

OBSERVASI POLA ALIRAN UDARA DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA RUANG TERKONDISI MENGGUNAKAN CFD

Apip Badarudin¹⁾, Andriyanto Setyawan²⁾, Sugiyarto³⁾, Utami Nuri Adilah⁴⁾

¹ Politeknik Negeri Bandung
email: apipbdr@polban.ac.id

² Politeknik Negeri Bandung
email: andriyanto@polban.ac.id

³ Politeknik Negeri Bandung
email: sugiyarto@polban.ac.id

⁴ Politeknik Negeri Bandung
email: nuriadilah.utami@gmail.com

Abstract

Some spaces for certain activities require designs that must be made specifically with certain conditions. But it often happens, the conditioned rooms of the design are not in accordance with the standards. Inappropriate parameters include air flow distribution patterns and temperatures in the space. Disagreements can be caused, among others, the configuration of the room, the regulation of air flow and the placement of the air inlet and air outlet which is not quite right.

Before it is realized, the design of cleanroom requires to observe the parameters that influenced of the air flow pattern and temperature distribution. This observation can be done by simulating it using CFD (Computational Fluid Dynamics) software by varying air debit that affect the air flow distribution pattern and temperature. Next, the simulation results compared to existing standards so that it is expected to get the desired results. The variation of air debit show the air flow patterns and temperature distribution has changed. A Small air debit result the air flow patterns and temperature distribution is not uniform. A medium air debit show the air flow and the temperature distribution has uniform. Then a high air debit, the air flow patterns has not uniform, but the temperature distribution has more uniform.

In this simulation, the variations in air debit on the cleanroom affect the temperature distribution. Air debit 125% and 100% in accordance with standard terms and criteria from CPOB or cleanroom specifications.

Keywords: *air distribution; CFD, Cleanroom, conditioned room, Mixed Flow, Unidirectional Flow*

1. PENDAHULUAN

Beberapa ruang untuk kegiatan tertentu memerlukan desain yang harus dibuat secara khusus dengan kondisi sesuai tertentu. Ruang tersebut biasanya memiliki parameter yang harus terjaga kondisinya. Misalnya *cleanroom*, parameter yang harus dijaga kondisinya antara lain konsentrasi partikel, temperatur, kelembaban udara, tekanan udara, pola aliran udara, getaran, kebisingan, kontaminan mikroorganisme, dan pencahayaannya. Untuk menjaga ruangan tetap bersih/steril, maka diperlukan pengaturan aliran udara, tekanan udara ruangan, dan filter yang sesuai dengan standar (ASHRAE, 2017).

Hal yang sering terjadi, ruang terkondisi hasil rancangan tidak sesuai dengan standar. Parameter yang tidak sesuai antara lain pola aliran udara dan temperatur di dalam ruang tersebut. Ketidak-sesuaian bisa disebabkan antara lain konfigurasi ruangan, pengaturan

debit udara dan peletakan saluran udara masuk dan udara keluar yang kurang tepat. Dengan demikian, seharusnya desain ruangan sebelum direalisasikan dibutuhkan analisis parameter-parameter pola aliran udara dan temperatur.

Analisis pola aliran udara dan temperatur di dalam ruang terkondisi dapat dilakukan dengan mensimulasikan menggunakan perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Dengan melakukan simulasi, parameter yang mempengaruhi pola aliran udara dan temperatur dapat diubah-ubah sehingga mendapatkan hasil yang diinginkan.

Ketidak-sesuaian ruang terkondisi hasil rancangan dengan standar sering terjadi. Desain ruangan sebelum direalisasikan dibutuhkan analisis parameter-parameter pola aliran udara dan temperatur. Analisis tersebut dapat dilakukan dengan mensimulasikan menggunakan perangkat lunak CFD dengan mengubah-ubah parameter yang mempengaruhi pola aliran udara dan temperatur sehingga mendapatkan hasil yang diinginkan.

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi dari *cleanroom* dengan mengubah-ubah debit udara masukan. Simulasi dilakukan dengan mengamati pola aliran udara dan temperatur. Parameter yang didapatkan dari hasil simulasi akan dibandingkan dengan standar yang ada (ASHRAE, 2017).

2. CLEANROOM

Cleanroom secara umum adalah ruangan tertutup yang dibangun secara khusus dengan menjaga kondisi ruangan sesuai rancangan, dimana konsentrasi partikulat, aliran/gerakan udara, temperatur, kelembaban, tekanan udara, pola aliran udara, kontaminan mikro-organisme, dan penerangan diatur sedemikian rupa. Tujuan utama ruang bersih adalah membatasi atau bahkan meniadakan kontaminan udara yang dapat merusak atau mengganggu proses/fungsi dari ruangan tersebut. Menurut ISO Standard 14644 ruang bersih adalah sebuah ruangan dimana konsentrasi dari partikel yang ada di ruangan tersebut dikontrol, dirancang secara khusus serta digunakan untuk meminimalkan hadirnya, tergenerasi dan tersimpannya partikel-partikel yang tidak diinginkan di dalam ruangan dan termasuk pula pengaturan pada parameter-parameter lainnya, seperti temperatur, kelembaban, tekanan pada ruangan (Whyte, W., Hejab, M., Whyte, W.M. and Green, G., 2010; Lele Zhoua, Wei Suna, Chen Huang, Hao Lia, Zhijun Zoua, Chongwei Wu, 2017; Mateja Trsan, Katja Seme, Stanko Srcic, 2019).

2.1 KLASIFIKASI CLEANROOM

Standard dan klasifikasi ruang bersih disesuaikan dengan peruntukan ruangan tersebut. Penentuan klasifikasi atau penentuan kelas ruang bersih berdasarkan beberapa standard, antara lain adalah ISO 14644-1, *U.S. Food and Drugs Administration* (FDA) dan cara pembuatan obat yang baik (CPOB) 2012.

Tabel 1. Klasifikasi Ruang Bersih (ISO 14664-1)

Class	Maximum particle/m ³						FED STD 209E equivalent
	≥ 0,1 μm	≥ 0,2 μm	≥ 0,3 μm	≥ 0,5 μm	≥ 1 μm	≥ 1 μm	
ISO 1	10	2					
ISO 2	100	24	20	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	23.7000	10.020	3.520	832	29	Class 100
ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293	Class 1.000
ISO 7				352.00	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

Tabel 2. Klasifikasi Ruang Bersih Berdasarkan FDA

Kelas	Ukuran partikel (μm)				
	0,1	0,2	0,3	0,5	5
1	35	7,5	3	1	NA
10	350	75	30	10	NA
100	NA*	750	300	100	NA
1.000	NA	NA	NA	1.000	7
10.000	NA	NA	NA	10.000	70
100.000	NA	NA	NA	100.000	700

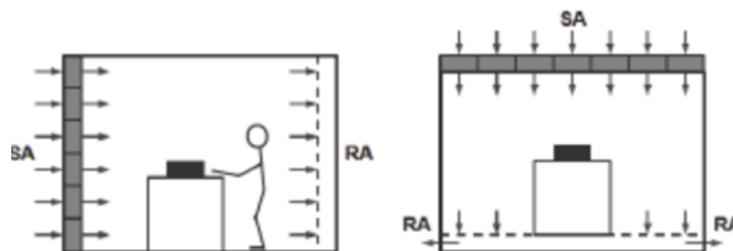
Tabel 3. Klasifikasi Ruang Bersih Berdasarkan CPOB

Kelas	Ukuran partikel (μm)	
	0,5	5
A	3520	20
B	352.000	2.900
C	3.520.000	29.000
D	NA	NA
E	NA	NA

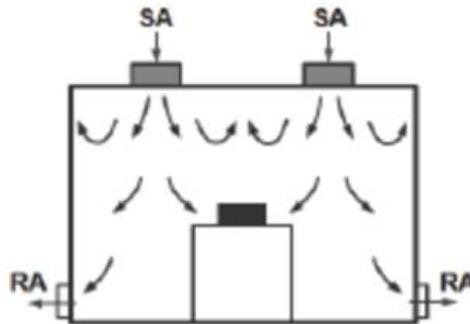
2.2 IDENTIFIKASI

Pola aliran udara pada *cleanroom* dipengaruhi oleh udara suplai dan udara balik, konfigurasi *exhaust*, *flowrates*, dan *layout* proses peralatan. Pola aliran udara pada *cleanroom* dapat dikategorikan dalam dua jenis yaitu *unidirectional flow* dan *nonunidirectional flow* serta kombinasi dari dua pola aliran yang disebut *mixed airflow*. Pola aliran udara *cleanroom* ISO Class 5 atau lebih bersih biasanya menggunakan pola aliran *unidirectional flow*, sementara *cleanroom* ISO class 6 atau di bawahnya biasa menggunakan *nonunidirectional flow* dan *mixed flow* (ASHRAE, 2017).

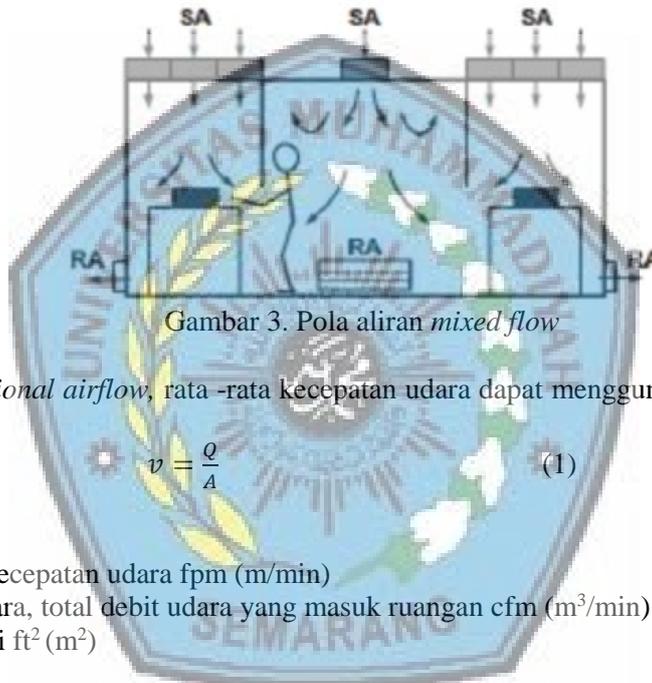
Pola aliran udara tipe *unidirectional flow* terlihat seperti pada gambar 1. Tipe tersebut berfungsi untuk menjaga pola aliran tetap sejajar untuk mengurangi turbulensi udara dalam ruangan *cleanroom*. *Unidirectional flow* biasanya menggunakan kecepatan udara, laju pertukaran udara dan filter udara yang lebih tinggi effisiensinya dibandingkan dengan *nonunidirectional flow* sehingga *unidirectional flow* dapat menghasilkan udara yang lebih bersih dibandingkan dengan pola aliran udara *nonunidirectional flow* seperti terlihat pada gambar 2. Sementara pola aliran udara *mixed flow* merupakan kombinasi dari *unidirectional flow* dan *nonunidirectional flow* seperti pada gambar 3.



Gambar 1. Pola aliran *unidirectional flow*



Gambar 2. Pola aliran *nonunidirectional flow*



Gambar 3. Pola aliran *mixed flow*

Pada *unidirectional airflow*, rata-rata kecepatan udara dapat menggunakan persamaan (1) berikut:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

dengan,

v = rata-rata kecepatan udara fpm (m/min)

Q = suplai udara, total debit udara yang masuk ruangan cfm (m^3/min)

A = Luas lantai ft^2 (m^2)

Pada *nonunidirectional airflow*, menggunakan laju pertukaran udara untuk menentukan air change per hour (ACH) mengikuti persamaan (2) berikut:

$$N = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

dengan,

N = Laju pertukaran udara dalam ruangan (ach)

Q = suplai udara, total debit udara yang masuk ruangan ft^3/h (m^3/h)

V = Volume ruangan ft^3 (m^3)

Sementara itu bila dimensi ruangan diketahui maka laju pertukaran udara dapat menggunakan persamaan (3) berikut:

$$N = \frac{60.Q}{V} = \frac{60.v.A}{A.H} = \frac{60.v}{H} \quad (3)$$

dengan,

Q = suplai udara, total debit udara yang masuk ruangan fpm (m^3/min)

V = Volume ruangan ft^3 (m^3)
 A = Luas lantai ft^2 (m^2)
 v = rata-rata kecepatan udara fpm (m/min)
 H = Tinggi ruangan ft (m)
 N = Laju pertukaran udara dalam ruangan (ach)
= nilai menit dalam satu jam

2.3 PERBEDAAN TEKANAN ANTAR RUANGAN

Arah aliran udara antar ruangan pada *cleanroom* harus dikontrol untuk mencegah terjadinya *cross* kontaminasi udara. Kontaminasi partikel udara dapat terjadi melalui pintu, celah, pipa, *ducting*, dan lain-lain. Metode pengendalian *cross* kontaminasi yang efektif adalah dengan cara mengatur tekanan udara pada suatu ruangan, dimana tekanan udara bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan yang rendah. Biasanya, *cleanroom* terbersih harus dirancang dengan tekanan tertinggi, semakin bersih ruangnya maka semakin tinggi tekanannya, dan semakin kotor/terkontaminasi ruangnya maka semakin rendah tekanannya. Udara harus mengalir dari area terbersih ke sedikit bersih, lalu ke sedikit terkontaminasi, dan kemudian ke area kotor (Yu Wang, Yanju Li, Linchang Zhou, 2015).

3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap debit udara suplai yaitu 150%, 125%, 100%, 75% dan 60%. Nilai variasi debit udara suplai dapat dilihat pada tabel 4. Hasil simulasi ruang *cleanroom* diperoleh ketika hasil perhitungan mendekati konvergen.

Tabel 4. Variasi Debit Udara

No	Persentase Debit Udara Suplai	Debit Udara m^3/h
1	150 %	2430
2	125%	2025
3	100 %	1620
4	75%	1215
5	60%	972

4. HASIL PENELITIAN

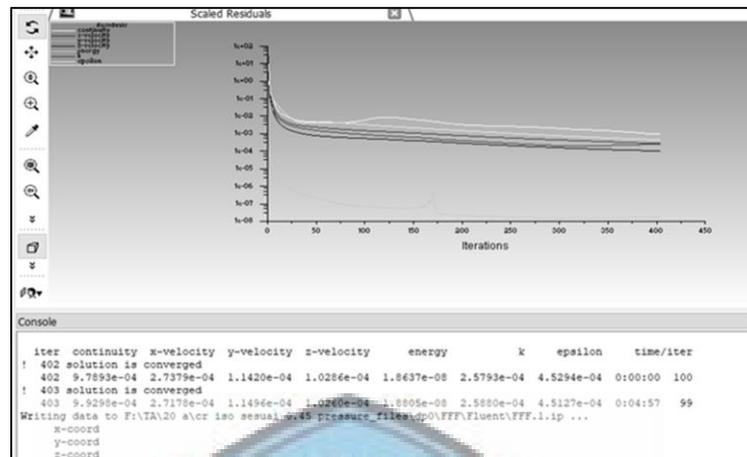
Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap debit udara suplai. Variasi debit udara suplai yang di analisis adalah 150%, 125%, 100%, 75% dan 60%. Nilai variasi debit udara suplai dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Variasi Debit Udara

No	Persentase Debit Udara Suplai	Debit Udara m^3/h
1	150 %	2430
2	125%	2025
3	100 %	1620
4	75%	1215
5	60%	972

Hasil simulasi distribusi temperatur pada ruang *cleanroom* yang telah konvergen terlihat pada Gambar 4. Pada tersebut menunjukkan hasil perhitungan telah konvergen pada iterasi ke-403. Iterasi mencapai konvergen saat nilai *error residual* pada parameter-parameter tertentu berada pada nilai di bawah 0,001 terhadap iterasi sebelumnya. Hal ini menandakan

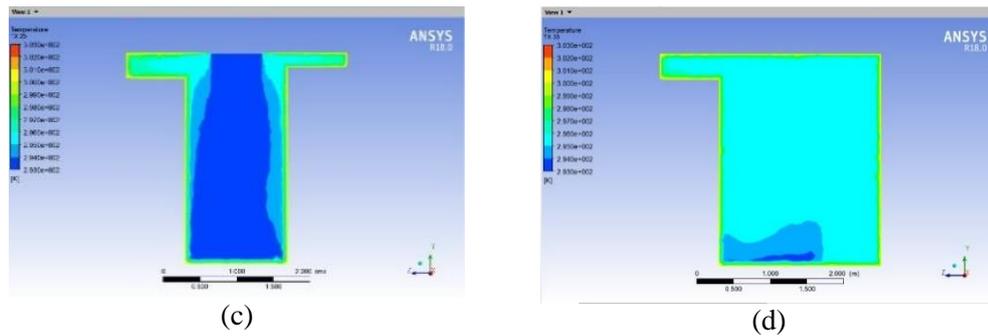
bahwa hasil simulasi sudah tidak berubah secara signifikan lagi terhadap iterasi sebelumnya.



Gambar 4. Iterasi simulasi pada *cleanroom* yang mencapai konvergen

Gambar 5. menampilkan kontur temperatur pada bidang x. Pada posisi $x=1,5$ m udara suplai masuk sehingga temperatur pada posisi $x=1,5$ m lebih dingin dari pada posisi lainnya. Saat udara masuk, udara mengalami turbulensi karena membentur dinding ataupun lantai, sehingga persebaran temperatur tidak merata pada setiap bidang. Pada posisi mendekati $x=0,5$ atau mendekati *return* temperatur udara mengalami kenaikan. Hal ini disebabkan posisi *return* terletak pada dinding yang berbatasan langsung dengan udara luar (kondisi udara tidak dikondisikan). Sementara itu dinding lainnya berbatasan dengan dinding dalam *cleanroom* yang kondisi udaranya sudah dikondisikan. Walaupun kenaikan temperatur tidak terlalu besar berkisar 2-3°C dari temperatur masuk sekitar 20°C. Distribusi pada saat debit udara 100% tidak menunjukkan perbedaan yang jauh dibandingkan dengan debit udara 150% dan 125%. Hal ini menunjukkan persebaran temperatur masih dapat dikatan baik.

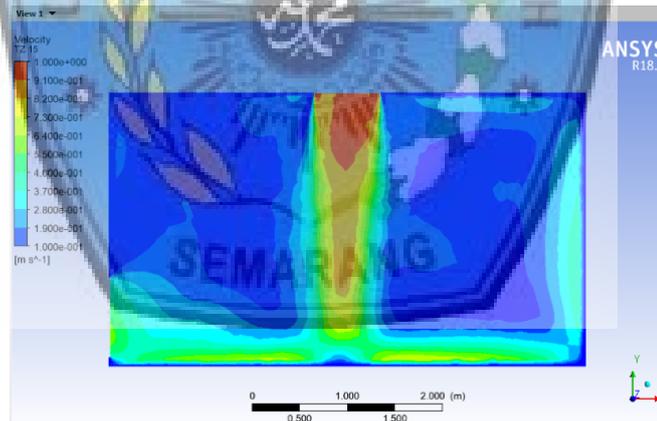




(c) (d)

(e)

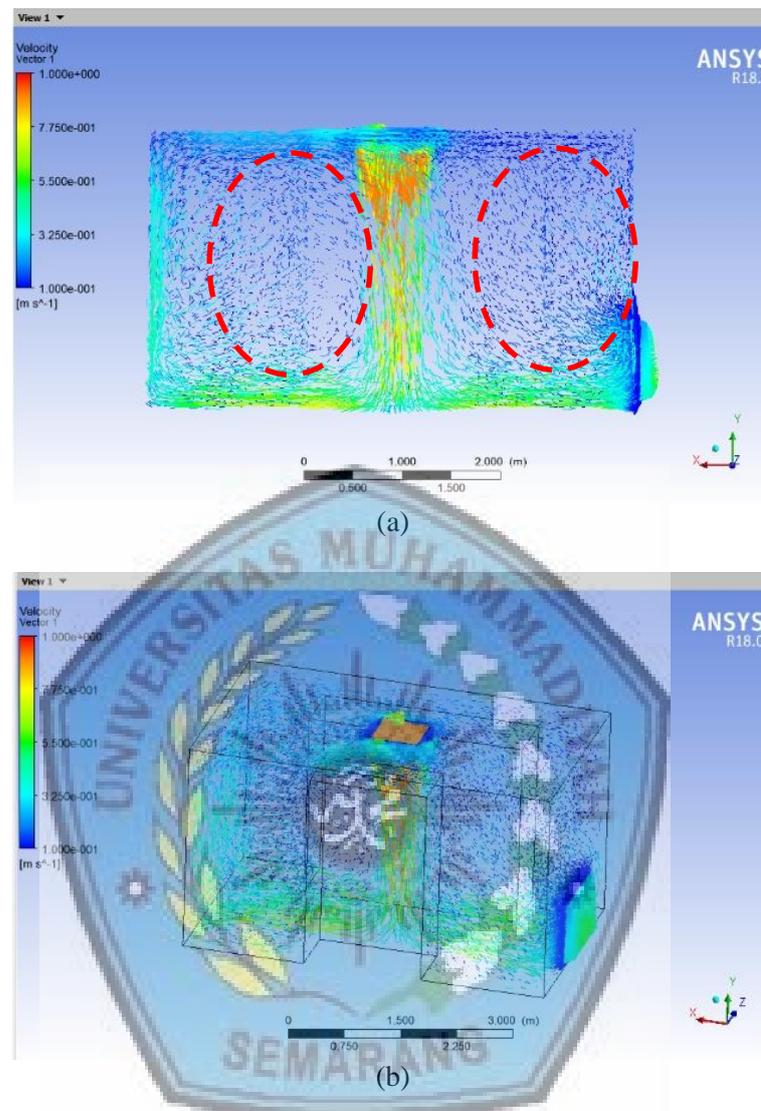
Gambar 5. Kontur Temperatur Udara Suplai 100% pada bidang x pada
(a) 0,5m (b) 1,5m (c) 2,5 m (d) 3,5 m (e) 4,5m



Gambar 6. Kontur Kecepatan Udara Suplai 100% pada bidang z 1,5 m

Gambar 6 menampilkan kontur kecepatan udara pada *cleanroom*. Dapat dilihat kecepatan udara pada saat keluar *inlet* memiliki nilai kecepatan paling besar, setelah itu mengalami perubahan kecepatan setelah membentur lantai.

Selain itu turbulensi juga terjadi saat udara membentur dinding dan pada saat udara menuju *outlet return*. Hal ini dapat dilihat pada lingkaran merah pada gambar 7. Turbulensi terjadi pada *outlet return* terjadi karena penyempitan ruang menuju *return*. Pada gambar 7 terlihat setelah membentur lantai pola aliran udara mengalami turbulensi. Sedangkan pada sisi dinding yang bersebrangan dengan *outlet*, udara mengalami turbulensi saat membentur dinding. Kecepatan udara saat keluar *inlet* berkisar antara 0,8 m/s – 1 m/s, sedangkan kecepatan udara saat keluar *outlet* berkisar 0,1-0,3 m/s.



Gambar 7. Vektor Kecepatan Udara Suplai 100% (a) bidang Z (b) Isometri.

5. SIMPULAN

Variasi debit udara suplai pada *cleanroom* berpengaruh terhadap distribusi temperatur. Debit udara suplai 125% dan 100% sesuai dengan syarat dan kriteria standar dari CPOB ataupun spesifikasi ruangan. Debit udara suplai 150% tidak disarankan untuk ruang *cleanroom* karena tidak memenuhi standar dari kecepatan udara berdasarkan CPOB meskipun temperatur dan tekanan debit udara suplai 150% memenuhi syarat dan kriteria standar dari CPOB ataupun spesifikasi ruangan. Debit udara suplai 75% memenuhi syarat dan kriteria standar dari CPOB tapi tidak memenuhi standar dari spesifikasi ruangan. Debit suplai 60% tidak sesuai dengan syarat dan kriteria standar dari ASHRAE, CPOB ataupun spesifikasi ruangan.

6. REFERENSI

- ASHRAE, 2017, ASHRAE Design Guide for Cleanrooms Fundamentals, Systems And Performance, Atlanta: America Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.
- Lele Zhoua, Wei Suna, Chen Huanga, Hao Lia, Zhijun Zoua, Chongwei Wu, 2017, Studies on Comparison of Particle Concentration Models for Cleanroom, *Procedia Engineering*, 205.
- Mateja Trsan, Katja Seme, Stanko Srcic, 2019, The environmental monitoring in hospital pharmacy cleanroom and microbiota catalogue preparation, *Saudi Pharmaceutical Journal* 27, 455–462.
- Whyte, W., Hejab, M., Whyte, W.M. and Green, G. 2010, Experimental and CFD airflow studies of a cleanroom with special respect to air supply inlets, *International Journal of Ventilation*, 9(3), pp. 197-209.
- Yu Wang, Yanju Li, Linchang Zhou, 2015, Pressure Gradient Control and Energy-saving Operation Strategy Study on a Multi-zone Cleanroom, *Procedia Engineering*, 121.

