การหาอัตราหมุนเวียนอากาศและแผ่นกรองอากาศที่เหมาะสมในห้องสะอาด

1. คุณอภินันท์ ชวดชุม, และ 2. รศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

1. บริษัท เอเอเอฟ อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด

2. อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Apinan.chu@aafthailand.com, Wipawee.t@chula.ac.th

Abstract — ปัจจุบันได้มีหลายอุตสาหกรรมที่จะต้องออกแบบพื้นที่การทำงานให้เป็นแบบห้องสะอาด เพื่อควบคุมฝุ่นและสิ่งปนเปื้อน การใช้ห้องสะอาดมีต้นทุนทั้งต้นทุนด้านพลังงานระหว่างการใช้งานและต้นทุนจากการลงทุนแผ่นกรองอากาศในการกรองฝุ่นและสิ่งปนเปื้อน ผู้ออกแบบในปัจจุบันได้ใช้คู่มือในการออกแบบจากหลายๆ สถาบัน เช่น สถาบัน Environmental Sciences and Technology (IEST) and Food and Drug Administration (FDA) ในการออกแบบระบบห้องสะอาด แต่คู่มือการออกแบบทั้งสองสถาบันนี้ แนะนำเพียงแค่อัตราการหมุนเวียนอากาศภายในระบบที่เหมาะสมสำหรับสภาพอากาศต่างๆ โดยไม่ได้แนะนำประเภทของแผ่นกรองอากาศที่เหมาะในแต่ละอัตราหมุนเวียนอากาศ ทำให้ผู้ออกแบบต้องเลือกใช้แผ่นกรองอากาศตามความชำนาญและประสบการณ์ที่เคยมี ทำให้บางครั้งเลือกใช้แผ่นกรองอากาศที่มีคุณสมบัติเกินกว่าความต้องการหรือใช้แผ่นกรองอากาศที่มีคุณภาพต่ำทำให้ต้องเสียค่าพลังงานมากขึ้นในระหว่างการใช้งานเพื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนอากาศ บทความนี้ได้นำเสนอแนวทางในการเลือกใช้อัตราการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะตามรูปแบบแผ่นกรองที่เลือกใช้และปัจจัยของฝุ่นที่ในแต่ละรูปแบบของห้องสะอาด

1. ลักษณะห้องสะอาด

ห้องสะอาด (Clean Room) คือห้องที่มีการควบคุมปริมาณฝุ่นในพื้นที่ มีมาตรการควบคุมตัวก่อกำเนิดฝุ่น ทั้งจากตัวคน เครื่องจักร อุปกรณ์ รวมถึง

อากาศจากภายนอกที่จะเข้าสู่พื้นที่ควบคุมความสะอาด ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน การเติมเต็มอากาศ หรือการรั่วไหลเข้ามาของอากาศ การออกแบบห้องสะอาด โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบให้เป็นแบบแรงดันเป็นบวก (Positive Pressure) โดยการทำให้แรงดันอากาศภายในสูงกว่าห้องข้างเคียงเพื่อดันฝุ่นจากข้างในให้ออกข้างนอก หากระบบมีการเปิดทั้งจากการเข้าออกของคน เครื่องจักรอุปกรณ์ หรือรอยรั่วต่างๆจากการก่อสร้างหรือชำรุดจากการใช้งาน อุตสาหกรรมที่นิยมออกแบบพื้นที่การทำงานให้เป็นห้องสะอาด ได้แก่ อุตสาหกรรมตู้ปลอดเชื้อ (Clean Benches) อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ (Semi conductor) อุตสาหกรรมยา (Pharmaceutical) อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารและชีวภาพ (Biotech Food processing) และ โรงพยาบาล (Hospital)

เมื่อกล่าวถึงห้องสะอาดแล้วนั้น กระบวนการบำบัดอากาศโดยการกรองฝุ่นก่อนนำเข้ามาใช้งานถือว่าสำคัญอย่างมาก การที่จะดักกรองฝุ่นได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้แผ่นกรองอากาศในการใช้งานจะต้องบำบัดฝุ่นให้สอดคล้องกับมาตรฐานที่ยอมรับของการทำห้องสะอาด

<u>ตารางที่ 1</u> : Clean room class [1]

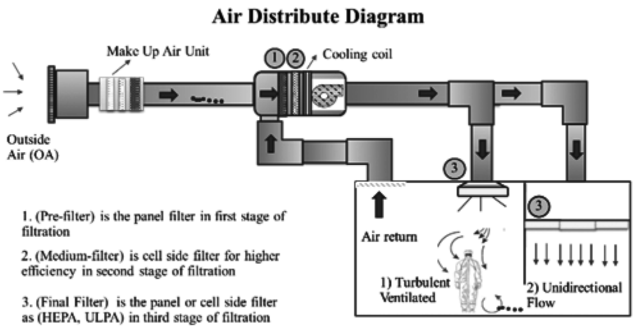
FED 209E	ISO 14644	0.1 µm	0.2 µm	0.3 µm	0.5 µm*	1 µm	5 µm
----	Class 1	10	2				
	Class 2	100	24	10	----		
1	Class 3	1,000	237	102	(1)	8	
10	Class 4	10,000	2,370	1,020	(10)	83	
100	Class 5	100,000	23,700	10,200	(100)	832	29
1000	Class 6	1,000,000	237,000	102,000	(1,000)	8,320	293
10000	Class 7				(10,000)	83,200	2,930
100000	Class 8				(100,000)	832,000	29,300
	Class 9				(1,000,000)	8,320,000	293,000

*Particle count for this particular size is per ft^3 (for illustration purposes) while all others are m^3.

จากตารางที่ 1 แสดงมาตรฐานสำหรับห้องสะอาด เพื่อให้รู้ว่าระดับความสะอาดนั้นนั้นสามารถเปรียบเทียบของ 2 มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับได้ ดังตัวอย่างหาก ต้องการทำห้องสะอาดตามมาตรฐาน FED-209E ที่ระดับ Class 1000 แล้วสามารถที่จะเทียบได้เท่ากับการทำห้องสะอาดตามมาตรฐาน ISO 14644 ที่ระดับ Class 6

จากมาตรฐานพบว่าปริมาณฝุ่นที่ยอมรับได้สูงสุดของขนาดฝุ่นที่ 0.5 ไมครอน คือ 1,000 อนุภาคใน 1 ลูกบาศก์ฟุต

โดยทั่วไปหลักการออกแบบห้องสะอาดจะมีด้วยกัน 2 ลักษณะแบ่งตามลักษณะของการไหลของอากาศที่วิ่งผ่านแผ่นกรองอากาศดังนี้ 1)Turbulent Ventilate คือการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ผ่านแผ่นกรอง นิยมใช้กับห้องสะอาดที่ระดับเกณฑ์ของห้องสะอาดที่ไม่สูงมาก ฝุ่นที่เกิดขึ้นภายในระบบมีผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงานที่ไม่สูงมาก และ 2)Unidirectional Flow (Laminar) คือการไหลของอากาศเป็นแบบกระแสตรงจากบนลงล่าง[2] นิยมออกแบบสำหรับห้องสะอาดที่มีระดับเกณฑ์ค่อนข้างสูง ฝุ่นที่เกิดขึ้นภายในระบบมีผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน ลักษณะของห้องสะอาดที่ดีนั้นจะต้องมีการเติมเต็มของอากาศที่มีการควบคุมปริมาณฝุ่นที่หลุดลอดมาให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ ผ่านกระบวนการกรองฝุ่นตามลำดับ และฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบจะต้องนำไปบำบัดหมุนเวียนต่อ จนปริมาณฝุ่นลดลงเหลืออยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ลักษณะการกรองฝุ่นโดยทั่วไปจะมีการกรองฝุ่น ตามลำดับตามรูปที่ 1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 ตัวอย่างการออกแบบห้องสะอาด

1. ชุดกรองฝุ่นเบื้องต้น (Make up Air Unit) เป็นการกรองฝุ่นเพื่อลดปริมาณฝุ่น ให้อยู่ในเกณฑ์การออกแบบสำหรับนำไปคำนวณการเลือกใช้ชุดแผ่นเพื่อทำห้องสะอาดในระดับต่างๆ ที่ต้องการ บางอุตสาหกรรมไม่มีการใช้ชุดกรองฝุ่นตัวนี้

2. การกรองฝุ่นเบื้องต้นโดยใช้แผ่นกรองหยาบ (Pre Filter) ใช้สำหรับกรองฝุ่นขนาดใหญ่ออกเบื้องต้น เพื่อลดภาระการกรองฝุ่นของตัวกรองในชั้นถัดไป แผ่นกรองหยาบจะนิยมบรรจุในส่วนของเครื่องส่งลมเย็น AHU (Air Handling Unit) ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่กระบวนการทำลมเย็น โดยผ่านคอยล์เย็น นิยมออกแบบให้ใช้รับลมที่อัตราความเร็วลม 2.5 เมตรต่อนาที [3]

3. การกรองฝุ่นละเอียดขึ้นในระดับกลาง แผ่นกรองละเอียดระดับกลาง (Medium Filter) จะกรองฝุ่นขนาดที่เล็กขึ้น ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นกว่าแผ่นกรองเบื้องต้นโดยประมาณ 2 เท่า ตำแหน่งติดตั้งจะติดตั้งในชุดเป่าลมเย็น (AHU) หลังแผ่นกรองหยาบก่อนเข้าคอยล์เย็น ระยะห่างเว้นให้เพียงพอต่อการถอดเข้าออกเพื่อการติดตั้งและซ่อมบำรุง นิยมออกแบบให้ใช้รับลมที่อัตราความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที [3]

4. การกรองฝุ่นละเอียดขั้นสุดท้าย (Final Filter) หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่า แผ่นกรองละเอียดระดับสูง (HEPA) หรือ แผ่นกรองฝุ่นละเอียดระดับสูงสุด ULPA Filter (Ultra Low Particle Air) เป็นแผ่นกรองอากาศที่ประสิทธิภาพสูง อายุการใช้งานนานนิยมติดตั้งที่บริเวณท่อส่งอากาศขั้นสุดท้ายหรือ ฝ้าเพดานพื้นที่การทำงาน ความเร็วลมที่ใช้งานอยู่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที [3]

2. การเลือกใช้อัตราหมุนเวียนอากาศแบบปัจจุบัน

ตารางที่ 2 แนวทางการเลือกใช้ชนิดของแผ่นกรองอากาศแบบปัจจุบัน [1][6]

ISO Class	Fed 209E Class	Pre-Medium-Final Filter Efficiency	Air Velocity at table level in FPM	Air Changes Rate per Hour
1	-		72 - 130	>750
2	-		72 - 130	>750
3	1	30%, 90-95%, 99.99995%	72 - 130	>750
4	10	30%, 90-95%, 99.9995%	72 - 110	500 - 600
5	100	30%, 90-95%, 99.999%	72 - 90	150 - 400
6	1,000	30%, 90-95%, 99.999%	25 - 40	60 - 100
7	10,000	25%, 80-90%, 99.99%	10 - 15	25 - 40
8	100,000	25%, 80-90%, 95%	3 - 5	5-10

ตัวอย่าง หากลูกค้าต้องการทำห้องสะอาด ที่ห้องระดับชั้นที่ยอมรับฝุ่นได้ 1,000 อนุภาคในหนึ่งลูกบาศก์ฟุต หากใช้ตารางนี้สามารถที่จะเลือกใช้แผ่นกรองอากาศที่รับลมได้ตั้งแต่ 25-40 ฟุตต่อนาทีและสามารถที่จะปรับเปลี่ยนอัตราการหมุนเวียนอากาศได้ตั้งแต่ 60-100 รอบต่อชั่วโมง ซึ่งวิธีการปัจจุบันจะนำข้อมูลเพียงส่วนนี้ไปเลือกชนิดแผ่นกรองตามที่ระบุ

ในตาราง โดยจะเลือกใช้รูปแบบแผ่นกรองตามลำดับดังนี้ แผ่นกรองหยาบประสิทธิภาพ 30% แผ่นกรองระดับกลาง 95% และแผ่นกรองระดับสูง 99.999% และคำนวณจำนวนแผ่นกรองให้สอดคล้องตามข้อกำหนดลูกค้า ซึ่งจะต้องเสียเวลาในการคำนวณหาต่อไป และเมื่อได้จำนวนมาแล้ว ยังไม่สามารถรู้ได้ว่าชนิดแผ่นกรองอากาศที่เลือกให้ลูกค้า เหมาะสมที่สุดแล้วหรือไม่เพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดของคุณภาพ

3. การประยุกต์ใช้การเลือกอัตราการหมุนเวียนโดยพิจารณาปัจจัยในห้องสะอาด

ห้องสะอาดที่มีการควบคุมจะมีแผ่นกรองอากาศทำหน้าที่ในการกรองฝุ่นเพื่อไม่ให้เข้าสู่ในระบบแผ่นกรองอากาศจะมีลักษณะลำดับการกรองเริ่มตั้งแต่การกรองฝุ่นหยาบเบื้องต้นการกรองฝุ่นละเอียดระดับกลางและการกรองฝุ่นละเอียดระดับสูงห้องสะอาดที่ต้องควบคุมฝุ่นให้อยู่ในเกณฑ์จำนวนอนุภาคที่กำหนดนั้นหลังจากอากาศไหลผ่านแผ่นกรองทั้ง 3 แล้ว จะมีฝุ่นที่หลงเหลือจากการกรองส่วนหนึ่งรวมกับฝุ่นที่เกิดขึ้นจากภายในระบบเองถ้าหากมีค่าเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอบรับได้ฝุ่นที่หลงเหลืออยู่ในนั้นจะต้องนำไปผ่านแผ่นกรองทั้ง 3 ชั้นใหม่ตามรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า อนุภาคฝุ่นเมื่อเข้ามาในระบบจะถูกกรองด้วยแผ่นกรอง 3 ชั้น เรียงลำดับตามประสิทธิภาพที่กรองได้จากน้อยไปมาก ฝุ่นที่หลงเหลือจากการกรองแล้ว จะเข้าไปอยู่ในพื้นที่การทำงาน และในขณะเดียวกันก็จะมีฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการทำงานและกระบวนการผลิตด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำฝุ่นในพื้นที่การทำงานนั้นกลับเข้ามากรองใหม่จนกว่าจะหลงเหลือปริมาณฝุ่นที่ยอมรับได้ในเกณฑ์ของระดับห้องสะอาด ซึ่งหากฝุ่นที่หลุดลอดมีปริมาณมากจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือเพิ่มรอบการแลกเปลี่ยนนำอากาศไปกรองใหม่ต่อชั่วโมงให้สูงขึ้น

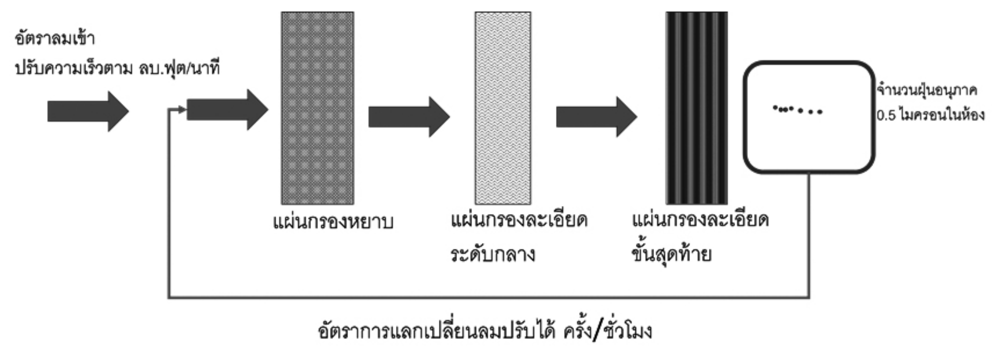
4. ข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการออกแบบห้องสะอาด [4]

4.1 คุณสมบัติแผ่นกรองอากาศ

แผ่นกรองอากาศแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คุณสมบัติหลักของแผ่นกรองอากาศที่นำมาพิจารณาเลือกใช้ได้แก่

4.1.1 ประสิทธิภาพแผ่นกรองอากาศ

ประสิทธิภาพแผ่นกรองอากาศคือ ค่าความสามารถในการกรองฝุ่นได้ของแผ่นกรองอากาศ ซึ่ง



รูปที่ 2 ลักษณะของลำดับการกรอง ตั้งแต่อัตราลมที่เข้าจนถึงการกรองฝุ่นให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณฝุ่นด้านขาเข้าที่สามารถกรองได้ ตัวอย่างเช่น แผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพ 95% ความหมายคือ หากฝุ่นด้านขาเข้ามีจำนวน 100 อนุภาค ฝุ่นที่สามารถกรองได้ที่ 95 อนุภาค และหลุดลอดไปได้เพียงแค่ 5 อนุภาค ประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศขึ้นอยู่กับการออกแบบเนื้อแผ่นกรองเพื่อการดักจับฝุ่นตามทฤษฎีการดักจับฝุ่น

4.1.2 ปริมาณลมที่รับได้ของแผ่นกรองอากาศ

แผ่นกรองอากาศในแต่ละชนิดจะออกแบบเพื่อการรองรับปริมาณลมได้ที่แตกต่างกัน ทั้งขึ้นอยู่กับพื้นที่ของเนื้อแผ่นกรองอากาศที่บรรจุในกรอบของแผ่นกรองอากาศ ปริมาณเนื้อแผ่นกรองที่มากขึ้นหน้าสัมผัสการรับลมก็จะมากขึ้น ปริมาณลมที่วิ่งผ่านได้ก็จะมากขึ้นตาม ดังนั้นการออกแบบแผ่นกรองอากาศที่ให้หนามากขึ้นเพื่อเพิ่มเนื้อแผ่นกรองสามารถทำให้แผ่นกรองรับปริมาณลมได้มากขึ้น

4.1.3 แรงดันตกคร่อมของแผ่นกรองอากาศ

แรงดันตกคร่อมของแผ่นกรองอากาศสามารถวัดได้จากค่าผลต่างของแรงดันอากาศด้านขาเข้ากับด้านขาออก แผ่นกรองอากาศที่เลือกใช้ชนิดและรูปแบบของเนื้อที่แตกต่างกัน ทำให้แรงดันลมที่ไหลผ่านแผ่นกรองลดต่ำแตกต่างกัน แรงดันนี้มีผลโดยตรงต่อความเร็วของลมที่ลดลง ทำให้ปริมาณอากาศที่เติมเข้าไปในระบบมีไม่เพียงพอ ความดันในห้องปฏิบัติงานลดต่ำกว่าห้องข้างเคียง ซึ่งจะทำให้ฝุ่นจากภายนอกไหลเข้าสู่ในระบบได้

4.1.4 ราคาแผ่นกรองอากาศ

ราคาแผ่นกรองอากาศในแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน แผ่นกรองหยาบจะมีราคาที่ต่ำที่สุด แผ่นกรองที่ละเอียดขึ้นราคาก็จะเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการนำราคาของแผ่นกรองอากาศเพื่อนำไปคำนวณการเปรียบเทียบ ได้นำปัจจัยในส่วนของอายุการใช้งานเข้ามาคิดด้วย โดยทั่วไปแผ่นกรองอากาศเบื้องต้นจะมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 3 เดือน ดังนั้นต้นทุนใน 1 ปีจะเป็น 4 เท่าของราคาแผ่นกรองอากาศนั้น ส่วนแผ่นกรองระดับกลางอายุการใช้งานอยู่ที่ 6 เดือนต้นทุนใน 1 ปีจะเป็น 2 เท่าของราคาแผ่นกรองอากาศนั้น ส่วนแผ่นกรองระดับสูงอายุการใช้งานอยู่ที่ 1 ปี ดังนั้นต้นทุนต่อปีสามารถคิดที่ราคาของแผ่นกรองนั้นๆได้

4.2 อัตราการหมุนเวียนอากาศต่อชั่วโมง

อัตราการหมุนเวียนอากาศต่อชั่วโมง เป็นจำนวนรอบที่จะแสดงถึงจำนวนรอบการนำอากาศที่มีอยู่ทั้งหมดในห้องไปกรองใหม่ เพื่อให้ฝุ่นที่หลงเหลือในระบบให้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ การนำฝุ่นไปกรองใหม่นี้จุดประสงค์เพื่อที่จะต้องการนำฝุ่นที่เกิดขึ้นในห้องไปกรองก่อนที่จะนำอากาศมาใช้ใหม่ ดังนั้นจำนวนรอบตัวนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบและความสามารถของการกรองได้ของแผ่นกรองอากาศ

4.3 ข้อกำหนดห้องสะอาดจากผู้ใช้งาน

4.3.1 ระดับความสะอาดของห้องสะอาด

ระดับความสะอาดของห้องสะอาดจะถูกกำหนดมาจากลูกค้า ในที่นี้จะระบุมาในรูปแบบของระดับของห้องสะอาด (Clean Room Class) ดังนั้นฝุ่นที่หลงเหลือมาภายในระบบจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าเกณฑ์ระดับห้องสะอาด โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อฝุ่นที่อยู่ระบบมาจาก 2 ส่วนดังนี้คือ ฝุ่นที่เข้ามาจากภายนอกและฝุ่นที่เกิดขึ้นจากภายในระบบ

1) ฝุ่นจากภายนอก

ในแต่ละพื้นที่หรือชุมชนขนาดฝุ่นและปริมาณฝุ่นจะแตกต่างกัน การออกแบบห้องสะอาดจะนำเอาข้อมูลนี้ ไปเป็นข้อมูลการอ้างอิงในการคำนวณต่อไป ซึ่งบางครั้งผู้ออกแบบจะมีการเก็บ

ขนาด (ไมครอน)	จำนวนเฉลี่ย
0.01 – 0.02	173,929,613
0.02 – 0.05	338,577,845
0.05 – 0.10	395,213,491
0.10 – 0.22	906,959,672
0.22 – 0.46	501,288,728
0.46 – 1.00	69,890,564
1.00 – 2.15	3,801,973
2.15 – 4.64	212,705
4.64 – 10.0	15,235
10.0 – 21.54	645
21.54 +	28
รวม	2,389,890,499

รูปที่ 3 ปริมาณฝุ่นขาเข้าโดยทั่วไป ฝุ่นในเมืองในปริมาณ 1 ลูกบาศก์ฟุต [6]

สำรวจที่พื้นที่จริง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลา หากมีข้อจำกัดด้านนี้ทางผู้ออกแบบนิยมที่จะเลือกใช้ขนาดและปริมาณฝุ่นตามที่เคยมีอ้างอิงตามตัวอย่างในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 ในชุมชนเมืองโดยตัวไปจะมีปริมาณฝุ่นตามแต่ละขนาดที่แตกต่างกัน อ้างอิงจากการเก็บตัวอย่างของมาตรฐาน ASHERE ซึ่งจำนวนอนุภาคฝุ่นด้านขาเข้าโดยทั่วไปในรูปที่ 3 อยู่ที่ประมาณ 2.389 ล้านตัวต่อลูกบาศก์ฟุต จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าฝุ่นจะมีขนาดและจำนวนในแต่ละขนาดจะแตกต่างกันออกไป แต่จำนวนอนุภาคฝุ่นที่ใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาระดับของห้องสะอาด จะเป็นฝุ่นที่ขนาดใหญ่ตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไป กล่าวคือ ถ้าระดับชั้นของห้องสะอาด (Class) 1000 จะยอมรับที่ขนาดฝุ่นที่ใหญ่กว่า 0.5 ไมครอน ไม่เกินกว่า 1,000 อนุภาค ดังนั้นการคำนวณปริมาณฝุ่นขาเข้ามาในระบบ คือฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมครอนขึ้นไป ซึ่งมีอยู่ประมาณ 74 ล้านตัวต่อลูกบาศก์ฟุต โดยฝุ่นที่เล็กกว่า 0.5 ไมครอนไม่ได้นำมาพิจารณาในการกำหนดระดับชั้นของห้องสะอาด จึงไม่ได้นำมาคำนวณเป็นจำนวนอนุภาคฝุ่นด้านขาเข้าเริ่มต้นในระบบ แต่ด้วยฝุ่นด้านขาเข้านี้มีปริมาณฝุ่นจำนวนมากหากปล่อยเข้ามาในระบบโดยตรงจะมีผลต่ออายุการใช้งานของแผ่นกรองอากาศ ซึ่งแผ่นกรองอากาศจะหมดอายุการใช้งานเร็วขึ้น ดังนั้นทางผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบจะมีการติดตั้งชุดกรองฝุ่นเบื้องต้น (Make Up Air Unit) เพื่อกรองฝุ่นหรือสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่ เช่น ขนนก แมลง ดอกหญ้า เป็นต้น ให้น้อยลงก่อนที่จะนำอากาศเข้ามาหมุนเวียนในระบบ ค่าปริมาณฝุ่นที่หลงเหลือจากชุดกรองเบื้องต้นนี้ทางผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบจะเป็นคนกำหนดมาให้

2) ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นจากภายในระบบ

ฝุ่นหรือสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจากในระบบเองในที่นี้คือฝุ่นเกิดจากกระบวนการผลิตหรือเกิดจากผู้ปฏิบัติงานเอง ฝุ่นในส่วนนี้จะถูกนำมากรองโดยใช้วิธีของการดูดกลับอากาศภายใน ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบกระบวนการผลิตนั้น ลูกค้าสามารถสำรวจได้ตามหน้างานจริง ลักษณะของกระบวนการผลิตและกิจกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจะมีผลทำให้ฝุ่นเกิดขึ้นจากภายในระบบ ที่แตกต่างกัน บางครั้งทางผู้ออกแบบสามารถที่จะประเมินจากตารางที่ 3 หรือเทียบเคียงกับโครงการที่มีการผลิตแล้วก่อนหน้าก็ได้

ตารางที่ 3 ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการทำงานของพนักงานในแต่ละลักษณะการเคลื่อนไหว[2]

กิจกรรม	ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้น (ขนาด ≥ 0.5 ไมครอน)
นั่งนิ่งหรือยืนนิ่งอยู่กับที่	100,000
นั่งทำงาน ไม่มีการเคลื่อนไหว	500,000
นั่งทำงาน มีการเคลื่อนไหว	1,000,000
ยืนทำงาน	2,500,000
เดินช้าๆ	5,000,000
เดินปกติ	7,500,000
เดินที่ความเร็ว 2.5 เมตร	10,000,000
เคลื่อนไหวแบบออกกำลัง	15,000,000-30,000,000

4.3.2 ขนาดของห้องสะอาด

ขนาดของห้องสะอาดจะมีผลต่อปริมาณของอากาศที่จะป้อนเข้าภายในระบบมีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยหน่วยของขนาดของห้องจะระบุเป็นกว้าง ยาว สูง หน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุต

4.3.3 แรงดันตกคร่อมสูญเสียสูงสุด

ค่าแรงดันตกคร่อมสูญเสียสูงสุดที่จะรับได้ในระบบ ลูกค้าหรือผู้ออกแบบจะเป็นคนกำหนดมา โดยค่าแรงดันตกคร่อมตัวนี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อมอเตอร์พัดลมส่งอากาศ แรงตกคร่อมสูญเสียที่สูงขึ้นทำให้ความเร็วรอบของลมที่ส่งต่ำลง ดังนั้นถ้าหากต้องการทำรอบให้ได้ความเร็วลมที่เท่าเดิมจะต้องเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้น

4.3.4 อัตราการไหลของอากาศสูงสุดภายในระบบ

อัตราการไหลของอากาศภายในระบบสามารถที่จะคำนวณได้จาก ปริมาตรของห้องสะอาดคูณด้วยจำนวนรอบของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศจะได้ปริมาตรอากาศต่อหน่วยชั่วโมง ดังนั้นค่าปริมาตรอากาศนี้จะได้มาโดยตรงจากความสามารถในการทำรอบอัตราการส่งอากาศ จากกำลังของพัดลมส่งอากาศที่เลือกใช้ ซึ่งในการคำนวณจะระบุเป็นรอบของอัตราการแลกเปลี่ยนที่สูงที่สุดที่สามารถทำได้

5. การหาอัตราการหมุนเวียนอากาศ

ด้วยระบบห้องสะอาดที่มีความจำเป็นในการบำบัดฝุ่นทั้งจากภายนอกและฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเองนั้น Shang [1] ได้ทำการคำนวณอัตราการหมุนเวียนอากาศที่ต้องบำบัด อันเกิดมาจากฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ได้สรุปการคำนวณ Air Chang Rate ไว้ดังนี้คือ

$A = G/(X-S)$

A = Air Change Rate per Hour

G = อัตราการเกิดฝุ่นจากกระบวนการภายในอนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง

X = ระดับห้องสะอาด คือ ฝุ่นตามมาตรฐานที่ยอมรับใน 1 ลูกบาศก์ฟุต

S = ปริมาณฝุ่นที่หลงเหลือจากการกรองต่อครั้งใน 1 ลูกบาศก์

ซึ่งสามารถที่จะกำหนดค่าของ S ปริมาณฝุ่นที่หลงเหลือได้ดังต่อไปนี้

$s = S_{MAU} \times (1-E_{Pre}) \times (1-E_{Medium}) \times (1-E_{HEPA})$ [12]

s = ปริมาณฝุ่นที่หลงเหลือจากการกรองต่อครั้งใน 1 ลูกบาศก์ฟุต

S_{MAU} = ปริมาณฝุ่นที่หลงเหลือจากการผ่านชุดกรองฝุ่นเบื้องต้น (MAU) ใน 1 ลูกบาศก์ฟุต

E_{Pre} = ประสิทธิภาพของแผ่นกรองเบื้องต้น (%)

E_{Medium} = ประสิทธิภาพของแผ่นกรองระดับกลาง (%)

E_{HEPA} = ประสิทธิภาพของแผ่นกรองระดับสูง (%)

6. ค่าเป้าหมายในการพิจารณาเลือกใช้อัตราแลกเปลี่ยนอากาศและแผ่นกรอง

ค่าเป้าหมายในการพิจารณาในที่นี้คือต้นทุนในการทำห้องสะอาดสามารถแบ่งที่มาได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

6.1 ค่าต้นทุนแผ่นกรองอากาศที่ใช้งาน โดยคุณสมบัติของแผ่นกรองอากาศมีผลต่อราคาดังนี้

- แผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงจะมีราคาสูง
- แผ่นกรองอากาศที่รับลมได้มากขึ้น ราคาจะสูงขึ้น
- แผ่นกรองอากาศที่แรงดันตกคร่อมต่ำ ราคาจะสูงขึ้น

6.2 ค่าพลังงานไฟฟ้า

ค่าพลังงานไฟฟ้ามีที่มาจาก 2 ปัจจัยหลักดังนี้คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ และแรงดันตกคร่อมสูญเสีย

6.2.1 อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (Air Change Rate) สูงค่าไฟเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าจากค่ากำลังของพัดลมส่งอากาศสามารถคำนวณในรูปของอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศได้ดังนี้

กำหนด

A = อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (ต่อชั่วโมง)

$RoomSize$ = ขนาดห้อง (ลูกบาศก์ฟุต)

$EnergyEfficiencyRaito$ = ประสิทธิภาพพลังงานเครื่องส่งลมเย็น (กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) กำหนดเท่ากับ 0.8 [7]

$UnitPowerCost$ = หน่วยค่าไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) กำหนดเท่ากับ 3

$WorkingTime$ = ชั่วโมงทำงาน (ชั่วโมงต่อปี) กำหนดเท่ากับ 7,120

ค่าพลังงานไฟฟ้าจากค่ากำลังของพัดลมส่งอากาศ (บาทต่อปี) [7]

$$= \frac{A}{60} \times \mathrm{RoomSize} \times EnergyEfficiencyRaito \times UnitPowerCost \times WorkingTime$$

6.2.2. แรงดันที่ตกคร่อมสูงขึ้นทำให้ต้องปรับรอบมอเตอร์ ให้สูงขึ้น ค่าไฟฟ้าเพิ่มจึงเพิ่มขึ้น ต้นทุนส่วนต่างจากค่าไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมสูญเสียของแผ่นกรองอากาศสามารถที่จะคำนวณได้ดังนี้

กำหนด

$PressureDrop$ = ค่าแรงดันตกคร่อมสูญเสีย (ปาสคาล หรือ นิวตันต่อตารางเมตร)

A = อัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (ต่อชั่วโมง)

$RoomSize$ = ขนาดห้อง (ลูกบาศก์ฟุต)

$SystemFlow = \frac{A}{60} \times RoomSize$ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) หรือ $\frac{A}{60} \times RoomSize * 1.7$ (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

$FanCoefficiency$ = ประสิทธิภาพสมรรถนะเครื่องส่งลมเย็นกำหนด 1.22 [6]

$FanEfficiency$ = ประสิทธิภาพมอเตอร์เครื่องส่งลมเย็นกำหนด 0.55 [6]

$Unit\ Power\ Cost$ = หน่วยค่าไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) กำหนดเท่ากับ 3

$Working\ time$ = ชั่วโมงทำงาน (ชั่วโมงต่อปี) กำหนดเท่ากับ 7,120

พลังงานไฟฟ้าจากที่เกิดจากแรงดันตกคร่อมสูญเสีย (กิโลวัตต์) [8]

$$= \frac{PressureDrop\frac{N}{M^2} \times SystemFlow\frac{M^3}{Hour} \times Fan\ Coefficiency}{Fan\ Efficiency \times \frac{1000W}{KW} \times \frac{60Minute}{Hour} \times \frac{60Second}{Minute}}$$

(พลังงานไฟฟ้า 1 วัตต์มีค่าเท่ากับ 1 นิวตันเมตรต่อวินาที)

ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนส่วนต่างจากค่าไฟฟ้าต่อปีได้ดังนี้ (บาทต่อปี)

$$= \frac{PressureDrop\frac{N}{M^2} \times SystemFlow\frac{M^3}{Hour} \times Fan\ Coefficiency}{Fan\ Efficiency \times \frac{1000W}{KW} \times \frac{60Minute}{Hour} \times \frac{60Second}{Minute}}$$

$$\times UnitPowerCost \times WorkingTime$$

จากค่าเป้าหมายที่ได้กำหนดนั้น จะต้องเลือกตัวแปรตัดสินใจ ในที่นี้คือชนิดของแผ่นกรองอากาศและจำนวนรอบของการแลกเปลี่ยนอากาศ ที่จะทำให้ค่าเป้าหมายในในการลงทุนทำห้องสะอาดให้น้อยที่สุด

7. ประยุกต์ใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์

วิธีการคำนวณการใช้แผ่นกรองอากาศและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศในปัจจุบันผู้ใช้งานจะกำหนดเงื่อนไขในการทำห้องสะอาดดังนี้

- ระดับของห้องสะอาด (Cleanroom Class) (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต)
- ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้ามาในระบบ (Supply Concentrate) (อนุภาคต่อ ลูกบาศก์ฟุต)
- ค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุด (Max Pressure Drop) (ปาสคาล)
- อัตราการเกิดฝุ่นภายในระบบ (Internal Generate) (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง)
- ขนาดห้องสะอาด (ลูกบาศก์ฟุต)

ซึ่งจะต้องสร้างแบบจำลองการคำนวณหาค่าความเหมาะสมที่สุดของแผ่นกรองอากาศและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ ที่สอดคล้องตามเงื่อนไขที่กำหนด

7.1 กำหนดเซตของตัวแปร

I = เซตของแผ่นกรองอากาศเบื้องต้น

$i = 1, ..., n$

J = เซตของแผ่นกรองอากาศระดับกลาง

$j = 1, ..., m$

K = เซตของแผ่นกรองอากาศระดับสูง

$k = 0, ..., l$

(เป็น 0 ในกรณีที่ไม่มีการใช้ชนิดแผ่นกรองละเอียดระดับสูงในรูปแบบนั้นๆ)

7.2 กำหนดตัวแปรตัดสินใจ

- $$Y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{หากเลือกแผ่นกรองระดับต้น } i \text{ แผ่นกรองระดับกลาง } j \text{ และแผ่นกรองระดับสูง } k \\ 0, & \text{อื่นๆ} \end{cases}$$

- *EnergyCost2* : ต้นทุนส่วนต่างจากค่าไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมสูญเสียของแผ่นกรองอากาศ(บาทต่อปี)

7.3 พารามิเตอร์

1) ต้นทุนของแผ่นกรองอากาศแต่ละชนิดในสมการเป้าหมาย

- $Pcost_i$ = ต้นทุนแผ่นกรองเบื้องต้น i (บาทต่อชิ้นต่อปี)
- $Mcost_j$ = ต้นทุนแผ่นกรองระดับกลาง j (บาทต่อชิ้นต่อปี)
- $Hcost_k$ = ต้นทุนแผ่นกรองระดับสูง k (บาทต่อชิ้นต่อปี)

2) ค่าแรงดันตกคร่อมสูญเสียของแผ่นกรองในแต่ละรูปแบบ

- $Pressure\ Drop_{ijk}$ = แรงดันตกคร่อมสูญเสียเมื่อใช้แผ่นกรองหยาบ

i, แผ่นกรองละเอียดระดับกลาง

j, แผ่นกรองระดับสูง k (ปาสคาล)

3) ความสามารถในการรับอัตราความเร็วลมของแผ่นกรองแต่ละชนิด

- $Pflow_i$ = อัตราการไหลที่สามารถรับได้ของแผ่นกรองระดับต้น i (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)
- $Mflow_j$ = อัตราการไหลที่สามารถรับได้ของแผ่นกรองระดับกลาง j (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)
- $Hflow_k$ = อัตราการไหลที่สามารถรับได้ของแผ่นกรองระดับสูง k (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)

4) ประสิทธิภาพของแผ่นกรองในแต่ละรูปแบบ

- Eff_{ijk} = ประสิทธิภาพของการกรองของแผนกรองในแต่ละรูปแบบ

แผ่นกรองหยาบ i, แผ่นกรองละเอียดระดับกลาง j, แผ่นกรองระดับสูง k (%)

5) ข้อกำหนดผู้ใช้งาน

- *CustomerPressure* = ค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ลูกค้ากำหนดมา (ปาสคาล)
- *CustomerFlow* = ค่าปริมาณอากาศภายในระบบ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)
- *CustomerClass* = ระดับของห้องสะอาดที่ลูกค้ากำหนดมา (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต)
- *InternalGenerate* = อัตราการเกิดอนุภาคฝุ่นขึ้นในระบบ (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง)
- S_{mau} = ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้ามาในระบบหลังผ่านชุด MAU (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต)
- *RoomSize* = ขนาดของห้องในหน่วย (ลูกบาศก์ฟุต)

6) ค่ากำหนดเพื่อการคำนวณ

- *EnergyCost1* = ต้นทุนของค่าไฟฟ้าจากกำลังของพัดลมส่งอากาศ (บาทต่อปี)
- A = อัตราการหมุนเวียนปริมาณอากาศในห้องทั้งหมด (รอบต่อชั่วโมง)
- *EnergyEfficiencyRaito* = ประสิทธิภาพพลังงานเครื่องส่งลมเย็น กิโลวัตต์ต่อ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) กำหนดให้เท่ากับ 0.8 [7]
- *FanCoefficiency* = ประสิทธิภาพสมรรถนะเครื่องส่งลมเย็น กำหนดให้เท่ากับ 1.22 [6]
- *FanEfficiency* = ประสิทธิภาพมอเตอร์เครื่องส่งลมเย็น กำหนดให้เท่ากับ 0.55 [6]
- *UnitPowerCost* = หน่วยค่าไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง) กำหนดให้เท่ากับ 3
- *WorkingTime* = ชั่วโมงทำงาน (ชั่วโมงต่อปี) กำหนดให้เท่ากับ 7,120

กำหนดฟังชันก์ค่าเป้าหมาย :

Minimize Z = เงินลงทุนเริ่มแรกของแผ่นกรองและต้นทุนในการดำเนินการในค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อปี)

$$= \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{l}\left(\frac{Customer\ Flow}{Pflow_i} \times Pcost_i + \frac{Customer\ Flow}{Mflow_j} \times Mcost_j + \frac{Customer\ Flow}{Hflow_k} \times Hcost_k\right) \times Y_{ijk} + EnergyCost1 + EnergyCost2 \quad (1)$$

จากสมการเป้าหมาย ต้นทุนของห้องสะอาดในการนำมาคำนวณ มาจาก 2 ส่วน คือต้นทุนแผ่นกรองอากาศตามรูปแบบที่เลือกใช้งาน โดยสามารถคำนวณจำนวนแผ่นกรองอากาศได้จาก ปริมาณลมทั้งหมดที่ลูกค้ากำหนดหารปริมาณที่แผ่นกรองอากาศรับได้ต่อแผ่น ในแต่ละชั้นของแผ่นกรองอากาศ และในส่วนต้นทุนด้านพลังงานเกิดจากการปรับเปลี่ยนรอบการแลกเปลี่ยนอากาศและแรงดัน

ตกคร่อมสูญเสียจากแผ่นกรองอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณดังนี้

1) ค่าพลังงานเกิดจากอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ [7]

$$EnergyCost1 = \frac{A}{60} \times RoomSize \times EnergyEfficiencyRaito \times UnitPowerCost \times WorkingTime$$

2) ค่าพลังงานสูญเสียจากแรงดันตกคร่อมสูญเสีย [7]

$$EnergyCost2 = \left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{l} Y_{ijk} \times PressureDrop_{ijk}\right) \times \frac{A}{60} \times RoomSize \times 1.7 \times \frac{FanCoefficiency \times UnitPowerCost \times WorkingTime}{FanEfficiency \times 1000 \times 60 \times 60}$$

กำหนดเงื่อนไขข้อจำกัด

1) แรงดันตกคร่อมสูญเสียต้องมีค่าไม่เกินที่ลูกค้ากำหนดมา

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{l} Y_{ijk} \times PressureDrop_{ijk} \leq CustomerPressureDrop$$

แรงดันตกคร่อมสูญเสียรวมของระบบสามารถคำนวณได้โดยการนำเอาแรงดันตกคร่อมสูญเสียจากแผ่นกรองอากาศในแต่ละชั้นบวกกัน [2] ค่าแรงดันตกคร่อมสูญเสียในแต่ละรูปแบบสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$Pressure\ Drop_{ijk} = Ppressure\ Drop_i + Mpressure\ Drop_j + Hpressure\ Drop_k +$$

โดยมีค่ารวมกันต้องไม่เกินกว่าที่ลูกค้ากำหนดมา

2) ปริมาณฝุ่นที่หลงเหลือในห้อง ณ สภาวะที่นิ่งเทียบกับระดับความสะอาดที่ยอมรับได้ของห้องสะอาด [1]

$$\frac{InternalGenerate}{A} + S_{mau} \times \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{l} Y_{ijk} \times Eff_{ijk} \leq Customer\ Particle \qquad (3)$$

ประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่ใช้นำมาคำนวณนั้น จะอยู่ในรูปแบบชนิดที่มีการคำนวณแล้วเสร็จของแผ่นกรองอากาศทั้ง 3 ชั้น ค่าประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศในแต่ละรูปแบบสามารถคำนวณได้ดังต่อไป [8]

$$Eff_{ijk} = (1 - Peff_i) \times (1 - Meff_j) \times (1 - Heff_k)$$

สำหรับกรณีที่ไม่มีการใช้แผ่นกรองในขั้นสุดท้าย การการคำนวณประสิทธิภาพจะใช้เพียงแค่แผ่นกรองระดับต้นและระดับกลางเท่านั้น

ซึ่งประสิทธิภาพแผ่นกรองจะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละตัวแปรตัดสินใจ จากนั้นก็นำไปคำนวณตามหลักการหาความเข้มข้นของฝุ่นในสภาวะที่นิ่ง ค่าที่ได้จะต้องไม่เกินไปกว่าค่าที่ลูกค้ากำหนดมา

3) แผ่นกรองอากาศสามารถเลือกได้เพียง 1 รูปแบบ.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{l} Y_{ijk} = 1 \qquad (4)$$

แผ่นกรองอากาศเมื่อมีการคำนวณประสิทธิภาพรวมของทั้ง 3 ชั้นแล้วนั้นจะถูกเลือกได้เพียง 1 รูปแบบ

4) ตัวแปรตัดสินใจจะอยู่ในรูปแบบ 0 หรือ 1

$$Y_{ijk} \in \{0,1\} \quad (5)$$

8. ฐานข้อมูลของคุณสมบัติแผ่นกรองอากาศสำหรับใช้คำนวณ [9]

1) ราคาของแผ่นกรองอากาศในแต่ละชนิด ฐานข้อมูลจะเก็บเป็นราคาต่อ 1 แผ่นแล้วคูณด้วยจำนวนครั้งในการเปลี่ยนใช้งานใน 1 ปี โดยแผ่นกรองเบื้องจะเปลี่ยน 4 ครั้งต่อปี แผ่นกรองระดับกลางเปลี่ยน 2 ครั้งต่อปีและแผ่นกรองระดับสูงจะเปลี่ยน 1 ครั้งต่อปีในตารางคำนวณราคาแผ่นกรองอากาศได้คิดราคารวมจำนวนครั้งในการเปลี่ยนต่อปี แล้วสำหรับการคำนวณราคารวมแผ่นกรองคือการนำแผ่นกรองทั้ง 3 มารวมกันตามรูปแบบแผ่นกรองที่เลือกใช้ (Filter Series) ซึ่งจำนวนแผ่นขึ้นกับปริมาณลมที่ลูกค้าใช้งาน

2) ค่าแรงดันตกคร่อมของแผ่นกรองอากาศในแต่ละรูปแบบ คำนวณโดยการนำค่าแรงดันตกคร่อมสูญเสียในแต่ละชั้นแผ่นกรองอากาศมารวมกัน [5] จำนวนแผ่นกรองอากาศในแต่ละชั้นไม่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมสูญเสีย เพราะแผ่นกรองจะใส่เป็นระนาบเดียวกันในแต่ละชั้นของแผ่นกรอง

3) ค่าปริมาณลมที่รับได้ของแผ่นกรองอากาศในแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน ข้อมูลนี้จะนำไปคำนวณจำแผ่นกรองที่จะต้องใช้ในแต่ละชั้นของแผ่นกรองอากาศ

4) ค่าประสิทธิภาพแผ่นกรองอากาศในแต่ละรูปแบบสามารถคำนวณได้ดังนี้ [8]

$$Eff_{ijk} = (1 - Peff_i) \times (1 - Meff_j) \times (1 - Heff_k)$$

ซึ่งค่าที่เก็บในฐานข้อมูลจะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของฝุ่นขาเข้าที่เล็ดลอดเข้าได้ในระบบในแต่ละรูปแบบของแผ่นกรองอากาศที่จะเลือกใช้

9. ฐานข้อมูลการคำนวณช่วงระยะอัตราการหมุนเวียนที่ปรับเปลี่ยนในโปรแกรม

สำหรับอัตราแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate) ที่กำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์นั้น จะเห็นได้ว่าค่าที่แนะนำให้เลือกใช้จะมีช่วงการปรับรอบอัตราแลกเปลี่ยนตามตารางที่ 3 ซึ่งหากต้องการเปรียบเทียบค่าในสมการเป้าหมายในแต่ละค่าของอัตราแลกเปลี่ยนนั้น จะต้องแทนค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศขั้นต้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำได้ลงในสมการข้อจำกัด จากนั้นก็ปรับค่าอัตราแลกเปลี่ยนที่สูงขึ้นไปทีละหนึ่งอัตราเพื่อหารูปแบบแผ่นกรองที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ค่าสมการเป้าหมาย (Z-Value) ต่ำที่สุด นำค่าที่เหมาะที่สุดในแต่ละอัตราแลกเปลี่ยนมาเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของค่าสมการเป้าหมาย (Z-Value)เป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุด

สำหรับวิธีการหาค่าอัตราแลกเปลี่ยนอากาศขั้นต้นในการแทนค่านั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มประเภทห้องสะอาดดังนี้

1) ห้องสะอาดระดับ Class 100000, 10000, 1000 สามารถที่จะแทนค่าได้จากนำค่าประสิทธิภาพของรูปแบบแผ่นกรองอากาศที่ดีที่สุด ในที่นี้คือเลือกแทนค่าจากแผ่นกรองอากาศจากประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในแต่ละชั้นลงในสมการดังนี้

$$\frac{InternalGenerate}{A} + S_{mau} \times \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{l} Y_{ijk} \times Eff_{ijk} \leq Customer\ Particle$$

จากสมการนี้สามารถที่จะหาค่าอัตราแลกเปลี่ยน

อากาศที่ต่ำที่สุดได้จากการแทนค่าตามข้อกำหนดผู้ใช้งานและค่าประสิทธิภาพของรูปแบบแผ่นกรองที่ดีที่สุด

2) ห้องสะอาดระดับ Class 100, Class 10 นั้นจะถูกกำหนดที่ความเร็วลมขั้นต่ำตามหลักการการทำ Unidirectional Flow ที่ 72 ฟุตต่อนาที [1] ซึ่งสามารถที่จะคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศขั้นต้นได้จาก 2 สมการการคำนวณปริมาณลมดังนี้

ปริมาณลมทั้งระบบ = อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ × ขนาดห้อง (กว้าง) × (ยาว) × (สูง) / 60

= ความเร็วลมที่ผ่านฝ้าเพดาน×พื้นที่แผ่นกรองอากาศที่ฝ้าเพดาน (80% ฝ้า พื้นที่ฝ้า เพดานของห้อง)

จาก 2 สมการที่สามารถหาปริมาณลมได้ระบบเดียวกันค่าปริมาณลมเท่ากัน สามารถแก้สมการหาค่าอัตราแลกเปลี่ยนอากาศได้ดังนี้

อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ

= ความเร็วลมที่ผ่านฝ้าเพดาน×พื้นที่แผ่นกรองอากาศที่ฝ้าเพดาน (80% ฝ้าเพดานของห้องกว้าง×ยาว) × 60 / (ขนาดห้อง (กว้าง) × (ยาว) × (สูง) [1]

เมื่อแทนค่าความเร็วตามหลักข้อกำหนดและค่าขนาดของห้องที่ผู้ใช้งานป้อนเข้า สามารถที่จะกำหนดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศขั้นต้นได้ เพื่อนำไปปรับเปลี่ยนให้สูงขึ้นเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดต่อไป

10. ตัวอย่างแนวทางการเลือกใช้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศและรูปแบบของแผ่นกรองอากาศดังนี้

เมื่อได้แบบจำลองในการหาค่าเหมาะที่สุดของการเลือกใช้แผ่นกรองอากาศแล้ว ก็ได้เขียนโปรแกรมที่สามารถใช้งานได้จริงในโปรแกรมคำนวณเอ็กเซลโซลเวอร์ (Excel Solver) เพื่อเป็นโปรแกรมในการช่วยเลือกใช้แผ่นกรองอากาศตามข้อกำหนดที่ลูกค้า ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการป้อนในโปรแกรมเพื่อหาคำตอบเป็นดังต่อไปนี้

ตัวอย่างข้อมูลตามข้อกำหนดของลูกค้า

ระดับของห้องสะอาด (Clean room Class) 10,000 (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต),

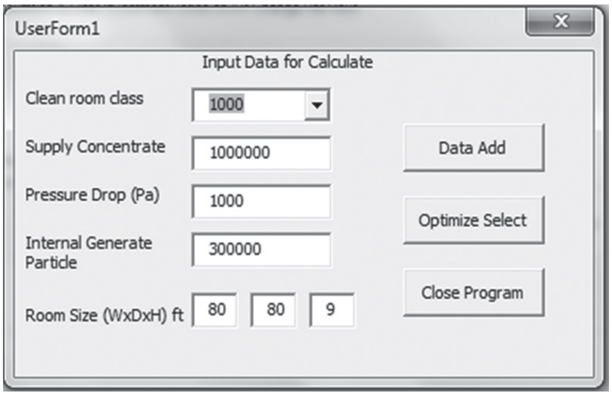
ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้ามาในระบบ (Supply Concentrate) 1,000,000 (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต)

ค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุด (Max Pressure Drop) 1,000 ปาสคาล,

อัตราการเกิดฝุ่นภายในระบบ (Internal Generate) 300,000 (อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง),

ขนาดห้องสะอาด (กว้าง x ยาว x สูง) 80 x 80 x 9 ลูกบาศก์ฟุต

ป้อนค่าลงในโปรแกรมดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างการป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม

จากโปรแกรมข้อมูลการตัดสินใจหลักที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปตัดสินใจต่อ สามารถดูได้จากค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละอัตราแลกเปลี่ยนรวมถึงหากจะต้องการเปลี่ยนรูปแบบของแผ่นกรองอากาศที่ต้องการให้ถูกขึ้น สามารถที่จะตัดสินใจเลือกใช้อัตราการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรูปแบบแผ่นกรองอากาศที่ต้องการ ในส่วนคำตอบที่ดีที่สุดที่แนะนำให้ผู้ใช้งานเลือกใช้จะมีค่าอยู่ที่ 1 คำตอบที่แนะนำให้เลือกใช้งานตามตัวอย่างตารางที่ 4

จากตัวอย่างในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะเลือกอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศและแผ่นกรองที่เหมาะสมและต้นทุนที่ต่ำที่สุดได้ โดยการนำปัจจัยต่างๆ มาประกอบพิจารณาทั้งหมดตามทฤษฎีการคำนวณปริมาณฝุ่นในสภาวะนิ่งของห้องสะอาด

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณ

ข้อกำหนด	ระดับห้องสะอาด (Clean Room Class)	10,000
	ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้ามาในระบบ (Supply Concentrate)	1,000,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง
	ค่าแรงดันตกคร่อม (Pressure Drop)	1000 ปาสคาล
	ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบ (Internal Generate particle)	300,000 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง
	ขนาดของห้องสะอาด (Room Size)	80x80x9 ฟุต
ผลลัพ	อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Design per hour)	31 รอบต่อชั่วโมง
	รูปแบบของแผ่นกรองอากาศ (Filter Series, Pre-Me-HEPA)	(20%, 50%, 99.99%)
	จำนวนแผ่นกรองระดับต้น (Quantity Pre Filter)	15 แผ่น
	จำนวนแผ่นกรองระดับกลาง (Quantity Medium Filter)	30 แผ่น
	จำนวนแผ่นกรองระดับสูง (Quantity Final Filter)	28 แผ่น
	ความเข้มข้นของฝุ่น สภาวะนิ่ง (Steady Concentration)	9,717 อนุภาคต่อลูกบาศก์ฟุต
	ต้นทุนแผ่นกรองอากาศ	218,240 บาทต่อปี
	ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า	848,395 บาทต่อปี

11. สรุปผล

ผู้ออกแบบหรือผู้ใช้งานในหลายๆโครงการออกแบบและเลือกใช้แผ่นกรองอากาศตามประสบการณ์หรือตามตารางการแนะนำในตำราทั่วไป ซึ่งมิได้มีการสำรวจหน้างานจริง ทำให้การออกแบบไม่ตรงกับการใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปเปรียบเทียบข้อดีของจากการเลือกจากโปรแกรมตามตารางที่ 7 ได้ดังนี้

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการเลือกแบบก่อนหน้ากับการเลือกโดยใช้โปรแกรม

การเลือกแบบก่อนใช้โปรแกรม	การเลือกโดยใช้โปรแกรม
ไม่มีการนำปริมาณฝุ่นข้าเข้าในระบบมาคำนวณการเลือกใช้	นำฝุ่นขาเข้าในระบบนำมาคิดคำนวณในสมการ โดยคำนวณผ่านชุดกรองฝุ่นเบื้องต้น
ปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบไม่ถูกนำมาพิจารณาการเลือกใช้	ฝุ่นในระบบถูกนำมาคำนวณในรูปแบบ โดยผู้ใช้งานสามารถหาได้จากลักษณะการทำงานและกระบวนการผลิตของลูกค้า หรือข้อมูลเก่าที่ลูกค้าได้มีการสำรวจและเก็บไว้จริง
อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเลือกจากประสบการณ์ที่เคยใช้งาน และเผื่อค่าไว้สูงเพื่อปรับหน้างานจริง	โปรแกรมคำนวณสามารถที่จะระบุค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศในรอบที่ต่ำลง สามารถที่จะรู้ล่วงหน้าในการวางแผนเลือกใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวเนื่องกัน
ชนิดของแผ่นกรองอากาศ ไม่มีหลักการเลือกที่ชัดเจน เลือกบนพื้นฐานที่เคยใช้งานแล้วไม่มีปัญหา	โปรแกรมสามารถบอกชนิดของแผ่นกรองอากาศที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถที่จะเป็นทางเลือกในการตัดสินใจเปลี่ยนชนิดแผ่นกรองเพื่อลดต้นทุนในการประมูลงานได้
ไม่สามารถที่จะอธิบายเหตุผลลูกค้าได้ว่าทำไมถึงต้องเลือกใช้แผ่นกรองอากาศนั้นๆ พร้อมทั้งที่มาของการคำนวณอัตราแลกเปลี่ยน	โปรแกรมสามารถอธิบายที่มาของการเลือกใช้แผ่นกรองและการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศได้

References

[1] John Shang P.E. “Understanding Pharmaceutical Clean room design” ASHERE JOURNAL, pp. 29-32, 2004

[2] W. Whyte “Cleanroom Technology Fundamentals of Design, Testing and Operation” 1st edition, pp. 1-6, 2001

[3] นิรัญ ชยางศุ. Basic of Filtration, กรุงเทพมหานคร:วารสารสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศ, 2550

[4] วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์.คู่มือการออกแบบห้องสะอาด, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2012

[5] PACIFICGAS AND ELECTRIC COMPANY “HIGH PERFORMANCE CLEAN ROOM DESIGN” A Design guideline book, pp.20-26, 2006

[6] AAF International “Basic clean room design” Basic Design and Operating Considerations. 1996, Amsterdam

[7] Wei Sun “Conserving Fan Energy in Cleanroom” ASHERE JOURNAL, pp. 36-38, 2008

[8] Philip J.Naughtan “Clean Room Energy Optimization Method” Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Richardson, TX, May 17-20, 2004

[9] AAF International “AAF PRODUCT SPECTCIFICATION” Filter Performance Data Sheet, pp. 15 2014