang dari 2,3 m².
- Bukaan harus mudah diakses dan dikendalikan oleh penghuni bangunan saat ruangan sedang dihuni.

Standar SNI 03-6572-2001 juga mendefinisikan Ventilasi Alami (VA) sebagai ventilasi yang:

"...terjadi karena adanya perbedaan tekanan di luar suatu bangunan gedung yang disebabkan oleh angin dan karena adanya perbedaan temperatur, sehingga terdapat gas-gas panas yang naik di dalam saluran ventilasi" [10, p. 3].

VA terdiri dari bukaan permanen, jendela, pintu, atau sarana lain yang dapat dibuka, dengan ketentuan:

- jumlah bukaan ventilasi tidak kurang dari 5% terhadap luas lantai ruangan yang membutuhkan ventilasi.
- bukaan menghadap ke:
 - halaman ber dinding dengan ukuran yang sesuai, atau daerah yang terbuka ke atas.
 - teras terbuka, pelataran parkir, atau sejenis; atau
 - ruang yang bersebelahan.

Untuk VA yang diambil dari Ruang yang Bersebelahan, diberikan ketentuan (untuk bangunan kelas 5, 6, 7, 8, dan 9) [10, p. 4]:

- jendela, bukaan, pintu, atau sarana lainnya memiliki luas ventilasi minimal 10% terhadap luas lantai ruangan yang akan diventilasi, yang diukur tidak lebih dari 3,6 m dari atas lantai;
- ruang yang bersebelahan mempunyai jendela, bukaan, pintu, atau sarana lainnya dengan luas ventilasi minimal 10% terhadap kombinasi luas lantai kedua ruangan; dan
- luas ventilasi yang dipersyaratkan tersebut boleh dikurangi apabila tersedia ventilasi alami dari sumber lainnya.

VA pada Gedung Parkir diberikan ketentuan pada setiap lantai gedung parkir (kecuali pelataran parkir terbuka) untuk memiliki sistem ventilasi yang [10, p. 5]:

- mengikuti ketentuan yang berlaku.
- alami permanen yang memadai.

Standar SNI 03-6572-2001 juga menentukan perancangan sistem ventilasi alami, yang mencakupi kebutuhan ventilasi udara yang diperlukan sesuai fungsi ruangan, dan ventilasi gaya angin / ventilasi gaya termal yang akan digunakan [10, p. 5]. Dalam penerapannya, ventilasi yang disebabkan gaya angin termasuk:

- kecepatan rata-rata.
- arah angin yang kuat.
- variasi kecepatan dan arah angin musiman dan harian.
- hambatan setempat (bangunan yang berdekatan, bukit, pohon, dan semak belukar).

2.1.4 Aliran Udara

Dalam ASHRAE, terdapat prosedur perhitungan tingkat ventilasi (*ventilation rate procedure*) yang digunakan untuk menghitung laju udara dalam ruangan dengan ventilasi yang ada agar dapat menentukan apakah kadar kontaminan dalam ruangan tersebut melebihi batas [9, p. 11]. Perhitungan laju aliran udara juga dibedakan berdasarkan zona perhitungan yang diperlukan. Untuk pernafasan, terdapat rumus untuk laju udara luar ruang pada zona pernafasan (*breathing zone outdoor airflow*) yang berupa:

$$V_{bz} = R_p P_z + R_a A_z \quad (2.2)$$

di mana:

A_z luas lantai zona pengukuran (m^2).

P_z populasi zona pengukuran. Ditentukan dari prediksi jumlah penghuni terbesar, atau rata-rata jumlah penghuni jika populasi zona pengukuran akan fluktuasi.

R_p laju aliran udara luar ruang (*outdoor airflow rate*) per orang.

R_a laju aliran udara luar ruang per unit luas.

Berdasarkan SNI 03-6572-2001, juga dapat dihitung laju aliran udara [10, pp. 5-6]. Dengan mempertimbangkan gaya angin, dapat ditentukan kuantitas gaya udara melalui ventilasi atau ukuran bukaan untuk menghasilkan suatu laju aliran udara dengan rumus:

$$Q = C_v \cdot A \cdot V \quad (2.3)$$

di mana:

Q = laju aliran udara ($\frac{m^3}{detik}$)

A = luas bebas (tidak terhalang) dari bukaan *inlet* (m^2)

V = kecepatan angin ($\frac{m}{detik}$)

C_v = efektivitas bukaan (dianggap 0,5~0,6 untuk angin tegak lurus, dan 0,25~0,35 untuk angin diagonal).

2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Penelitian terhadap *Indoor Air Quality*

Dalam pengamatan kualitas udara dalam ruang, metode pengamatan dapat membantu menggambarkan kondisi keseluruhan sebuah ruangan. Meskipun menggunakan alat ukur, pengamatan yang biasanya dilakukan secara manual bisa dialihkan menjadi pengamatan yang otomatis, seperti menerapkan sistem *internet of things* pada sensor. Sehingga fenomena kualitas udara di suatu daerah dapat digambarkan lebih jelas dengan informasi yang lebih akurat [16]. Di sisi lain, pengamatan yang lebih manual mungkin lebih diinginkan untuk mencari suatu pokok masalah, seperti keberadaan patogen yang dapat memperburuk kualitas udara [17].

2.2.2 Penelitian terhadap Ventilasi Alami (*Natural Ventilation*)

Pengamatan terhadap ventilasi alami umumnya mengamati perannya dalam pengaturan sirkulasi dan kualitas udara, dilihat dari jumlah kontaminan kimiawi [2, 18], ataupun sifat fisik udara [3, 19]. Setelah diteliti, ventilasi alami yang telah diterapkan pada ruang tertutup seperti ruang kelas [18] ataupun kamar pasien rumah sakit [2] dapat mempertahankan / mengurangi kadar CO₂ dalam ruangan tersebut.

Ventilasi alami yang ada juga berpengaruh pada sifat fisik udara, seperti kecepatan udara, kelembaban, dan temperatur dalam ruangan. Sehingga, karakteristik dari ventilasi alami yang digunakan juga akan mempengaruhi kinerja udara dalam ruang, seperti bagaimana luas bukaan ventilasi dapat membawa udara dengan kecepatan yang cukup pada ruangnya, tetapi tidak cukup kepada ruangan yang berdampingan [19]. Dan, ventilasi alami yang tidak dimanfaatkan

dapat menimbulkan kerugian-kerugian dalam bentuk kualitas udara yang buruk, menyebabkan munculnya gejala-gejala *sick building syndrome* [3].

2.2.3 Penelitian terhadap Ruang Terbuka (*Open Air*)

Tidak ada standar atau pedoman yang mencakupi berbagai macam variabel fisik dan kimiawi udara pada ruang terbuka. Sehingga, dalam penelitian terhadap kualitas udara ruang terbuka / *open air*, standar yang digunakan untuk mengukur sirkulasi dan kualitas udara masih merujuk pada standar pengukuran suatu variabel tunggal. Banyak dari standar-standar tersebut sama dengan standar bagi Udara Dalam Ruang, meskipun objek penelitiannya adalah ruang berventilasi alami (seperti *basement*) [8] ataupun ruang terbuka hijau [20].

Berikut beberapa standar yang telah dijadikan acuan dalam pengukuran-pengukuran tersebut, antara lain:

- SNI 19-7119.3-2005, untuk mengukur kadar Partikel Tersuspensi Total (TSP) [8]
- SNI 19-7119.2-2005, untuk mengukur kadar Nitrogen (NO₂) dengan metode Greiss Saltzman menggunakan spektrofotometer [8]
- Indeks Standar Pencemaran Udara, untuk berbagai jenis pencemaran udara [11]

