

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 INDOOR AIR QUALITY

2.1.1 Penjelasan Umum

Dari definisi-definisi yang penulis dapatkan didalam buku maupun web dapat disimpulkan bahwa *Indoor Air Quality* adalah kualitas udara yang ada didalam sebuah ruangan tertutup yang dapat mempengaruhi pengguna ruangan tersebut serta kenyamanan dari ruangan tersebut. Jika kualitas udara didalam ruangan tersebut tidak baik maka akibatnya akan menimbulkan penyakit bagi penghuni yang berada lama/tinggal didalamnya. Penyakit yang disebabkan oleh kualitas udara didalam ruangan yang buruk antara lain adalah asma, mata menjadi perih, kulit gatal-gatal dan sebagainya.

Menurut *World Health Organization* definisi dari sehat adalah keadaan sepenuhnya sehat dan tidak menderita sakit sedikit pun, dan hak manusia untuk sehat dilindungi dalam ruang termasuk hak menghirup udara yang bersih dengan suhu yang nyaman serta hak sehat dan nyaman secara visual.

Menurut *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)* mensyaratkan tingkat kenyamanan, dipengaruhi oleh: suhu udara ruangan, kelembaban ruangan, dan kecepatan angin dalam ruangan. Batasan kenyamanan suhu efektif $23^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}$, kecepatan angin $0,1 - 1,5 \text{ m/s}$, kelembaban relatif antara $50 - 60\%$.

Kondisi dari *Indoor Air Quality* sangat berkaitan dengan kontaminasi mikrobakteri (jamur, bakteri), bahan kimia (CO, radon), penyebab alergi dan penyebab stress yang dapat mempengaruhi kesehatan.

Sumber pencemaran udara dalam ruangan menurut penelitian *The National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH) dirinci menjadi 5 sumber meliputi :

1. Pencemaran akibat kegiatan penghuni dalam gedung seperti asap rokok, pestisida, bahan pembersih ruangan
2. Pencemaran dari luar gedung meliputi masuknya gas buangan kendaraan bermotor, cerobong asap dapur karena penempatan lokasi lubang ventilasi yang tidak tepat.
3. Pencemaran dari bahan bangunan ruangan seperti formaldehid, lem, asbestos, fibreglass , dan bahan lainnya.
4. Pencemaran mikroba meliputi bakteri, jamur, virus atau protozoa yang dapat diketemukan di saluran udara dan alat pendingin ruangan beserta seluruh sistemnya.
5. Kurangnya udara segar yang masuk karena gangguan ventilasi udara dan kurangnya perawatan sistem peralatan ventilasi.

Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) sebenarnya ditentukan secara sengaja ataupun tidak sengaja oleh penghuni ruangan itu sendiri. Ada gedung yang secara khusus diatur, baik suhu maupun frekuensi pertukaran udaranya dengan memakai peralatan ventilasi khusus, ada pula yang dilakukan dengan mendayagunakan keadaan cuaca alamiah dengan mengatur bagian gedung yang dapat dibuka. Kualitas udara dalam ruangan juga dipengaruhi oleh temperatur dan kelembaban yang dapat mempengaruhi kenyamanan dan kesehatan penghuninya. Dengan demikian kualitas udara tidak bebas dalam ruangan sangat bervariasi. Apabila terdapat udara yang tidak bebas dalam ruangan, maka bahan pencemar udara dalam konsentrasi yang cukup memiliki kesempatan untuk memasuki tubuh penghuninya.

Kualitas udara dalam ruangan yang baik didefinisikan sebagai udara yang bebas bahan pencemar penyebab iritasi, ketidaknyamanan atau terganggunya kesehatan penghuni. Temperatur dan kelembaban ruangan juga mempengaruhi kenyamanan dan kesehatan penghuni. Baku mutu bahan pencemar tertinggi yang diperkenankan dari beberapa bahan pencemar udara ruangan telah dideskripsikan

dalam *American Society of Health, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) 62 tahun 1989.

Pada umumnya masalah kesehatan berasal dari buruknya kualitas udara dalam ruangan, yang mengakibatkan hal-hal yang telah disebutkan diatas, juga dapat mengakibatkan iritasi kulit, *neurotoxic symptoms*, *hypersensitivity* dan *odour and taste symptoms*. Sebutan sindrom *sick building* digunakan untuk menjelaskan kondisi yang sudah sangat parah, pada awalnya mungkin iritasi kulit, mata dan tenggorokan, sakit kepala, namun jika dibiarkan akan menyebabkan kanker dan gangguan pada pernapasan.

Gambar dibawah ini adalah gambar piramida yang menunjukkan bahaya dari buruknya kualitas udara didalam ruangan dengan realitas yang ada di masyarakat (banyaknya kasus tersebut di masyarakat).

2.1.2 Penyebab Kualitas Udara Yang Buruk

Polusi didalam ruang dapat disebabkan oleh gas atau partikel yang disebarkan melalui udara. Sumber dari gas tersebut yaitu material bangunan, rokok, produk pembersih, produk kosmetik, perapian, perabotan, dan sistem HVAC. Kualitas udara yang buruk juga dapat disebabkan oleh tidak cukupnya udara luar yang masuk kedalam yang dapat menghilangkan semua partikel tersebut.

Resiko-resiko pada ventilasi yang kurang baik adalah:

1. kondisi hygrothermal
2. tumbuhnya jamur
3. rumah debu
4. gas hasil pembakaran seperti CO, Nox, dan SO₂
5. ruangan yang penuh dengan asap rokok
6. Volatile organic compounds (VOCs)

Ventilasi yang baik dapat meningkatkan kualitas udara dalam lingkungan, karena dapat mengontrol kelembaban dan kontaminasi yang dibawa udara, yang semuanya itu dapat mempengaruhi kesehatan manusia.

Kelembaban yang baik sekitar 30% sampai 60%, pada lingkungan yang dingin, ventilasi yang kurang baik dapat menyebabkan kelembaban yang terlalu

tinggi akibat aktivitas seperti memasak, mandi, dan bernafas. Sedangkan pada lingkungan yang lebih hangat sistem HVAC dapat menarik panas dan melembabkan udara.

Secara umum sumber partikel pada ruang bersih dibagi menjadi dua kategori, yaitu sumber internal dan sumber eksternal.

- Sumber internal. Partikel yang ada di dalam ruang bersih berasal dari pekerja yang masuk ke dalam ruangan tersebut, permukaan dinding ruang bersih yang terkelupas, proses dari alat yang digunakan, dan proses manufaktur itu sendiri. Namun sumber partikel internal terbesar datang dari pekerja yang masuk ke dalam ruang bersih tersebut, pekerja yang masuk ke dalam ruang bersih dapat menyebarkan ratusan bahkan jutaan partikel per menitnya. Untuk mengatasi persebaran partikel yang berasal dari pekerja maka digunakan baju khusus untuk digunakan di dalam ruang bersih, secara kontinu dialirkan udara ke pekerja tersebut.
- Sumber eksternal. Sumber eksternal adalah sumber partikel yang masuk ke dalam ruang bersih yang berasal dari luar, biasanya melalui pintu, jendela, dan dinding untuk pipa, saluran, dan sebagainya. Namun sumber eksternal terbesar adalah berasal dari alat penyejuk udara (*air conditioning*). Pada operasional ruang bersih, sumber partikel eksternal hanya memberikan dampak yang kecil pada keseluruhan ruang bersih, hal ini dikarenakan penggunaan filter HEPA pada suplai udara. Pengontrolan sumber partikel eksternal dilakukan oleh penyaring udara, tekanan udara pada ruangan, serta menutupi ruang penetrasi.

2.1.3 Solusi Buruknya Kualitas Udara Dalam Ruang

Pencegahan permasalahan *Indoor Air Quality* dapat berupa:

1. Pengukuran *Indoor Air Quality*

Metode yang dapat dipakai antara lain: mengidentifikasi sumber dari polutan, mengevaluasi penggunaan sistem *Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC)*, mengukur level kontaminasi, serta pengujian secara medis dan fisik.

2. Efisiensi sistem ventilasi

ventilasi menggunakan antara 25% hingga 30% dari total energi yang dipakai pada sebuah gedung, hal ini menyebabkan isolasi panas pada bangunan yang meningkatkan temperatur ruangan.

2.2 RUANG BERSIH

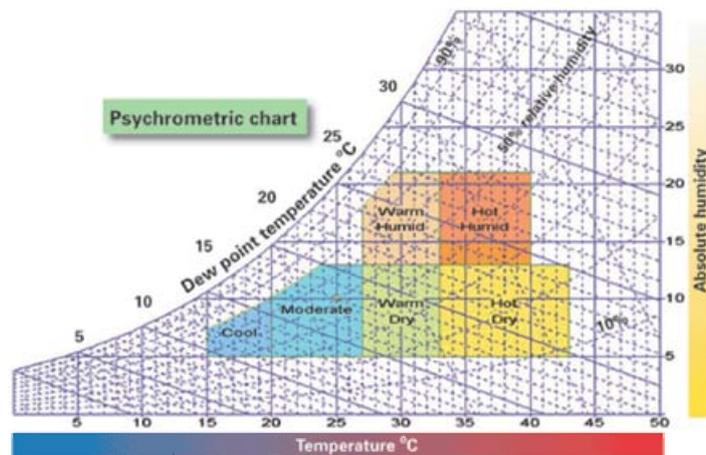
2.2.1 Penjelasan Umum

Definisi dari ruang bersih adalah ruangan khusus yang dibangun dengan mengontrol partikel-partikel (ukuran dan jumlah), temperatur, kelembapan, tekanan udara, distribusi laju aliran udara, pergerakan udara, dan pencahayaan. ISO 14644-1 mendefinisikan ruang bersih sebagai sebuah ruangan dengan konsentrasi partikel yang terkontrol dan dibangun serta digunakan untuk meminimalisir masuknya, berkembangnya dan menetapnya partikel di dalam ruangan dan parameter lain yang juga dikontrol adalah temperatur, kelembapan dan tekanan udara.

Di cleanroom, prioritas utama adalah pengontrolan kontaminan. Pengontrolan kontaminan ini dilakukan dengan cara penggunaan filter, pemakaian pakaian khusus pada pekerja, dll.

Selain itu, parameter yang perlu dikontrol yaitu temperature. Semakin tinggi temperature, maka semakin tinggi pula perkembangan partikel kontaminan. Selain itu, temperature juga perlu dikontrol untuk kenyamanan pekerja.

Parameter lain yang perlu dikontrol yaitu kelembaban relatif (RH). Perkembangan partikel juga dipengaruhi oleh kelembaban relative ruangan tersebut. Semakin tinggi RH, maka semakin tinggi tingkat perkembangan kontaminan. Selain itu pula, apabila terlalu kering, kenyamanan pekerja akan berkurang karena udara kering sangat tidak nyaman untuk bernafas untuk waktu yang panjang.



Grafik 2.1 Psychrometric chart

Tekanan dan kecepatan adalah parameter lain yang perlu dikontrol. Menjaga ruangan pada tekanan positif adalah hal yang penting untuk menghalangi masuknya kontaminan. Sehingga udara akan mengalir keluar apabila terdapat bukaan.

Terdapat 2 jenis filter udara yang biasanya digunakan di cleanroom, yaitu HEPA (high efficiency particulate air) filter dan ULPA (ultra low particulate/penetration air) filter. HEPA filter mempunyai efisiensi 99.97% sedangkan ULPA filter mempunyai efisiensi 99.9999%.

2.2.2 Aplikasi-Aplikasi Ruang Bersih

Penggunaan dari ruang bersih adalah untuk manufaktur, pemaketan, dan pencarian berkelanjutan untuk menumbuhkan teknologi terkini dan dibutuhkan untuk meningkatkan kebersihan kerja.

Berikut adalah industri utama yang menggunakan ruang bersih:

- a. **Pharmacuetical.** Persiapan dari *pharmacuetical*, biologi, dan kesehatan yang membutuhkan ruang bersih untuk mengontrol partikel mikroorganisme yang tidak diinginkan, serta bakteri lain yang mungkin tumbuh.
- b. **Elektronik.** Kecanggihan pada mikro elektronik semikonduktor, berkembang pada desain yang dilakukan pada ruang bersih. Jumlah fasilitas semikonduktor yang menggunakan ruang bersih sangatlah

signifikan, hal ini terjadi di amerika serikat yang biasanya menggunakan ruang bersih kelas ISO 8 atau lebih rendah.

- c. **Aerospace.** Sistem ruang bersih pertama kali berkembang pada *aerospace* untuk memanufaktur dan merakit satelit, misil, dan alat elektronik *aerospace* lainnya. Kebanyakan aplikasi tersebut memerlukan ruang bersih berukuran besar dengan kelas ruang bersih ISO 8 atau lebih rendah.
- d. **Berbagai aplikasi lainnya.** Penggunaan ruang bersih juga dipakai pada pembuatan dan pengemasan makanan antiseptik, manufaktur pembuatan lengan dan sendi buatan, kamar pengecatan industri automotif, industri, industri laser/optik, dan penelitian material-material canggih. Ruang operasi yang ada di rumah sakit juga termasuk ruang bersih, dengan fungsi untuk membatasi partikel kontaminan.

Tabel 2.1 Aplikasi *cleanroom*

ELECTRONICS	Computers, TV-tubes, Magnetic Tapes
SEMICONDUCTORS	Integrated Circuits
MICROMECHANICS	Compact Disc Players, Miniature Bearings, Gyroscopes
OPTICS	Lenses, Photographic Film, Laser Equipment
BIOTECHNOLOGY	Antibiotics, Generic Engineering
PHARMACY	Sterile Pharmaceuticals, Sterile Disposable
MEDICAL DEVICES	Heart Valves, Cardiac by-pass Systems
FOOD AND DRINK	Brewery Production, Unsterilized Food and Drinks
HOSPITALS	Immunodeficiency Therapy, Isolation of Contagious Patients, Operating Rooms

Sumber : W. Whyte, Cleanroom Design

Beberapa syarat yang harus dimiliki oleh ruang bersih adalah :

1. Spesifikasi dari partikel yang ada pada ruang bersih seperti debu ditentukan menurut batas diameter partikel, dan juga menurut batas maksimum partikel yang diperbolehkan per satuan unit volume (biasanya

dalam meter kubik). Untuk kontaminan yang bukan merupakan partikel, ditentukan batas *density* yang diperbolehkan dalam mikroba per kubik meter atau molekul per kubik meter.

2. udara yang masuk ke dalam ruang bersih yang berasal dari luar disaring oleh *exclude dust* dan udara yang ada didalam ruangan secara konstan disirkulasikan berulang ulang dengan menggunakan *HEPA (High Efficiency Particulate Air)* dan *ULPA (Ultra Low Penetration Air)*, untuk menghilangkan kontaminan yang berkembang didalam ruangan.
3. Karyawan yang masuk dan keluar dari ruang bersih harus melewati *airlocks* (kadang berupa pancuran udara) dan menggunakan pakaian pelindung seperti topi, masker, sarung tangan, dan sepatu.

2.2.3 Konsep Dasar Ruang Bersih

Pada dasarnya ruang bersih merupakan suatu hasil sistem pengaturan terhadap aliran udara dalam ruangan dan pengaturan tekanan. Oleh sebab itu pada bagian ini akan dijelaskan mengenai konsep dasar aliran udara.

2.2.3.1 *Pertukaran udara melalui ventilasi*

Udara memasuki ruangan secara umum dengan mengalir melalui lubang ventilasi udara. Ada beberapa macam ventilasi udara yaitu sebagai berikut:

a. Ventilasi natural

Ventilasi natural merupakan jalannya udara memasuki ruangan karena adanya perbedaan tekanan antara udara diluar ruangan dan udara di dalam ruangan. Perbedaan tekanan ini disebabkan adanya efek *stack/angin*. Yang termasuk ventilasi natural ini antara lain aliran udara melalui celah-celah dan lubang dinding (*infiltrasi*), jendela, pintu, dan cerobong.

b. Ventilasi aliran keluar

Ventilasi aliran keluar dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

1. *Local exhaust ventilation*

Ventilasi dengan tujuan membatasi gerak polutan dan mencegah polutan menyebar ke daerah bersih. Hal ini dilakukan dengan cara

meletakkan exhaust kipas seperti gabungan antara kipas, *duct*, *filter*, dan *hood*.

2. *Dilution exhaust ventilation*

Ventilasi dengan tujuan membuat udara berdifusi/menyebar ke seluruh ruangan. Hal ini dilakukan dengan cara kipas mengalirkan udara dari luar ke dalam melalui lubang-lubang yang dapat diatur secara manual.

Selain dengan metode diatas aliran udara dapat juga diukur berdasarkan keseimbangan energy, keseimbangan konsentrasi udara dan berdasarkan konsentrasi CO₂ dalam udara didalam dan diluar ruangan.

2.2.3.2 *Kontaminasi Udara*

Kontaminasi udara dalam ruangan antara lain disebabkan oleh sumber-sumber kontaminasi seperti bermacam-macam industri, sisa pembakaran, proses mineral dan karena faktor alam.

Jenis kontaminasi tersebut dapat digolongkan dan dibagi dalam beberapa kelas yaitu sebagai berikut:

- a. Gas organik
- b. Gas anorganik
- c. Aerosol

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi konsentrasi kontaminan tersebut antara lain adalah:

a. Faktor Eksternal

Konsentrasi kontaminan udara dalam ruangan meningkat sejalan dengan masuknya udara bebas yang disuplai ke dalam ruangan. Hal ini dapat diatur dengan penggunaan filter dan pengaturan ventilasi.

b. Faktor internal

Konsentrasi kontaminan udara dalam ruangan meningkat sejalan dengan meningkatnya aktifitas penghuni ruangan. Hal ini dapat diatasi dengan cara pengontrolan aktifitas penghuni dan penggunaan peralatan kerja.

2.2.3.3 Pengaturan Aliran Udara

Pengaturan aliran udara dalam ruangan untuk menciptakan suatu ruang bersih pada umumnya dilakukan dengan penggunaan aliran turbulen (*non-unidirectional airflow*), aliran laminar (*unidirectional airflow*) dan pengaturan tekanan udara didalam dan diluar ruangan.

a. Aliran turbulen (*non-unidirectional airflow*)

Aliran ini didapat dengan mengalirkan udara masuk melalui saluran udara masuk (*inlet air*) pada langit-langit ruang dan membuangnya melalui saluran keluar yang terdapat pada lantai ruangan. Pengaturan kebersihan udara melalui aliran turbulen ini menghasilkan kelas kebersihan udara kelas 100.000 dengan ukuran $0.5 \mu\text{m}$ dan kecepatan udara suplai berkisar antara 0.46 sampai 0.1 m/s. adapun jenisnya ada aliran konvensional dan aliran campuran.

b. aliran laminar (*unidirectional airflow*)

aliran ini didapat dengan cara mengalirkan udara masuk melalui saluran udara masuk (*inlet air*) pada langit-langit (aliran laminar vertikal) atau pada dinding (aliran laminar horizontal), dimana pada saluran udara masuk tersebut diberikan peralatan pengubah arah aliran sehingga menjadi aliran laminar. Pengaturan kebersihan udara melalui aliran laminar ini dapat menghasilkan kelas kebersihan udara kelas 100 – 10000 dan kecepatan udara 0.46 – 0.1 m/s. arah pengeluaran udara pada system ini berkebalikan dengan arah udara masuk. Adapun jenisnya ada aliran laminar vertikal dan aliran laminar horizontal.

c. Pengaturan tekanan udara

Pengaturan udara dengan cara pengaturan tekanan udara ini dapat dibagi menjadi dua yaitu:

- Ruang bertekanan negatif

Keadaan ini didapat dengan cara membuat tekanan udara dalam ruang kurang dari tekanan atmosfer yang dimaksudkan menjaga agar udara dalam ruangan tidak keluar ke lingkungan.

- Ruang bertekanan positif

Keadaan ini didapat dengan membuat tekanan udara dalam ruangan lebih dari tekanan atmosfer yang dimaksudkan menjaga agar udara dari lingkungan tidak masuk ke dalam ruangan.

2. 2. 3. 4 Konsep Ruang Bersih Dengan Aliran Turbulen

Pada ruang bersih, udara yang berasal dari AHU (*Air Handling Unit*) disemprotkan melalui lubang-lubang pada atap kamar yang diatur secara hidrolis. Udara yang disemprotkan tersebut kemudian mengalami filterisasi yang sangat teliti terhadap partikel-partikel dan diberikan zat anti kuman tertentu. Sebelum masuk ruangan, udara diubah tekanannya menjadi lebih tinggi daripada tekanan udara didalam ruangan.

Setelah udara dalam ruangan dikondisikan dengan tekanan yang telah diatur, tetapi masih mempunyai gerakan, gerakan ini diatur kecepatannya sedemikian rupa agar aliran udara menjadi turbulen. Kemudian aliran turbulen tersebut sebagian disedot kembali menuju AHU dan sebagian lagi diatur menuju ventilasi keluaran (*exhaust*).

Sistem ruang bersih aliran turbulen ada dua macam, yaitu:

a. Aliran konvensional (*Conventional Airflow*)

Pada sistem aliran konvensional ini, udara suplai masuk melalui saluran masuk berupa air supply ceiling (*operating theatre supply air ceiling*) disebagian langit-langit ruang. Udara keluar melalui saluran udara buang (*exhaust*) yang terletak di dinding.

b. Aliran campuran (*Mixing Airflow*)

pada sistem aliran campuran ini, udara suplai masuk melalui lubang di langit-langit, dan udara keluar melalui saluran di dinding.

2. 2. 3. 5 Konsep Ruang Bersih Dengan Aliran Laminar

Pada ruang bersih, udara yang berasal dari AHU disemprotkan melalui lubang-lubang pada atap kamar yang diatur secara hidrolis. Udara yang disemprotkan tersebut kemudian mengalami filterisasi yang sangat teliti terhadap partikel-partikel dan diberikan zat anti kuman tertentu. Sebelum masuk ruangan

udara diubah tekanannya oleh difuser sehingga tekanannya lebih tinggi daripada tekanan udara didalam ruangan, kemudian aliran tersebut dilewatkan ke dalam laminary agar pada saat masuk ruangan aliran udara menjadi aliran udara laminar dengan tekanan yang lebih tinggi. Kemudian aliran laminar tersebut sebagian disedot kembali menuju AHU dan sebagian lagi diatur menuju ventilasi keluaran (*exhaust*).

Sistem aliran laminar dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

a. Aliran laminar vertikal

Pada sistem aliran laminar vertikal ini, udara suplai masuk dari sisi langit-langit, dan keluar melalui lubang keluaran (*exhaust*) yang terletak dilantai (*gating/perforated floor*). Pada sisi masuk di langit-langit, udara suplai diletakan dahulu melalui HEPA filter. Dengan menggunakan HEPA filter, partikel berukuran $0.3 \mu\text{m}$ dan lebih besar dapat tersaring. Sehingga udara yang masuk bisa diminimumkan konsentrasi partikelnya. Untuk partikel yang ditimbulkan dalam ruang, akan dibuang melalui saluran udara buang, dan udara dalam ruang dapat dijaga kebersihannya.

Sistem aliran laminar ini bisa membuat ruang bersih mencapai kelas 100, artinya jumlah maksimum partikel yang ada di udara $100 \text{ partikel/ft}^3$.

b. Aliran laminar horisontal

Pada sistem aliran horisontal, udara suplai dimasukkan melalui salah satu sisi dinding, mengalir secara horisontal dan keluar pada sisi dinding yang berlawanan arah. Dengan sistem ini kelas kebersihan suatu ruang bersih bisa mencapai kelas 10000, artinya jumlah partikel maksimum $10000 \text{ partikel/ft}^3$.

Berikut adalah kekurangan-kekurangan aliran laminar horisontal;

- Adanya partikel yang bergerak turun kebawah karena efek gaya berat.
- Adanya kesulitan dalam pembuatan saluran udara (*duct*), karena volume yang dibutuhkan besar.

2.2.4 Klasifikasi Ruang Bersih

Klasifikasi dari ruang bersih didasarkan menurut jumlah dan ukuran partikel yang diperbolehkan per volume udara. Klasifikasi berupa kelas 100 atau kelas 1000 adalah contoh klasifikasi berdasarkan US FED STD 209E, yang menunjukkan jumlah dari partikel berukuran 0.5 μ m atau lebih besar yang diperbolehkan per kubik kaki dari udara.

Klasifikasi berdasarkan standar ISO 14644-1, dengan logaritma desimal jumlah partikel udara yang diperbolehkan dengan ukuran 0.1 μ m atau lebih besar per meter kubik dari udara, contohnya ruangan ruang bersih dengan kelas ISO 5 memiliki paling banyak $10^5 = 100.000$ partikel per meter kubik.

Tabel 2.2 Standar ruang bersih berdasarkan US FED 209E

Class	maximum particles/ft ³					ISO equivalent
	$\geq 0.1 \mu\text{m}$	$\geq 0.2 \mu\text{m}$	$\geq 0.3 \mu\text{m}$	$\geq 0.5 \mu\text{m}$	$\geq 5 \mu\text{m}$	
1	35	7	3	1		ISO 3
10	350	75	30	10		ISO 4
100		750	300	100		ISO 5
1,000				1,000	7	ISO 6
10,000				10,000	70	ISO 7
100,000				100,000	700	ISO 8

Sumber : www.aircaretechnology.co.nz

Tabel 2.3 Standar ruang bersih ISO 14644-1

Class	maximum particles/m ³						FED STD 209E equivalent
	≥0.1 µm	≥0.2 µm	≥0.3 µm	≥0.5 µm	≥1 µm	≥5 µm	
ISO 1	10	2					
ISO 2	100	24	10	4			
ISO 3	1,000	237	102	35	8		Class 1
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83		Class 10
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29	Class 100
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293	Class 1000
ISO 7				352,000	83,200	2,930	Class 10,000
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300	Class 100,000
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000	Room air

Sumber : www.rockwellautomation.com

Klasifikasi BS 5295 juga mengharuskan ukuran partikel terbesar tidak boleh melewati 5 µm.

Tabel 2.4 Standar ruang bersih berdasarkan BS 5295

Class	maximum particles/m ³				
	≥0.5 µm	≥1 µm	≥5 µm	≥10 µm	≥25 µm
Class 1	3,000		0		
Class 2	300,000		2,000	30	
Class 3		1,000,000	20,000	4,000	300
Class 4			200,000	40,000	4,000

Sumber : www.rockwellautomation.com

Definisi ruang bersih berdasarkan BS 5295 adalah sebuah ruangan dengan pengontrolan partikel kontaminan, temperatur, dan kelembaban, yang dibangun

dan digunakan untuk meminimalkan datangnya, berkembangnya, dan menetapnya partikel kontaminan didalam ruangan. BS 5295 digunakan sejak tahun 1976 yang dibagi menjadi 3 bagian utama, yaitu:

1. spesifikasi untuk pengontrolan lingkungan ruang bersih, tempat kerja dan peralatan pembersih udara.
2. petunjuk untuk pembangunan dan pemasangan instalasi ruang bersih, tempat kerja, dan peralatan pembersih udara.
3. petunjuk untuk prosedur pengoperasian dan cara penggunaan ruang bersih, tempat kerja, dan peralatan pembersih udara.

2.2.5 Partikel-Partikel Kontaminan

Hal lainnya yang harus diperhatikan adalah masuknya partikel kontaminan ke dalam ruangan ruang bersih. Partikel-partikel kontaminan yang masuk kedalam ruangan ruang bersih berasal dari:

1. Udara yang ada didalam ruangan ruang bersih.

Sumber dari mikro-organisme berasal dari manusia, dan sumber dari partikel kontaminan berasal dari manusia dan proses kerja.

2. Mikroba

Mikroba disebarkan oleh sel kulit yang terkelupas dari bagian tubuh manusia setiap 24 jam. Jumlah sel kulit yang terkelupas itu mencapai 1 miliar setiap harinya. Sel kulit berukuran 33 mikron sampai 44 mikron, dan dapat mengecil hingga 20 mikron yang dapat membawa bakteri yang ukurannya 12 mikron hingga 14 mikron.

3. *Inert Particles*

Partikel berasal dari manusia yang disebarkan melalui kulit, pakaian, dan pakaia khusus saat di dalam ruang bersih.

Untuk merawat dan menjaga tingkat kebersihan pada ruang bersih, perhatian harus difokuskan ke empat aturan berikut ketika mendesain, membangun, dan mnjalankan fasilitas ruang bersih, yaitu:

1. Partikel kontaminan jangan terbawa masuk kedalam ruangan
2. partikel kontaminan harus dihilangkan
3. tidak ada pertumbuhan partikel kontaminan di dalam ruangan

4. tidak ada partikel kontaminan yang bertambah

Manusia termasuk faktor kontaminan. Operator adalah sesuatu yang paling dekat dengan barang yang ingin kita jaga dari kontaminan. Kontaminan yang paling banyak diproduksi oleh manusia adalah skin flakes. Sel kulit yang mati akan dibawa akibat konveksi pada udara. Jumlah skin flake dipengaruhi oleh keadaan kulit dan aktifitas yang dilakukan.

Manusia yang sedikit sekali bergerak akan menghasilkan sekitar 100000 partikel yang berukuran diameter 0.3 – 0.5 μm per menit. Sedangkan orang yang hanya menggerakkan tangan dan badannya menghasilkan 1000000 partikel per menit. Jika semua anggota tubuh bergerak, misal pada saat berjalan, angka ini meningkat setidaknya dengan factor 5.

2.2.6 Kinerja Dari Ruangan Ruang Bersih

Ruang bersih dibagi menjadi 2 yaitu *general clean room* dan *critical criteria* ruang bersih. *Critical criteria* ruang bersih adalah ruangan disekitar titik utama produksi dimana kontaminasi partikel tidak boleh ada, karena partikel kontaminan tersebut akan terkena langsung dengan proses produksi, biasanya didaerah tersebut dialirkan aliran udara laminar lokal agar tidak terjadi penyebaran partikel kontaminan, sedangkan *general* ruang bersih adalah daerah disekitar *critical* ruang bersih yang partikel kontaminannya tidak terkena langsung dengan proses produksi, namun harus selalu dijaga bersih agar tidak menyebar ke area *critical* ruang bersih.

Sangat dianjurkan pada area *critical* untuk dibersihkan sesering mungkin dengan sangat bersih, sedangkan pada area *General* juga harus sering dibersihkan meskipun tidak seperti pada area *critical*.

2.2.7 Kontrol ruang bersih

Meskipun ruang bersih kelas ISO 1 hingga ISO 5 menggunakan desain sistem aliran *unidirectional*, tetapi kebanyakan ruang bersih bergantung pada prinsip dasar *dilution* untuk mengontrol partikel-partikel. Untuk udara yang telah tercampur dengan sempurna, pada saat kapan pun, konsentrasi partikel x dapat di

ekspresikan pada persamaan berikut ini, dengan asumsi tidak ada tekanan udara yang masuk kedalam ruangan :

$$dx = (s - x) \times v \times dt + g \times dt \quad 2.1$$

dimana:

s adalah suplai konsentrasi partikel udara per satuan ft^3 (m^3)

v adalah suplai volume udara rata-rata pada kondisi pergantian udara per jam

g adalah pertumbuhan internal rata-rata pada partikel per satuan ft^3 (m^3) per jam

x adalah ruangan atau konsentrasi udara balik pada partikel per ft^3 (m^3)

Asumsi konsentrasi permulaan ruangan adalah X_0 dan variasi dari nilai g terhadap waktu diabaikan, persamaan diatas dapat diselesaikan menjadi :

$$x = (X_0 - s - g/v) \exp(-vt) + s + g/v \quad 2.2$$

Dengan waktu (t) berjalan dan sistem mencapai kondisi *steady*, konsentrasi partikel x berubah menjadi :

$$x = s + g/v \quad 2.3$$

atau

$$v = g/(x - s) \quad 2.4$$

Sumber : John Zhang, *Understanding Pharmaceutical Cleanroom Design*

2.3 Persamaan Pemodelan

Pada pemodelan CFD, persamaan yang dipakai untuk permasalahan aliran fluida, perpindahan panas, dan proses lain yang berkaitan, secara umum menggunakan persamaan navier stokes.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho \vec{V}\phi) - \Gamma \nabla^2 \phi = S^o$$

Transient + Convection - Diffusion = Source

Where :

- ρ = density
- \vec{V} = velocity vector
- ϕ = dependent variable
- Γ = exchange coefficient (laminar + turbulent)
- S^o = source or sink term

Sumber: Mark Seymore, Airflow Modelling In Cleanroom Design

Pemodelan aliran udara menyelesaikan persamaan Navier-Stokes dengan membentuk grid dari ratusan atau ribuan sel yang menggambarkan model geometris dari heat dan udara. Persamaan yang terbentuk tersebut kemudian diselesaikan secara iteratif di setiap sel-nya, untuk menghasilkan solusi hukum kekekalan massa, momentum, dan energi. Sebagai hasilnya kita dapat mem-plot aliran udara di bagian manapun dari geometri.