บทที่ 3
ทฤษฎี

การศึกษาภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกรองแบบถุง มีทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. โครงสร้าง ชนิด และหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบของเครื่องกรองแบบถุง
2. กลไกในการกรอง
3. สมรรถนะของเครื่องกรองแบบถุง
4. การเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยวิธี Stack Sampling

1. โครงสร้าง ชนิด และหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบของเครื่องกรองแบบถุง

ในงานควบคุมมลภาวะอากาศในอุตสาหกรรม[10] การจำแนกตัวกลางในการกรองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1.1 เครื่องกรองแบบถุงกรอง (fabric or bag filter) ได้แก่ ถุงกรอง (bag filter)

1.2 เครื่องกรองแบบเส้นใย (fibrous filter) ได้แก่ ชั้นเส้นใย กระดาษกรอง โดยส่วนใหญ่มีความหนาชั้นหรือแผ่นอยู่ในช่วง 3 มิลลิเมตร ถึง 10 เซนติเมตร จะอยู่ในรูปแบบของม้วนหรือแผ่นก็ได้

1.3 เครื่องกรองแบบชั้น (aggregate or porous bed filter) ได้แก่ ชั้นของเม็ดวัสดุ โดยความลึกของชั้นที่จะกรองขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องกรองแต่ละชนิด

เครื่องกรองแบบผ้าโดยทั่วไปจะใช้ดักเก็บฝุ่นที่มีความเข้มข้นของฝุ่นในช่วงความเข้มข้น 0.1-100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนชั้นเส้นใย กระดาษกรอง และชั้นวัสดุจะใช้กับความเข้มข้นของฝุ่นที่มีค่าน้อยกว่าเป็นหลายร้อยหรือหลายพันเท่า เช่นเมื่อฝุ่นมีค่าของความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เครื่องกรองแต่ละชนิดดังกล่าวข้างต้นมีรายละเอียดและสาระสำคัญดังนี้

1.1 เครื่องกรองแบบถุงกรอง (FABRIC FILTERS)

เครื่องกรองแบบถุงกรองเป็นเครื่องกรองที่รู้จักกันดี เป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ใช้หลักวิธีการแยกอนุภาคฝุ่นออกจากกระแสก๊าซ เครื่องกรองแบบถุงกรองจะมีโครงสร้างที่เป็นผ้ากรองซึ่งจะกักกันอนุภาคไว้และให้ก๊าซไหลผ่านช่องว่างของเครื่องกรอง การทำงานของเครื่องกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับสภาวะหลายด้าน เช่นอาจเริ่มตั้งแต่การรู้ถึงคุณสมบัติของเส้นใยเพื่อนำไปเลือกชนิดของผ้ากรอง โดยปกติอุณหภูมิในการทำงานจะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่จะใช้ในการเลือกชนิดของผ้ากรองด้วย สำหรับถุงกรองโดยปกติทำด้วยผ้าทอ (**woven fabric**) หรือผ้าสักหลาด (**felted fabric**) ชั้นฝุ่นที่สะสมอยู่บนผ้ากรองนี้จะช่วย

กรองอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เครื่องกรองแบบถุงนี้จะต้องมีการทำความสะอาดเป็นครั้งคราวเนื่องจากจะทำให้ลดปริมาณฝุ่นที่สะสมอยู่บนผ้ากรองลง

เครื่องกรองแบบถุง (Fabric Filter) มีลักษณะ องค์ประกอบและขนาดที่แตกต่างกันไป เครื่องกรองแบบถุงที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นไม่เพียงแต่ที่จะต้องมีการเลือกชนิดผ้ากรองให้มีความเหมาะสมกับสภาพของอนุภาคฝุ่นที่จะจัดเก็บแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงการออกแบบให้มีความเหมาะสม ตลอดจนวิธีการทำความสะอาดผ้ากรองด้วย เครื่องดักเก็บฝุ่นแบบถุงกรองหรืออาจเรียกได้ว่าหน่วยถุงกรอง (baghouses) ประกอบด้วยถุงกรองเป็นแถว ๆ อยู่ในหน่วย (compartment) หลายหน่วย โดยปกติถุงกรองมีรูปร่างเหมือนท่อทำด้วยผ้าทอหรือผ้าสักหลาด ที่หัวและท้ายของถุงใช้ metal rings เป็นตัวยึดหรืออาจใช้ cage เป็นโครงยึดของทั้งถุงก็ได้ ก๊าซที่มีฝุ่นเมื่อไหลผ่านถุงกรอง อนุภาคจะค้างบนผิวของผ้ากรองในขณะที่ก๊าซสะอาดถูกระบายสู่บรรยากาศ เมื่อชั้นฝุ่นสะสมจนหนาพอควรจะต้องทำความสะอาดถุงกรอง ทำให้ฝุ่นตกลงไปในถังพัก ซึ่งเอาออกโดยใช้ pneumatic หรือ screw conveyor

ระบบการกรองของหน่วยถุงกรอง มี 2 อย่าง คือ

- ระบบการกรองภายใน (interior filtration) ก๊าซจะไหลเข้าเครื่องกรองทางด้านบนหรือด้านล่าง โดยผ่าน cell plate ซึ่งการกรองแบบนี้อนุภาคจะถูกจับภายในถุง ส่วนอากาศสะอาดจะไหลผ่านออกมาด้านนอก

- ระบบการกรองภายนอก (exterior filtration) กรณีนี้อนุภาคฝุ่นถูกจับที่ผิวด้านนอกของถุงกรอง เนื่องจากก๊าซไหลจากด้านนอกถุงผ่านไปยังด้านใน ดังนั้นต้องมี cage หรือ ring เป็นโครงยึดภายใน

โครงสร้างและหน้าที่ในแต่ละหน่วยของเครื่องกรองแบบถุงมีองค์ประกอบและคุณลักษณะทั่วไปดังต่อไปนี้

- **ถุงกรอง (Bags)**

ถุงกรองที่ใช้เป็นถุงรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวต่าง ๆ กัน มีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 40 ฟุต(3.0 ถึง 12.2 เมตร) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 6 ถึง 18 นิ้ว (15 ถึง 46 เซนติเมตร) โดยปกติจะแขวนถุงกรองในแนวดิ่ง และติดหัวท้ายด้วยวงแหวน ตัวหนีบยึด หรือเข็มกลัดสปริง ส่วนหน่วยถุงกรองที่มีการกรองแบบภายนอกมักใช้ถุงซึ่งมี cage เป็นโครง ยึดด้วยเข็มกลัดสปริง หน่วยถุงกรองนี้อาจทำเป็นหน่วยเดี่ยว (single unit) หรือเป็นหน่วยรวม (compartmental unit) ก็ได้

- **ถังพัก (Hoppers)**

ใช้สำหรับบรรจุฝุ่นที่เก็บได้ก่อนที่จะนำไปทิ้งหรือใช้ในกระบวนการใหม่ อุปกรณ์ที่ช่วยในการนำฝุ่นออกจากถังพักอาจใช้ Screw conveyor , Rotary valves

- **ตัวกลางสำหรับกรอง (Filter Media)**

ตัวกลางสำหรับกรองหรือผ้ากรองซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของถุงกรองมีหลายชนิด ต้องเลือกใช้ให้เหมาะ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของก๊าซ (เช่น ความชื้น สภาพเป็นกรดเป็นด่าง)อุณหภูมิ ปริมาณฝุ่นเข้า **(dust loading)** ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคและวิธีการทำความสะอาดถุงกรอง ผ้ากรองสำหรับเครื่องกรองแบบถุงอาจทำจากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผ้าฝ้าย หรือผ้าขนสัตว์ ต่อมามีการพัฒนามาเป็นการใช้ใยสังเคราะห์

เนื่องจากมีราคาที่ค่อนข้างต่ำ มีช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้กว้าง มีสภาวะที่ทนต่อสารเคมีได้ดี ตลอดจนเส้นใยมีขนาดเล็ก ตัวอย่างใยสังเคราะห์เช่น acetates , acrylics , polyamides , polyesters , polyolefins และ polyvinyl chlorides มีเส้นใยบางประเภทที่มีคุณสมบัติพิเศษที่ทนอุณหภูมิได้สูง ได้แก่ Teflon , Ryton และ P84 สำหรับตารางที่ 3.1 ในภาคผนวก ได้มีการแสดงคุณสมบัติและชนิดของผ้ากรอง (Turner et al. 1984) เช่น ผ้ากรอง NOMEX (Aromatic Polyamide) มีคุณสมบัติการทนต่อการขีดข่วน มีความคงทนสูง ทนต่อสารเคมีประเภทกรดได้พอสมควร ส่วนผ้ากรอง ชนิด DACRON (Polyester) ทนต่อการขีดข่วน มีความคงทนที่สูงมาก ทนต่อสารเคมีประเภทกรดได้ดี เป็นต้น คุณสมบัติเส้นใยที่ใช้ทำผ้ากรองจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของก๊าซที่ไหลเข้าสู่เครื่องกรองหากก๊าซมีอุณหภูมิสูงเกินไป จำเป็นต้องลดอุณหภูมิลงก่อนเข้าสู่เครื่อง โดยการเติมอากาศการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือโดยการพ่นหยดน้ำบนก๊าซเป็นต้น นอกจากนี้อุณหภูมิของก๊าซต้องสูงกว่าจุดน้ำค้าง **(dew point)** ซึ่งถ้าต่ำกว่าความชื้นจะทำให้ฝุ่นเกาะติดแน่นอยู่บนพื้นผิวของผ้ากรองซึ่งจะทำให้ถุงกรองอุดตันได้ ในการเลือกผ้ากรอง จะต้องคำนึงถึง ความแข็งแรง ความคงทน และอัตราการยืดหยุ่นตัว ซึ่งแต่ละปัจจัยล้วนมีผลต่อการทำงานทั้งสิ้น นั่นคือ เมื่อมีการทำความสะอาดผ้ากรอง หรือแม้กระทั่งการเคลื่อนของอนุภาคฝุ่นอาจทำให้เกิดการเสียดสีของผ้ากรองได้ ตลอดจนการเคลื่อนไหวของผ้ากรองความอาจจะทำให้เกิดการยืดตัวของผ้ากรองได้ ค่า Permeability ของผ้ากรองเป็นค่าแสดงถึงโครงสร้างของผ้ากรองว่ามีช่องว่างในการให้อนุภาคฝุ่นผ่านได้มากน้อยขนาดไหน ซึ่งถ้าค่า Permeability มีค่าสูง จำนวนของช่องว่างบนพื้นผิวของผ้ากรองจะมาก ผ้ากรองโดยทั่วไปที่ใช้ทำถุงกรองมี 2 ชนิด คือ ผ้าทอ **(woven fabric)** หรือผ้าสักหลาด **(felted fabric)**

- ผ้าทอ (woven fabric) ผ้ากรองโดยส่วนใหญ่มักจะได้จากการทอทั้งสิ้น มีรูปแบบความยาวที่จำกัดในการทอ สำหรับหน่วยถุงกรองที่มีระบบการไหลของก๊าซจากด้านในออกสู่ด้านนอกถุงกรองล้วนใช้ผ้ากรองชนิดผ้าทอเช่นถุงกรองที่มีการทำความสะอาดผ้ากรองแบบเขย่าหรือใช้ระบบอากาศไหลย้อน สำหรับผ้ากรองชนิดผ้าทอ มักจะใช้กับการทำงานที่มีค่าปริมาณการไหลของกระแสก๊าซต่ำ ๆ การสานของเส้นใยของผ้ากรองชนิดทอมีด้วยกันหลายแบบแล้วแต่ชนิดของการใช้งาน เช่น การสานแบบธรรมดา วิธีการสานคือเส้นหนึ่งอยู่บนอีกเส้นอยู่ล่างในทิศทางที่ต่างกัน การสานแบบ satin อยู่บน 1 เส้นอยู่ล่าง 3 เส้น ซึ่งมีความทึบค่อนข้างสูง

- ผ้าสักหลาด (felted fabric) เป็นผ้ากรองที่มีความคงทน มีความหนา 2-3 เท่าของผ้ากรองชนิดผ้าทอ ใช้กับวิธีที่ใช้ทำความสะอาดผ้ากรอง แบบ pulse jet ไม่ควรใช้กับสภาวะที่มีความชื้นสูงซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันของผิวผ้ากรองได้

- <u>วิธีทำความสะอาดถุงกรอง</u>

วิธีทำความสะอาดถุงหรือเอาฝุ่นออกจากถุงกรอง วิธีที่ใช้กันมาก มีอยู่ 3 วิธี

- แบบเขย่า (shaking)

ใช้กับการกรองที่มีระบบการไหลของกระแสก๊าซ จากด้านในออกด้านนอก มีค่าความเร็วในการกรองต่ำ ๆ และเป็นผ้ากรองชนิดผ้าทอ

- แบบอากาศไหลย้อนกลับ (reverse air flow)

ใช้กับการกรองที่มีระบบการไหลของกระแสก๊าซ จากด้านในออกด้านนอก มีค่าความเร็วในการกรองต่ำ ๆ และเป็นผ้ากรองชนิดผ้าทอ มีโครงยึดติดกับถุงกรองด้วย

- แบบพ่นอากาศเป็นพัลส์เจท (pulse - jet)

ใช้กับการกรองที่มีระบบการไหลของกระแสก๊าซ จากด้านนอกเข้าสู่ด้านใน เป็นผ้ากรองสักหลาด มีโครงยึดเกาะ และมีค่าความเร็วในการกรองสูง

1.2 เครื่องกรองแบบเส้นใย (FIBROUS FILTERS)

เครื่องกรองแบบชั้นเส้นใย เครื่องกรองประเภทนี้เป็นประเภทใช้แล้วทิ้ง วัสดุเส้นใยในเครื่องกรองดังกล่าว เช่น เส้นใยสังเคราะห์หรือธรรมชาติจะถูกบรรจุไว้หลวม ๆ ในกรอบ เมื่อเกิดการสะสมของฝุ่นในแผงกรอง ความดันสูญเสียของเครื่องกรองจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ดังนั้น จะเพิ่มพื้นที่ของการกรองโดยทำโครงสร้างให้ขดงอเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการกรอง และเพื่อยืดอายุการใช้งาน เมื่อความดันสูญเสียเพิ่มถึงค่า ๆ หนึ่ง ก็จะถอดแผงกรองทิ้ง เครื่องกรองประเภทนี้ใช้กับค่าความเร็วในการกรองที่มีความแตกต่างกันมาก อาจใช้ได้กับค่าความเร็วในการกรอง ที่มีค่าถึง 1 เมตรต่อวินาทีค่าประสิทธิภาพที่ได้จะสูง

1.3 เครื่องกรองแบบชั้น (aggregate or porous bed filter)

เครื่องกรองแบบชั้น ได้แก่ เครื่องกรองที่ทำจากชั้นเม็ดวัสดุเป็นเครื่องกรองประเภทใช้ใหม่ได้จะล้างทำความสะอาดพื้นที่การกรองส่วนหนึ่ง หรือทั้งหมดเป็นระยะ ๆ เพื่อป้องกันการเพิ่มขึ้นสูงไปของความดันสูญเสีย สามารถใช้ได้กับการทำงานที่มีอุณหภูมิสูง ตลอดจนสามารถนำส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการดักเก็บกลับมาใช้ใหม่

2. กลไกการกรอง (Filtration Process)

สำหรับการกรองโดยทั่วไปของผงฝุ่นอาจจำแนกได้เป็น 2 ระบบใหญ่ ๆ คือ การกรองผ่านชั้นสะสมของฝุ่น(dust cake) ซึ่งชั้นสะสมของฝุ่นผงจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวกลางในการกรองอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งการสะสมตัวของฝุ่นผงดังกล่าวจะมีเพิ่มขึ้นตามเวลาในการกรอง จนกระทั่งมีการทำความสะอาดผ้ากรอง ฝุ่นผงดังกล่าวจึงลดปริมาณลง แต่การสะสมตัวของฝุ่นผงบนพื้นผิวของผ้ากรองยังมีหลงเหลืออยู่ถึงแม้ว่าจะมีการทำความสะอาดแบบปกติแล้วก็ตาม กระบวนการกรองดังกล่าว เรียกว่า Cake filtration ส่วนกระบวนการกรองอีกระบบหนึ่งเป็นการกรองภายในระบบตัวกรอง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางในการกรอง ว่ามีโครงสร้างอย่างไร มีคุณสมบัติอย่างไร กระบวนการกรองดังกล่าว เรียกว่า Deep filtration ในกระบวนการกรองหนึ่ง ๆ อาจจำเป็นต้องอาศัยทั้ง 2 ระบบดังกล่าว

เมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้าหาผ้ากรอง อนุภาคอาจถูกจับเนื่องจากกลไกหลายอย่าง ได้แก่การสกัดกั้น การกระทบ การแพร่ การตกตะกอนด้วยแรงไฟฟ้า ความร้อน แรงถ่วง และกลไกการลอดผ่าน (sieving)

กลไกที่สำคัญที่สุดในการจับอนุภาคด้วยเส้นใย ได้แก่ การสกัดกั้น การกระทบและการแพร่ แรงถ่วงและแรงเนื่องจากความร้อนมีผลน้อยมาก ส่วนการตกตะกอนด้วยแรงไฟฟ้า อาจมีความสำคัญหรือไม่ก็ได้แต่กลไกการลอดผ่านจะไม่ส่งผลในที่นี้เลย

ในเครื่องกรองแบบถุง มักจะมีกลไก 3 อย่าง ที่ใช้ช่วยจับอนุภาค คือ การกระทบ การสกัดกั้นโดยตรง และการแพร่ ซึ่งจะมีผลในช่วงเวลาอันสั้นในระหว่างการกรองของแต่ละวัฏจักรเท่านั้น แต่เมื่อมีเค็กสะสมตัวขึ้นการลอดผ่านจะเป็นกลไกที่สำคัญที่สุด วัตถุที่เป็นตัวรับ (receptor) สำหรับจับอนุภาคในระบบถุงกรอง คือเส้นใย (Fiber) การหาประสิทธิภาพการดักเก็บฝุ่นสามารถหาได้จากกลไกการจับอนุภาคแต่ละชนิด โดยอาศัยหลักการและสามารถอธิบายได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ในรูปของตัวแปรเสริมไร้มิติ (Dimensionless Parameter)ที่เรียกว่า Separation Number โดยที่ประสิทธิภาพของกลไกการเก็บฝุ่นจะมีมากขึ้น ถ้าค่า Separation Number ของกลไกนั้นยิ่งมีค่าสูงขึ้น

กลไกในการจับอนุภาคที่สำคัญในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับถุงกรอง[9] ได้แก่

2.1 การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (inertial impaction)

2.2 การสกัดกั้นโดยตรง (direct interception)

2.3 การแพร่ (diffusion)

2.4 การลอดผ่านของอนุภาค (sieving)

2.1 การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial Impaction)

เมื่อกระแสก๊าซเคลื่อนเข้าไปใกล้เส้นใยที่ระยะทางหนึ่งก่อนถึงเส้นใย กระแสก๊าซจะเริ่มเคลื่อนเบี่ยงเบนออกไปรอบ ๆ เส้นใย เฉพาะอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กเท่านั้นที่จะเคลื่อนที่ไปตามกระแสก๊าซที่เบี่ยงเบนออกไป ส่วนอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ที่มีแรงเฉื่อย (Inertia) มากจะไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสก๊าซที่ไหลเบี่ยงเบนออกไป แต่จะเคลื่อนที่ตรงต่อไปกระทบกับเส้นใยและถูกจับเอาไว้ในที่สุด

Separation Number ของกลไกการกระทบเนื่องจากความเฉื่อยมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า Impaction Parameter ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากการทำสมดุลย์ของแรงจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝุ่นในกระแสก๊าซกับแรงต้านทาน จากกระแสก๊าซต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝุ่น โดยมีนิยามดังนี้

$$\psi = (C \rho_p d_p^2 v)/(18 \mu D) \qquad (2)$$

เมื่อ C = Cunningham Correlation

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่น

d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น

v = ความเร็วของกระแสก๊าซ

μ = ความหนืดของก๊าซ

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย

ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นของเส้นใยอันเนื่องมาจากกลไกการกระทบโดยแรงเฉื่อง พบว่าเป็นฟังก์ชั่นโดยตรงของ Impaction Parameter คือ

$$\eta_{impaction} = f(\psi) \qquad (3)$$

2.2 การสกัดกั้นโดยตรง (Direct Interception)

อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ตามกระแสก๊าซที่ไหลเบี่ยงเบนไปรอบ ๆ เส้นใยโดยที่อนุภาคฝุ่นเหล่านี้มีโอกาสที่จะเข้าสัมผัสและเกาะติดกับเส้นใยได้ด้วยกลไกการสกัดกั้นโดยตรงหากว่าจุดศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น ซึ่งเคลื่อนที่ไปกับกระแสก๊าซอยู่ห่างจากผิวของเส้นใยเป็นระยะทางน้อยกว่ารัศมีของอนุภาคฝุ่นนั้น

กลไกการสกัดกั้นโดยตรงเป็นผลอันเนื่องมาจากขนาดของอนุภาคฝุ่นไม่ใช่เนื่องมาจากมวลของอนุภาค กลไกการสกัดกั้นโดยตรงอาจเป็นกลไกที่เป็นตัวการโดยตรงที่ทำให้อนุภาคฝุ่นเข้าสัมผัสกับเส้นใย หรืออาจเป็นกลไกที่เสริมกลไกเก็บฝุ่นอื่น ๆ

Separation Number ของกลไกการสกัดกั้นโดยตรง อยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น ต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ซึ่งอาจเรียกว่า Interception Parameter โดยมีนิยามดังนี้

$$d_p / D \qquad (4)$$

และประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นของเส้นใยอันเนื่องมาจากกลไกการสกัดกั้นโดยตรงพบว่าเป็นฟังก์ชั่นโดยตรงกับอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น ต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ดังนี้ คือ

$$\eta_{interception} = f(d_p / D) \qquad (5)$$

2.3 การแพร่แบบ Brownian (Brownian Diffusion)

เกิดขึ้นกับอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 ไมครอน และแขวนลอยอยู่ในกระแสก๊าซ จะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน ซิกแซก แบบที่เรียกว่า BrownianMotion เนื่องจากถูกชนโดยโมเลกุลของก๊าซที่อยู่รอบ ๆ

Separation Number ซึ่งใช้ในการอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ถึงลักษณะของการเก็บอนุภาคฝุ่นของเส้นใยโดยกลไกการแพร่แบบ Brownian ที่ใช้กันทั่วไปเป็นตัวแปรเสริมไร้มิติ (Dimensionless Parameter) ที่เรียกกันว่า Peclet Number โดยมีนิยามดังนี้ คือ

$$Pe = (3\pi\mu v d_p D) / (CkT) \qquad (6)$$

เมื่อ Pe = Peclet Number

k = Boltzmann ' s Constant

Peclet Number เป็นตัวแปรเสริมไร้มิติที่บ่งบอกถึงความสำคัญของการนำพาอนุภาคฝุ่นให้มาสัมผัสกับเส้นใยโดยแรงกลไกเก็บฝุ่น (Collection Forces) ต่าง ๆ เทียบกับความสำคัญของการนำพาอนุภาคฝุ่นโดยการแพร่เชิงโมเลกุล (Molecular Diffusion) เมื่อ Peclet Number มีค่าน้อยกว่า 1 การแพร่แบบ Brownian จะเป็นกลไกหลักในการเก็บฝุ่น ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นโดยการแพร่แบบ Brownian ของเส้นใย พบว่า เป็นฟังก์ชั่นผกผัน (Inverse Function) กับ Peclet Number โดยมีนิยามดังต่อไปนี้

$$\eta_{Diffusion} = f (1 / Pe) \qquad (7)$$

จากกลไกการจับอนุภาคดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจะนำมาสู่การหาประสิทธิภาพในเชิงคณิตศาสตร์ (Aerodynamic Capture Efficiency) ในความเป็นจริงการจับอนุภาคฝุ่นใด ๆ อาจจะอาศัยกลไกเก็บฝุ่นหลายประเภท พร้อมกันในเวลาเดียวกัน โดยที่กลไกใดกลไกหนึ่งอาจมีบทบาทในการจับอนุภาคฝุ่นมากกว่ากลไกอื่น ๆ ที่เหลือ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ขนาดของอนุภาคฝุ่น ขนาดของเส้นใยหรือแม้กระทั่งความเร็วของกระแสก๊าซ และเงื่อนไขอื่น ๆ ในการนี้ สามารถที่จะคาดประมาณประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นรวมได้จากผลคูณของสัดส่วนของจำนวนอนุภาคฝุ่นทั้งหมดที่วิ่งเข้าหาเส้นใยและผ่านไปโดยไม่สัมผัสถูกเส้นใยนั้น ๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นนิยามได้ดังนี้ คือ

$$\eta_{overall} = 1 - (1 - \eta_{Impaction}) (1 - \eta_{Interception}) (1 - \eta_{Diffusion}) \qquad (8)$$

2.4 การลอดผ่านของอนุภาค (Sieving)

ภายหลังจากที่อนุภาคแต่ละขนาดได้ผ่านกลไกการจับเก็บอนุภาคดังกล่าวข้างต้นแล้ว จะมีการสะสมของอนุภาคเกิดขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเกาะติดพื้นผิวบริเวณนั้น หรือที่เรียกว่า cake ซึ่งแผ่น cake จะมีช่องเปิดเล็ก ๆ ซึ่งอนุภาคที่เล็กกว่าช่องเปิดดังกล่าวจึงจะสามารถผ่านไปได้ กลไกการจับเก็บอนุภาคดังกล่าว เรียกว่า sieving

3. สมรรถนะของเครื่องกรองแบบถุง

สมรรถนะของเครื่องกรองแบบถุงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากเนื่องจากชี้ให้เห็นถึงความสามารถในด้านการดักเก็บฝุ่นของเครื่องกรองแบบถุงกรองได้ การประเมินค่าสมรรถนะดังกล่าวมีวิธีการศึกษาจากค่าต่าง ๆ เหล่านี้คือ

3.1 ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency)

3.1.1 เวลาที่ใช้ในการกรอง

3.1.2 ชนิดของผ้ากรอง

3.1.3 ค่าความเร็วในการกรอง

3.2 ค่าความดันลด (Pressure Drop)

3.1 ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพ สามารถกำหนดและแสดงได้หลายลักษณะเช่น

- ค่าประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่น (Collection Efficiency)หรือ
- ค่า Penetration

- ประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่น (Collection Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่น (Collection efficiency) เป็นค่าที่จะบ่งบอกถึงสมรรถนะของถุงกรองได้ ซึ่งการกำหนดประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่นนั้น เป็นกระบวนการที่ฝุ่นถูกดักเก็บโดยผ้ากรองซึ่งไม่สามารถผ่านชั้นของผ้ากรองไปได้ โดยมีนิยามของ ค่า Collection efficiency[8] ดังนี้

$$\eta = (C_i - C_o) / C_i \qquad (9)$$

เมื่อ η = ค่า Collection Efficiency

C_o= ค่าความเข้มข้นขาออกของอนุภาค

C_i= ค่าความเข้มข้นขาเข้าของอนุภาค

การคำนวณหาประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นของเครื่องกรองแบบถุงโดยรวมนั้น สามารถประมาณการหาประสิทธิภาพรวม ได้จากกลไกการจับเก็บอนุภาคที่กล่าวแล้วข้างต้น ($\eta_{overall}$) แต่เนื่องจากในกลไกดังกล่าวเมื่อผ่านช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง ความสำคัญของบางกลไกจะหมดไป ซึ่งอาจจะเหลือแค่กลไกในการลอดผ่านเท่านั้น

การกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ที่จะสื่อถึงค่าที่เกี่ยวข้องและมีผลค่าประสิทธิภาพนั้นอาจนำเสนอได้ในรูปแบบความสัมพันธ์ ดังนี้

$$P_n \text{ หรือ } C_o = f(\phi, C_i, W, A/C, C_R) \qquad (10)$$

เมื่อ P_n = ค่า Penetration

C_o= ค่าความเข้มข้นขาออกของอนุภาค

ϕ = ค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะของอนุภาค

C_i= ค่าความเข้มข้นขาเข้าของอนุภาค

C_R= ค่าความเข้มข้นตกค้างของอนุภาค

W = น้ำหนักของอนุภาคบนผ้ากรอง

A/C= Air-to-Cloth Ratio

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 10 ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวล้วนมีความสัมพันธ์ต่อค่าประสิทธิภาพทั้งสิ้น เช่น

- ϕ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์แสดงคุณลักษณะของอนุภาค เช่น ถ้ากล่าวถึงในด้านขนาดของอนุภาค ก็จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับค่าประสิทธิภาพได้ นั่นคือถ้าขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าช่องว่างของผ้ากรอง จะทำให้เกิดการสะสมที่ผิวของผ้ากรองซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่คุณลักษณะของอนุภาคอาจมีได้หลายอย่าง นอกจากขนาดที่กล่าวถึง

- W น้ำหนักของอนุภาคบนผ้ากรอง ซึ่งค่าน้ำหนักที่อยู่บนผ้ากรองหมายถึงจำนวนอนุภาคที่ไม่สามารถผ่านผ้ากรองไปได้ โดยเกาะติดเป็นชั้นของอนุภาค จำนวนอนุภาคดังกล่าวสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพได้

หรือแม้กระทั่งการกำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า เพนนิเทรชั่น กับค่า ความเร็วในการกรอง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์หนึ่งที่สามารถแสดงว่า ที่ความเร็วในการกรองต่าง ๆ ประสิทธิภาพจะมีค่าเป็นเช่นไร เป็นต้น

3.1.1 เวลาที่ใช้ในการกรอง

- เวลาในการกรองเป็นสิ่งที่บ่งบอกการดำเนินไปของกระบวนการกรองได้ การกำหนดช่วงเวลาดำเนินการ และช่วงเวลาที่ทำความสะอาดผ้ากรองที่เหมาะสมจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงสุดในการทำงาน

3.1.2 ชนิดของผ้ากรอง

- ชนิดของผ้ากรองที่มีความเหมาะสมทั้งต่ออนุภาคของฝุ่นและกระบวนการผลิตจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูง

3.1.3 ความเร็วในการกรอง

- ค่า A/C หรือ G/C (Air-to-Cloth Ratio หรือ Gas-to-Cloth Ratio) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่งในการออกแบบและเดินเครื่องกรองก็คือ ค่า A/C หรือ G/Cซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของปริมาณอากาศหรือก๊าซ (เป็น acfm หรือลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) ต่อพื้นที่ของผ้ากรอง (เป็น Ft^2 หรือ ตารางฟุต) จริงๆ แล้ว A/C หรือ G/C ก็คือ ความเร็วในการกรอง **(filtration velocity)** ซึ่งสามารถประเมินได้หลายวิธี แต่ที่ง่ายที่สุดก็คือ ใช้ค่าที่ใช้ในกระบวนการหรือโรงงานที่คล้ายคลึงกันหรือใช้ค่าจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องกรอง ค่า A/C ขึ้นกับระบบหน่วย

ถุงกรองโดยทั่วไปหน่วยถุงกรองที่ใช้เครื่องเขย่าและอากาศไหลย้อนมักมีค่า A/C ต่ำ แต่ระบบพัลส์เจทจะเดินเครื่องที่ค่า A/C สูงกว่า

3.2 ค่าความดันลด (Pressure Drop)

ความดันลดผ่านเครื่องกรองเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง ค่าความดันลดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการดำเนินไปของกระบวนการกรอง ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น เวลาที่ใช้ในการกรอง ค่าความเร็วในการกรอง คุณลักษณะของฝุ่น คุณลักษณะของผ้ากรอง ตลอดจนกรรมวิธีการทำความสะอาดผ้ากรอง ค่าความดันลดทั้งหมดของกระบวนการกรองเป็นผลรวมของความดันลดผ่านผ้ากรองกับความดันลดผ่านชั้นอนุภาคที่ทับถมอยู่ โดยที่การไหลผ่านผ้ากรองและชั้นอนุภาคเป็นแบบที่มีความหนืด (viscous) ซึ่งความดันลดสำหรับชั้นอนุภาคและผ้ากรองอาจหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Darcy

$$\Delta P/L = V\mu_g/K \qquad (11)$$

โดยที่ K = permeability ของอนุภาคหรือเครื่องกรอง
V = ความเร็วของก๊าซที่ผิวหน้าซึ่งเท่ากับปริมาตรการไหลผ่านเครื่องกรองหารด้วยพื้นที่ของผ้ากรอง
L = ความลึกของชั้นอนุภาคหรือความหนาของเครื่องกรอง

ความดันลดทั้งหมดอาจหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P_0 = \Delta P_f + \Delta P_p = L_f\mu_g V/K_f + L_p\mu_g V/K_p$$
$$= V\mu_g(L_f / K_f + L_p/K_p) \qquad (12)$$

โดยที่ ΔP_0 = ความดันลดทั้งหมด
ΔP_f = ความดันลดผ่านใยกรอง
ΔP_p = ความดันลดผ่านชั้นอนุภาค

ความดันลดผ่านผ้ากรอง (ΔP_f)ควรจะมีค่าคงที่สำหรับผ้ากรองและฝุ่นที่กำหนด ส่วนความดันลดผ่านชั้นอนุภาค (ΔP_p) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคทับถมมากขึ้น สำหรับสภาพการทำงานที่กำหนดให้ (ความหนืดของก๊าซและความเร็วที่ผิวหน้า) ΔP_p จะเป็นฟังก์ชั่นของ permeability ของฝุ่น (K_p) และความหนาของชั้นฝุ่น (L_p) ส่วนความหนาของชั้นฝุ่นก็เป็นฟังก์ชั่นของเวลาการทำงาน (t)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแปรของความดันลดผ่านชั้นฝุ่น (ΔP_p) กับเวลาอาจหาได้จากหลักที่ว่ามวลของฝุ่นที่เก็บได้ในเวลา t หลังจากการเริ่มต้นจะเท่ากับ ปริมาตรการไหลของก๊าซคูณกับช่วงเวลาการทำงานคูณกับมวลของฝุ่นในกระแสก๊าซต่อหน่วยปริมาตร (L_d)

$$\text{มวลที่เก็บได้} = VAtL_d \qquad (13)$$

โดยที่ V = ความเร็วของก๊าซในแนวตั้งฉากกับเครื่องกรอง

A = พื้นที่หน้าตัดของเครื่องกรอง

t = เวลาการทำงานของเครื่องกรอง

L_d = มวลของฝุ่นในกระแสก๊าซต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซ

และในขณะเดียวกันมวลของฝุ่นที่เก็บได้ก็เท่ากับความหนาแน่นของชั้นอนุภาค (ρ_c) บนผิวเครื่องกรองคูณกับปริมาตรของฝุ่นที่เก็บได้ในเวลา t

$$\text{มวลที่เก็บได้} = \rho_c(AL_p) \qquad (14)$$

เมื่อเทียบสมการข้างต้นจะได้ว่า

$$L_p = VtL_d/\rho_c \qquad (15)$$

ดังนั้นความดันลดผ่านฝุ่นที่ทับถมใหม่ ๆ จะมีค่าเป็น

$$\Delta P_p = L_p\mu_g V/K_p = (VtL_d/\rho_c)(\mu_g V/K_p)$$

$$= V^2 tL_d\mu_g / K_p \rho_c \qquad (16)$$

ดังนั้นความดันลดทั้งหมดอาจเขียนได้ว่า

$$\Delta P_o = V\mu_g(L_f / K_f + VtL_d/\rho_c K_p) \qquad (17)$$

เนื่องจาก L_f และ K_f เป็นค่าเฉพาะสำหรับผ้ากรองและ ρ_c กับ K_p เป็นค่าเฉพาะของอนุภาคที่ทับถม ดังนั้นอาจจัดกลุ่มใหม่ และเขียนได้ดังนี้

$$\Delta P_o = V\mu_g(K_o + K_1 W) \qquad (18)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ K_0 = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของผ้ากรอง

= L_f / K_f

K_1 = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของชั้นอนุภาค เป็นฟังก์ชั่นของรูปร่างและความชื้นของชั้นอนุภาค

= $1/\rho_c K_p$

W = เป็นมวลของชั้นอนุภาคต่อพื้นที่หน้าตัดของเครื่องกรอง

= $VAtL_d/A =$ VtL_d

– แรงที่ใช้ในการกรอง

การแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันลดอาจมีการแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปของ แรง ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น Dennis and Klemm [11] ได้เสนอรูปแบบคำจำกัดความใหม่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างความดันลดผ่านชั้นอนุภาค (ΔP_p) กับความเร็วของก๊าซที่ผิวหน้า (V) เรียกว่า แรงในการกรอง (S) และ ค่าแรงในการกรองนี้อาจเขียนให้อยู่ในค่าของมวลของฝุ่นที่ถูกเก็บได้ที่เวลา t ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของก๊าซ (W)

ดังนั้น $S = \Delta P_p/V$

$= K_1\mu_g VtL_d$ (19)

จาก $W = VtL_d$ (20)

จะได้ว่า $S = K_2W$ (21)

โดยที่ $K_2 = K_1\mu_g$

จากความสัมพันธ์ในรูปของ แรง สมการ (18) อาจนำมาเขียนได้ใหม่ ซึ่ง Williams,Hatch & Greenberg ได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นมากำหนดความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความดันลดดังนี้

$$\Delta P = S_E V + K_2 WV$$

$$= S_E V + K_2 C_i V^2 t \quad (22)$$

โดย ΔP = ค่าความดันลด , in. H_2O หรือ N/m^2

S_E = drag ของผ้ากรองเมื่อทำความสะอาดแล้ว **(effective residual drag)**, in. H_2O /lbm หรือ $N.min/m^3$

V = ค่า A/C หรือ G/C, fpm หรือ m/mm

K_2 = สัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะ **(specific resistance coefficient)**, in. H_2O. ft-min/lb หรือ N.min/g.m

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

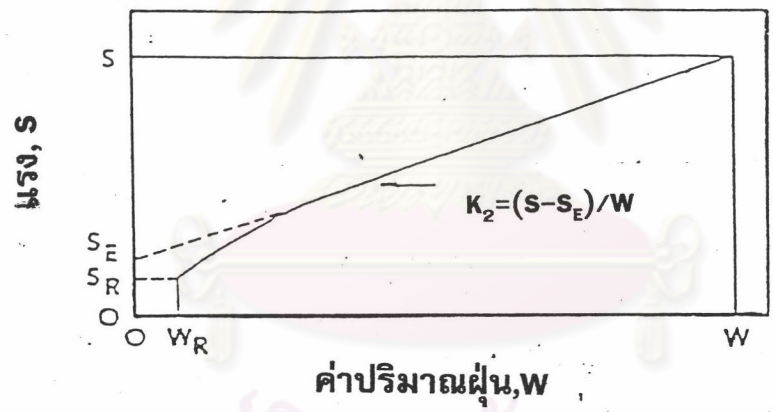
หอสมุดกลาง สถาบัน...
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C_i = ความเข้มข้นของฝุ่นในกระแสอากาศเข้า, lb/ft^3 หรือ g/m^3

t = เวลาที่ใช้ในการกรอง , min

ซึ่งสมการดังกล่าวใช้กับ ถุงกรองชนิด REVERSE AIR CLEANING & SHAKING

ค่า S_E เป็นค่าที่ใช้วัด ค่าแรง สำหรับผ้ากรองที่ทำความสะอาดแล้ว แต่ยังมีฝุ่นติดแน่นในเนื้อผ้าและเอาออกยาก รูปที่ 3.1 เป็นการสร้างกราฟระหว่าง แรง กับน้ำหนักของฝุ่นที่สะสมอยู่บนเนื้อผ้าและแสดงค่า S_E ค่า W_R เป็นปริมาณของฝุ่นที่ยังค้างบนผ้ากรองหลังจากทำความสะอาดแล้วสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะ (K_2) เป็นลักษณะเฉพาะของฝุ่นหรืออนุภาค ค่าที่ถูกต้องของ S_E และ K_2 นั้นต้องได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรง กับปริมาณฝุ่นบนผ้ากรอง

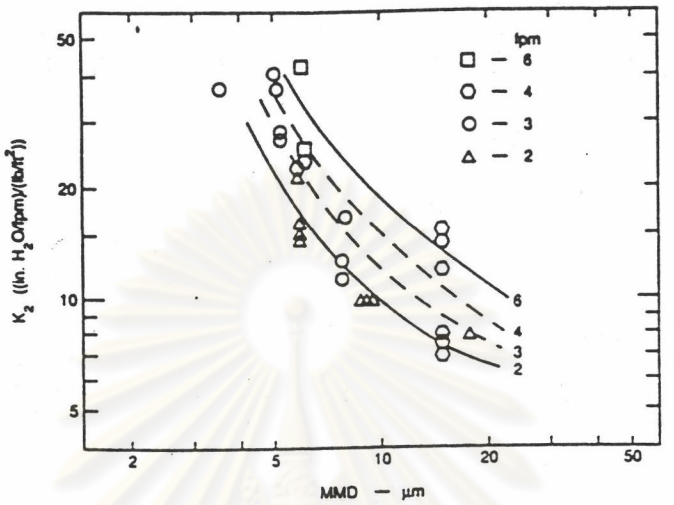
(Dennis and Klemm,1986)

ค่า สัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะ , K_2 เป็นคุณลักษณะของฝุ่นที่สะสมเป็นชั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- ชนิดของฝุ่น
- ขนาดของฝุ่น
- ความเร็วในการกรอง

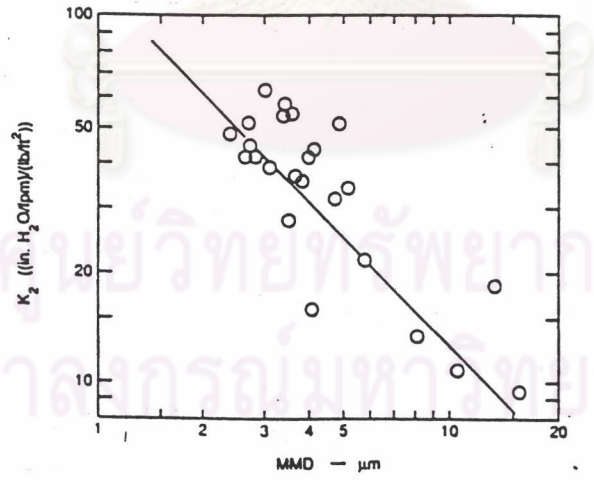
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการทดลองของ Dennis et al และ Davis & Kurzynske [12] ในการศึกษาขนาดของฝุ่นที่มีผลต่อค่า K_2 จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงได้ในรูปกราฟ ที่ 3.2-3.3 ซึ่งเป็นข้อมูลของแต่ละท่าน ตามลำดับ



รูปที่3.2 ขนาดของฝุ่นที่มีผลต่อค่า K_2 ที่ความเร็วในการกรองต่าง ๆ

(Dennis et al และ Davis & Kurzynske,1980)



รูปที่3.3 ขนาดของฝุ่นที่มีผลต่อค่า K_2ที่ความเร็วในการกรอง = 4ฟุตต่อนาที

(Dennis et al และ Davis & Kurzynske,1980)

จากความสัมพันธ์ที่ได้ค่า K_2 ไม่ได้ขึ้นกับขนาดของอนุภาคอย่างเดียวแต่จะมีค่าของความเร็วในการกรองที่มีผลต่อค่า K_2 ด้วยดังนั้นจึงถูกกำหนดเป็นสมการ

$$K_2 = kV^x \quad (23)$$

ซึ่ง Dennis et al.[12] ได้หาค่า x ออกมาได้อยู่ในช่วง 0.5-1.0

จากงานวิจัยยังพบอีกว่าสมการที่เหมาะสมในการใช้กำหนดความสัมพันธ์ค่า K_2 กับขนาดของอนุภาค คือ

$$K_2 = 118.4MMD^{-1.10} \quad (24)$$

โดยที่ MMD คือ ขนาดของอนุภาค

จากภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของถุงกรองที่กล่าวมาแล้วนั้นจะได้ว่าเมื่อความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้การแทรกผ่านของฝุ่นที่พื้นผิวของถุงกรองเพิ่มขึ้น ตลอดจนการสะสมตัวของฝุ่นบนพื้นผิวของถุงกรองจะมีการสะสมตัวมากขึ้น เมื่อมีการสะสมตัวของฝุ่นมีมากขึ้นจึงทำให้ยากต่อการที่จะทำให้หลุดจากพื้นผิวของถุงกรองได้ ซึ่งจะทำให้ค่าความดันลดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกรองจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอัตราการกรองมีค่าต่ำมาก ค่าความดันลดสูงเกินกว่ากำหนด จึงต้องมีการทำความสะอาดถุงกรองเพื่อให้มีสมรรถนะดังเดิมเหมือนตอนเริ่มต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การตรวจวัดปริมาณฝุ่นด้วยวิธี Stack Sampling

4.1 หลักการความสำคัญในการเก็บตัวอย่างฝุ่นด้วยวิธี Stack Sampling[13]

- วิธีการวัดปริมาณฝุ่น ใช้หลักการตรวจวัด US. EPA. Method 5

- หลักการ

การวัดปริมาณฝุ่นและก๊าซภายในปล่อง มีหลักการที่ต่างกันคือ การวัดปริมาณฝุ่นจะต้องทำการวัดโดยการดูดอากาศเข้ามาด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของกระแสอากาศภายในปล่องมิฉะนั้นจะทำให้ปริมาณฝุ่นที่ดูดเข้ามามีค่าน้อยหรือมากกว่าที่เป็นจริงได้ กล่าวคือ ถ้าดูดด้วยความเร็วมากไป จะได้ฝุ่นจำนวนมาก แต่ถ้าดูดด้วยความเร็วน้อยไปก็จะได้ฝุ่นน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ทั้ง ๆ ที่ปริมาตรของอากาศที่เก็บได้เท่ากัน การเก็บตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณฝุ่นจึงต้องกำหนดความเร็วของการดูดอากาศให้เท่ากับความเร็วของอากาศในปล่องเสมอ เรียกการเก็บตัวอย่างแบบนี้ว่า การเก็บตัวอย่างแบบ ไอโซไคเนติก (Isokinetic Sampling)

สำหรับการเก็บตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณก๊าซนั้น เนื่องจาก โมเลกุลของก๊าซมีการแพร่กระจายกลมกลืนกับโมเลกุลของอากาศ ฉะนั้นจึงไม่จำเป็นต้องดูดตัวอย่างอากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของอากาศในปล่อง

มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดวิธีการชักตัวอย่างจากปล่องไอเสียโดยมีเครื่องเก็บตัวอย่างอยู่นอกปล่องกำหนดโดย สำนักงานอนุรักษ์สภาวะแวดล้อมแห่งสหรัฐ (E.P.A. Environmental Protection Agency (Dec. 23, 1971) Standards for performance for New Stationary Sources.) มาตรฐานของ E.P.A. นี้ เป็นมาตรฐานที่มีรายละเอียดและความเข้มงวดที่สุดสำหรับในขณะนี้ อุปกรณ์ชักตัวอย่างมีเช่นเดียวกับที่ระบุใน A.S.T.M. แต่บังคับให้ใช้ orifice flow meter ด้วย ระบบชักตัวอย่าง (Stack Sampler) ที่สมบูรณ์แสดงได้ดังรูป ท่อชักตัวอย่างทำด้วยไพเร็กซ์เผาร้อนหรือโลหะกันสนิม หัวดูดเป็นเหล็กสเตนเลสขอบคม ประกอบ pitot tube แบบติดกับท่อเพื่อให้สามารถวัดความเร็วได้พร้อมกับที่ทำการชักตัวอย่าง

ตัวกรองอนุภาคที่กำหนดให้ใช้คือกระดาษกรองใยแก้ว M.S.A. 1106 B H หรือที่มีคุณภาพเทียบเท่า กระดาษกรองนี้วางบนแผ่นแก้วรูพรุนและบรรจุในฝาครอบไพเร็กซ์เผาร้อน เครื่องมือต่อจากนี้อาจเป็นเครื่องปะทะ (impinger) หรือเครื่องควบแน่นก็ได้ (condenser) หลังจากนี้คือเครื่องดูดลมมาตรวัดก๊าซแบบแห้ง และ orifice flow meter

จำนวนและตำแหน่งชักตัวอย่างมีการกำหนดไว้อย่างมีรูปแบบ หลังการตรวจสอบความเร็วก๊าซบนหน้าตัดปล่องแล้ว จะต้องอุดหัวดูด และทดสอบการรั่วไหลก่อนทำการทดลอง โดยที่มาตรฐานยอมให้มีอัตราการรั่วไหลได้ไม่เกิน 0.6 ลิตร/นาที ที่สูญญากาศ 0.51 บาร์

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างฝุ่น[14]

ชุดเก็บตัวอย่าง ประกอบด้วย

4.2.1 หัวเก็บตัวอย่าง (Nozzle) ทำด้วยเหล็กไม่เป็นสนิมหรือแก้วปลายฝนเอียงทำมุม 30 องศา ภายในต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางคงที่และไม่มีรอยต่อ

4.2.2 ท่อเก็บตัวอย่าง (Probe) ทำด้วยแก้วไพเร็กซ์หรือเหล็กไม่เป็นสนิมที่ไม่มีรอยต่อ พร้อมด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนซึ่งสามารถรักษาอุณหภูมิของอากาศที่ทางออกในระหว่างการเก็บตัวอย่างให้อยู่ในระหว่างอุณหภูมิ 106 - 134 องศาเซลเซียส

4.2.3 Pitot Tube ใช้แบบ S หรือเทียบเท่าสามารถนำมาประกอบติดกับท่อเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเร็วของอากาศที่จะเก็บตัวอย่าง

4.2.4 Filter Holder ทำด้วยแก้วไพเร็กซ์ พร้อมด้วยแผ่น Glassfrit สามารถรองรับกระดาษกรอง , silicone rubber เป็นยางปะเก็นกันรั่ว . ไซโคลน สำหรับดักฝุ่นบางส่วนในตัวอย่างอากาศที่ดูดเข้ามาก่อนผ่านไปยังกระดาษกรองใน Filter holder ส่วนต่าง ๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะต้องรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 106-134 องศาเซลเซียส

4.2.5 เกจวัดความแตกต่างของความดัน (Differential Pressure Guage) จำนวน 2 ตัว โดยที่ตัวหนึ่งใช้สำหรับหาความเร็วของอากาศในปล่อง และอีกตัวหนึ่งใช้สำหรับหาความเร็วของตัวอย่างอากาศที่ดูดเข้ามา

4.2.6 Condenser ซึ่งประกอบด้วย Impinger ทำด้วยแก้วจำนวน 4 ใบ ต่อกันแบบอนุกรมด้วยข้อต่อโดยไม่มีรอยรั่ว Impinger ตัวที่ 1 , 3 และ 4 เป็นแบบ Modified Greenburg Smith หลอดแก้วตรงกลางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 ซม. อยู่สูงจากพื้น Impinger ประมาณ 1.3 ซม. Impinger ตัวที่ 2 เป็นแบบ Standard Greenburg Smith

4.2.7 ระบบเครื่องวัด (Metering System) ประกอบด้วยเกจวัดความดันสูญญากาศ ปั๊มชนิดไม่รั่ว เทอร์โมมิเตอร์ เครื่องวัดปริมาตรอากาศแห้ง พร้อมด้วยเครื่องมืออื่น ๆ ซึ่งจำเป็นในการควบคุมอัตราการเก็บตัวอย่างให้เป็นไปตาม Isokinetic

4.2.8 เครื่องวัดความดันอากาศ (Barometer) ที่สามารถวัดความดันบรรยากาศได้ถูกต้อง

4.3 ตำแหน่งและจำนวนจุดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างฝุ่น

การเลือกตำแหน่งเก็บตัวอย่าง และจำนวนจุดเก็บตัวอย่างบนพื้นที่หน้าตัดของปล่องที่เลือกไว้อย่างถูกต้องจะทำให้ได้ตัวอย่างซึ่งเป็นตัวแทนของอากาศทั้งหมดในปล่องได้อย่างใกล้เคียงที่สุด

ตำแหน่งเก็บตัวอย่างเพื่อหาปริมาณฝุ่นหรือเพื่อการวัดหาความเร็วของอากาศภายในปล่องควรจะอยู่ที่ระยะอย่างน้อย ประมาณ 8 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางปลายทิศทางการไหลจากตัวรบกวนการไหลต่าง ๆ ในผล่อง เช่น ข้องอ ท่อขยาย ท่อลด เป็นต้น แต่ถ้าไม่สามารถเลือกตำแหน่งเก็บตัวอย่างดังกล่าวข้างต้นได้ ก็อาจเลือกตำแหน่งเก็บตัวอย่าง ณ

ตำแหน่งประมาณ 2 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางปลายทิศทางการไหลจากตัวรบกวนการไหล

สำหรับปล่องที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะหาเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า ได้จาก

เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า = (2 * ความยาว * ความกว้าง) / (ความยาว + ความกว้าง)

จำนวนของจุดเก็บตัวอย่างสามารถแยกตามกรณีได้ดังนี้

- ในการหาปริมาณฝุ่นในปล่อง

1. ถ้าตำแหน่งเก็บตัวอย่าง อยู่ ณ ตำแหน่ง ตั้งแต่ 8 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางปลายทิศทางการไหลจากตัวรบกวนการไหล และ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางต้นทิศทางการไหลจากตัวรบกวนการไหล จำนวนจุดเก็บตัวอย่างจะเป็นดังนี้

ก. บนพื้นที่หน้าตัดกลมหรือสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือ เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า มากกว่า 0.61 เมตร จะต้องไม่ต่ำกว่า 12 จุด

ข. บนพื้นที่หน้าตัดกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.3 - 0.61 เมตร จะต้องไม่ต่ำกว่า 8 จุด

ค. บนพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าระหว่าง 0.3 - 0.61เมตร จะต้องไม่ต่ำกว่า 9 จุด

2. ถ้าตำแหน่งเก็บตัวอย่างอยู่ ณ ตำแหน่งที่น้อยกว่า 8 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางปลายทิศทางการไหลจากตัวรบกวนการไหลและน้อยกว่า 2 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางต้นทิศทางการไหลจากตัวรบกวนการไหล จำนวนจุดเก็บตัวอย่างจะหาได้จากระยะของตำแหน่งเก็บตัวอย่าง ถึงตัวรบกวนการไหลและเลือกค่าที่สูงกว่าเป็นจำนวนจุดเก็บตัวอย่างต่ำสุด ดังรูปที่ 3.4

- ในการหาความเร็วของอากาศในปล่อง

มีหลักการเช่นเดียวกับข้างต้นแต่ใช้รูปที่ 3.5

ตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างบนพื้นที่หน้าตัดของปล่องมีหลักการดังนี้

1. ปล่องที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลมจะกำหนดจุดเก็บตัวอย่างบนเส้นผ่าศูนย์กลางซึ่งตั้งฉากกัน 2 เส้น ตามตารางที่ 3.2 และดังตัวอย่างในรูปที่ 3.6 นอกจากนี้ ยังมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้คือ

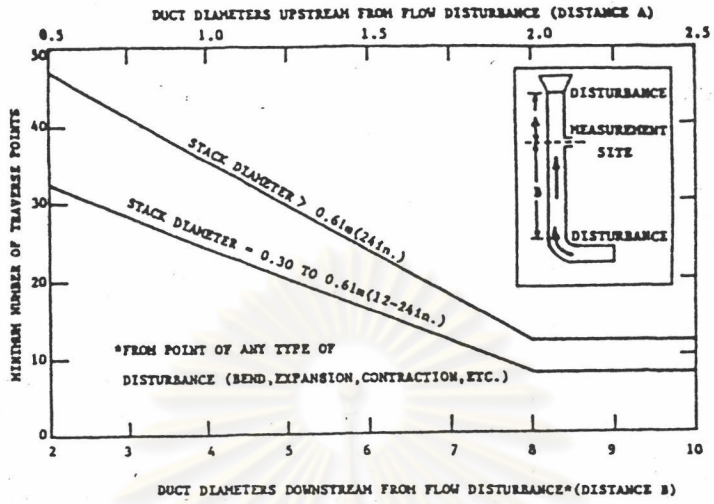
1.1 สำหรับปล่องที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 0.61 เมตร จุดเก็บตัวอย่างจะต้องอยู่ห่างจากผนังปล่องอย่างน้อยที่สุด 2.5 ซ.ม. ถ้าจุดเก็บตัวอย่างที่หาโดยตารางที่ 3.2 อยู่ห่าง

จากผนังปล่องน้อยกว่า 2.5 ซ.ม. จะต้องเลื่อนจุดเก็บตัวอย่างออกไปที่ตำแหน่ง 2.5 ซ.ม. จากผนังปล่อง หรือที่ตำแหน่งเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวเก็บตัวอย่างจากผนังปล่อง โดยเลือกค่าที่สูงกว่า ถ้าหากว่าจุดเก็บตัวอย่างใหม่นี้ซ้อนกับจุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ให้กระทำการเก็บตัวอย่างและบันทึกข้อมูลซ้ำ 2 ครั้ง เสมือนหนึ่งว่าเป็นคนละจุดกัน

1.2 สำหรับปล่องที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.61 เมตร จุดเก็บตัวอย่างจะต้องอยู่ห่างจากผนังปล่องอย่างน้อยที่สุด 1.3 ซ.ม. ถ้าจุดเก็บตัวอย่างที่หาโดยตารางที่ 3.2 อยู่ห่างจากผนังปล่องน้อยกว่า 1.3 ซ.ม. จะต้องเลื่อนจุดเก็บตัวอย่างออกไปที่ตำแหน่ง 1.3 ซ.ม. จากผนังปล่อง หรือที่ตำแหน่งเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวเก็บตัวอย่าง โดยเลือกค่าที่สูงกว่า

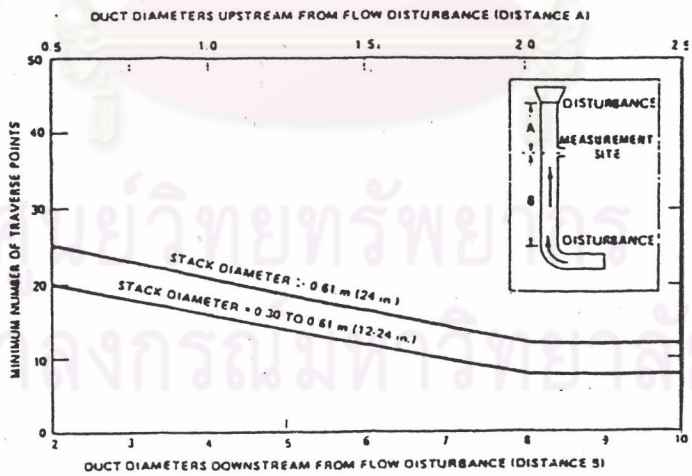
2. ปล่องที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ให้แบ่งพื้นที่หน้าตัดออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ ขนาดเท่า ๆ กัน เป็นจำนวนเท่ากับจำนวนจุดเก็บตัวอย่างข้างต้น แล้วจึงกำหนดตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างลงบนจุด Centroid ของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ แต่ละรูป ดังรูปที่ 3.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 จำนวนจุดเก็บตัวอย่างในการหาปริมาณฝุ่นในปล่อง

(Stern,1984)



รูปที่ 3.5 จำนวนจุดเก็บตัวอย่างในการหาความเร็วของอากาศในปล่อง

(Stern,1984)

Percent of stack diameter from inside wall to sampling point

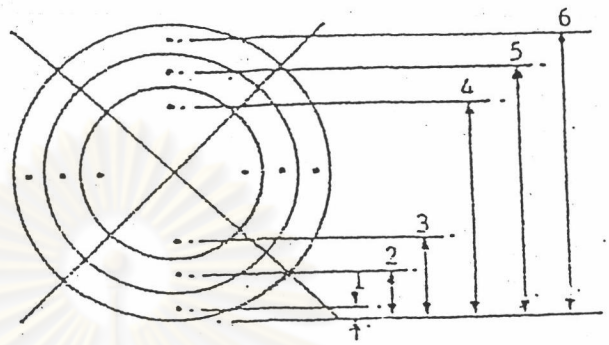
Sampling point number on a diameter	Number of sampling points on a diameter											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14.6	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	85.4	25.0	14.6	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4		93.3	70.4	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	7.9
5			85.4	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6	10.5
6			95.6	80.6	65.8	35.6	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6	13.2
7				89.5	77.4	64.4	36.6	28.3	23.6	20.4	18.0	16.1
8				96.8	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8	19.4
9					91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.2	23.0
10					97.4	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5	27.2
11						93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3	32.3
12						97.9	90.1	83.1	76.4	96.4	60.7	39.8
13							94.3	87.5	81.2	75.0	68.5	60.2
14							98.2	91.5	85.4	79.6	73.8	67.7
15								95.1	89.1	83.5	78.2	72.8
16								98.4	92.5	87.1	82.0	77.0
17									95.6	90.3	85.4	80.6
18									98.6	93.3	88.4	83.9
19										96.1	91.3	86.8
20										98.7	94.0	89.5
21											96.5	92.1
22											98.9	94.5
23												96.8
24												98.9

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงตำแหน่งของการจัดเก็บตัวอย่าง

(Stern,1984)

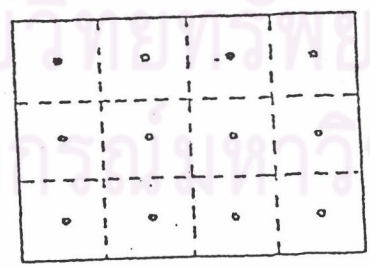
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Traverse Point	Distance %of diameter
1	4.4
2	14.7
3	29.5
4	70.5
5	85.3
6	95.6



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างบนพื้นที่หน้าตัดกลม

(Stern,1984)



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างบนพื้นที่หน้าตัดเหลี่ยม

(Stern,1984)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 หลักการคำนวณหาความเร็วและอัตราการไหลของกระแสก๊าซ (Universal Stack Sampler Operation Manual , 1992)

ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซในปล่องหาได้จากความหนาแน่นของก๊าซ และค่าความแตกต่างของความดันจาก Pitot Tube ที่เป็นชนิด Type S (Stausscheibe or reverse type) อัตราความเร็วเฉลี่ยของกระแสก๊าซ ซึ่งค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้จากการใช้เครื่องเก็บอนุภาค (Stack Sampler) ตามมาตรฐานของ EPA แสดงได้ดังความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_s = K_p\, C_p\, (\sqrt{(\Delta P)})_{avg}\, \sqrt{(T_{s(avg)}/(P_s\, M_s))} \qquad (25)$$

โดยที่ V_s = ความเร็วของอากาศในปล่อง , เมตร/วินาที

K_p = 34.97 เมตร/วินาที $[(\text{กรัม/กรัมโมล})(\text{มม.ปรอท})/(^{\circ}\text{K})(\text{มม.น้ำ})]^{1/2}$

C_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Pitot tube ที่ใช้

T_s = อุณหภูมิสัมบูรณ์โดยเฉลี่ยของอากาศในปล่อง, $^{\circ}$K

ΔP = Velocity head (ค่าความแตกต่างของความดันจาก Pitot tube) ของอากาศในปล่องโดยเฉลี่ย , มม.น้ำ

M_s = น้ำหนักโมเลกุลของอากาศในปล่อง , กรัม/กรัมโมล

P_s = ความดันสถิตย์ของอากาศในปล่อง , มม.ปรอท

อัตราการไหลสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_s = [3600(1-B_{ws})V_s A(P_s/P_{std})(T_{std}/T_s)] \qquad (26)$$

โดยที่ Q_s = อัตราการไหลแห้งของอากาศในปล่องที่สภาวะมาตรฐาน , ลบ.ม./ชั่วโมง

B_{ws} = สัดส่วนปริมาตรไอน้ำในอากาศ

V_s = ความเร็วของอากาศในปล่อง , เมตร/วินาที

A = พื้นที่หน้าตัดของปล่อง , ตารางเมตร

T_{std} = 20 องศาเซลเซียส + 273 = 293 องศาเคลวิน

P_s = ความดันสัมบูรณ์ของอากาศในปล่อง , มม.ปรอท

P_{std} = 760 มม.ปรอท