หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

การกำจัดอนุภาคจากแก๊สไอเสีย

หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์กำจัดอนุภาค คือ การให้มีแรงภายนอกกระทำต่ออนุภาคหรือการสร้างตัวกีดขวางอนุภาคเพื่อทำให้อนุภาคแยกตัวออกจากแก๊สไอเสีย เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่ออนุภาคก็จะเกิดส่วนประกอบของความเร็วในทิศทางที่แตกต่างจากทิศทางการไหลของแก๊สไอเสีย ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคโดยอาศัยหลักการแยกอนุภาคด้วยแรงกระทำจากภายนอกเราต้องสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สภาวะนั้นๆได้ในขั้นแรกของการเลือกระบบที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคขึ้นกับความเข้าใจพื้นฐานต่างๆ เช่น

- คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของอนุภาคและแก๊ส
- อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สไอเสีย
- ความเข้มข้นของอนุภาคในแก๊สไอเสีย
- อุณหภูมิและความดันของแก๊สไอเสีย
- ความชื้นของแก๊สไอเสีย

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงต่อไปในการเลือกระบบดักเก็บอนุภาค คือ ต้นทุนของการก่อสร้างและการนำไปใช้งานจริง ขนาดของอุปกรณ์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับราคาของมัน แฟกเตอร์ของการปฏิบัติงานก็มีอิทธิพลต่อต้นทุน เช่น ค่าความดันสูญเสียของแต่ละอุปกรณ์, ประสิทธิภาพที่ต้องการ, ปริมาณของของเหลวที่ต้องใช้ในระบบ(ในระบบเปียก)

อุปกรณ์กำจัดอนุภาคจากแก๊สไอเสียอาจแบ่งตามกลไกทางกายภาพได้ดังนี้

1. การตกตะกอน (Sedimentation): อนุภาคในแก๊สไอเสียที่ไหลผ่านอุปกรณ์จะตกเนื่องจากแรงโน้มถ่วงสู่บริเวณดักอนุภาค อุปกรณ์ชนิดนี้เรียกกันว่าชนิดห้องดักอนุภาค (Settling chamber)

2. การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคที่ถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้า (Migration of charged particle in an electric field) แรงทางไฟฟ้าสถิตย์บนอนุภาคจะกระตุ้นให้อนุภาคถูกสะสมบนพื้นผิวของอุปกรณ์

3. การสะสมอนุภาคเนื่องจากแรงเฉื่อย (Inertial deposition): เมื่อแก๊สไอเสียถูกทำให้เปลี่ยนทิศทางการไหล อนุภาคจะพยายามรักษาแนวทิศทางเดิมไว้โดยแรงเฉื่อยของมัน ตัวอย่างของอุปกรณ์แบบนี้ได้แก่ไซโคลน, สครับเบอร์, และตัวกรอง

4. การกระจายแบบบราวเนี่ยน (Brownian Diffusion): อนุภาคจะถูกทำให้ฟุ้งกระจายจากตัวกีดขวางการไหล ซึ่งทำให้มันมีทิศทางการไหลที่ไม่แน่นอน อนุภาคบางส่วนจะสัมผัสและติดกับตัวกีดขวางทำให้เกิดการเก็บอนุภาคไว้ อุปกรณ์ที่ใช้หลักการนี้เหมาะสำหรับเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

อุปกรณ์สะสมอนุภาคแบ่งเป็น 5 ระดับคือ

1. ห้องดักอนุภาคโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity settling chambers)
2. ไซโคลน (Cyclone, centrifugal separators)
3. ตัวเก็บสะสมแบบเปียก (Wet collectors)
4. แผ่นกรองอนุภาค (Fabric filters)
5. ตัวแยกอนุภาคโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitators)

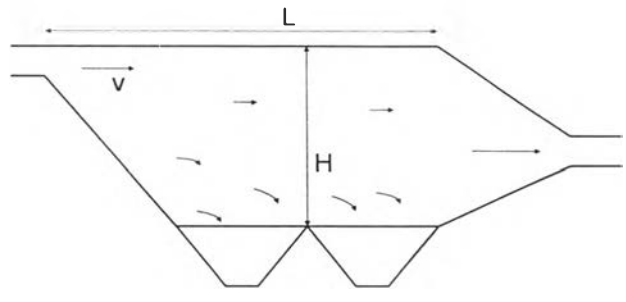
ในอุกรณ์แต่ละระดับนั้นมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามการปฏิบัติการณ์และการก่อสร้างที่แตกต่างกันของแต่ละชนิด รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์สามารถค้นคว้าได้จากตำราอื่น ๆ หรือจากโรงงานที่ผลิตอุปกรณ์นั้น

ห้องดักอนุภาคโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง

ห้องดักอนุภาคโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง คือ ห้องขนาดใหญ่ที่แก๊สไอเสียไหลผ่านและอนุภาคในแก๊สไอเสียจะตกลงสู่พื้นห้องดักอนุภาคโดยแรงโน้มถ่วง ความเร็วของแก๊สที่ผ่านห้องดักจะต้องต่ำพอที่จะไม่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคที่ตกลงมาแล้ว ความเร็วของแก๊สจะลดลงโดยการขยายท่อทางเข้าสู่ห้องดักอนุภาคให้ใหญ่ขึ้น ห้องดักอนุภาคสามารถที่จะเก็บอนุภาคขนาดใหญ่และโดยปกติห้องดักอนุภาคจะถูกใช้เป็นอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สไอเสียในกระบวนการแรก (Precleaner) เพื่อที่จะกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคที่กัดกร่อนก่อนผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ดักอนุภาคชนิดอื่นๆ ข้อดีของห้องดักอนุภาคคือ สร้างง่าย, ราคาถูก, ความดันสูญเสียน้อย, ไม่ต้องการใช้น้ำในกระบวนการ, ค่าบำรุงรักษาต่ำ, ใช้พลังงานต่ำ, ค่าติดตั้งต่ำ ส่วนข้อเสียเปรียบคือ มีขนาด

โครงสร้างใหญ่, ประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบอื่นๆ ห้องดักอนุภาคอย่างง่ายจะมีลักษณะในรูปที่ 2.1 อนุภาคในแก๊สไอเสียจะตกลงที่ปล่องด้านล่าง

สำหรับห้องดักอนุภาคที่ต้องการไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาค ความเร็วของแก๊สภายในห้องดักอนุภาคควรมีค่าต่ำกว่า 3 m/s และถ้าต้องการให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้นควรให้มีความเร็วต่ำประมาณ 0.3 m/s [5]



รูปที่ 2.1 แสดง ห้องดักอนุภาคโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง

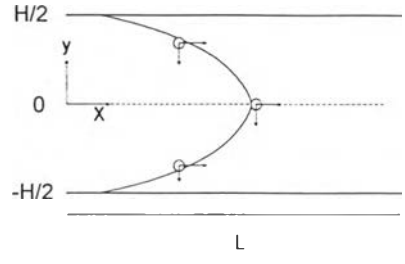
ในการวิเคราะห์สมรรถนะของห้องดักอนุภาคสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือลักษณะการไหลของแก๊สที่ไหลผ่านในอุปกรณ์ เราสามารถจำแนกการไหลได้ 3 แบบคือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)
2. การไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องดักอนุภาค (Turbulent flow)

2.1 *การไหลแบบราบเรียบ*

การไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มรูปแบบแล้วจะมีลักษณะรูปแบบความเร็วเป็นพาราโบลิคดังรูปที่ 2.2 การไหลในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นแบบราบเรียบเมื่อเรย์โนล์นัมเบอร์น้อยกว่า 2300 และเวลาที่ต้องการให้อนุภาคตัวหนึ่งที่ตำแหน่งความสูง y ตกถึงพื้นห้องดักอนุภาคคือ y/v_t เมื่อ v_t คือ ความเร็วสุดท้ายทีอนุภาคตกลงสู่พื้นผิวโดยไม่คิดผลจากการผสมกันในแนวดิ่ง (Vertical mixing) และไม่คิดผลจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน

จากรูปที่ 2.2 รูปแบบความเร็วของแก๊สไอเสียที่ตำแหน่ง x (u_x) ในการไหลแบบราบเรียบระหว่างแผ่นราบ 2 แผ่นที่วางขนานกันและห่างกัน H จะหาค่าได้จากสมการดังนี้ [6]



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการไหลแบบราบเรียบภายในห้องดักอนุภาค

$$u_x = \frac{3}{2}\bar{u}\left[1-\left(\frac{2y}{H}\right)^2\right] \qquad (2.1)$$

เมื่อ $\bar{u}$ = ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)

u_x = ความเร็วของอนุภาคที่ตำแหน่ง x

y = 0 เป็นตำแหน่งที่ศูนย์กลางของท่อ

โดยเราสมมุติว่าอนุภาคมีค่าความเข้มข้นสม่ำเสมอ N_0

อนุภาคขนาด d_p ที่สภาวะเริ่มต้น x = 0, y = y* จะถูกเก็บได้ที่ x = L, y = -H/2 ความสูง y* นี้เราเรียกว่าความสูงวิกฤติ อนุภาคขนาด d_p ที่เข้ามาในห้องดักอนุภาคที่ความสูง $y \geq y^*$ จะไม่ถูกเก็บสะสม การดักเก็บอนุภาคจะขึ้นกับค่า y*

สำหรับอนุภาคทรงกลม ณ อุณหภูมิห้อง ความเร็วสุดท้ายคือ

$$v_t = \frac{\bar{u}H}{L} = \frac{Q}{LW} \qquad (2.2)$$

อนุภาคตัวสุดท้ายจะถูกเก็บสะสมภายในช่วงเวลา t_f ในการตกแนวดิ่งระยะทาง y*+H/2 ดังนั้น v_t คือคงที่

อนุภาคที่ความสูงวิกฤตจะตกสู่ห้องดักอนุภาคในช่วงเวลา t_f

$$t_f = \frac{y^* + H/2}{v_t} \tag{2.3}$$

ความเร็วของของอนุภาคที่ตกในแนวดิ่งที่เวลาใดๆหลังจากอนุภาคเข้ามาในห้องดักอนุภาค คือ $dy/dt = v_y = -v_t$ เมื่ออินทิเกรตจะได้สมการ

$$y = y^* - v_t t \tag{2.4}$$

เมื่อ y คือตำแหน่งในแนวดิ่งของอนุภาคที่เข้ามาในห้องดักอนุภาค

ความเร็วในแนวระนาบคือ $dx/dt=v_x$ หรือ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{3}{2}\bar{u}\left[1 - \frac{4}{H^2}\left(y^* - v_t t\right)^2\right] \tag{2.5}$$

เมื่อความเร็วในแนวระนาบของอนุภาคคือ ความเร็วของแก๊สจากสมการที่ (2.1) โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.5) จากบริเวณทางเข้าถึงบริเวณทางออกของห้องดักอนุภาคเราจะได้

$$\frac{LH^2}{6\bar{u}} = t_f\left(\frac{H^2}{4} - y^{*2}\right) + v_t y^* t_f^2 - \frac{v_t^2}{3}t_f^3 \tag{2.6}$$

จากสมการ (2.3) และ (2.6) จะได้

$$\beta = \left[1 - 4\left(\frac{y^*}{H}\right)^2\right]\left(\frac{\alpha}{2} + \alpha\frac{y^*}{H}\right) + 4\alpha\frac{y^*}{H}\left(\frac{1}{2} + \frac{y^*}{H}\right)^2 - \frac{4}{3}\alpha\left(\frac{1}{2} + \frac{y^*}{H}\right)^3 \tag{2.7}$$

เมื่อ $\beta = 2v_t/3\bar{u}$

$\alpha = H/L$

ในการหาสมการเพื่อใช้หาประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคจำเป็นต้องคำนวณหาเศษส่วนของอนุภาคขนาด d_p ที่ถูกเก็บในอุปกรณ์เก็บอนุภาคความยาว L จะได้ว่าอัตราการไหลของอนุภาคที่เข้าสู่ห้องดักอนุภาคที่มีความกว้าง W คือ จำนวนของอนุภาคต่อหน่วยเวลา นั่นคือ

$$\int_{-H/2}^{H/2} N_0 u_x(y) W dy = N_0 \bar{u} WH$$

จำนวนอนุภาคที่ถูกเก็บได้ต่อหน่วยเวลา คือ ส่วนของอัตราการไหลเข้าของอนุภาคระหว่าง y = -H/2 และ y = y*

$$\int_{-H/2}^{y^*} N_0 u_x(y) W dy = N_0 W \int_{-H/2}^{y^*} u_x(y) dy$$

ดังนั้นประสิทธิภาพการดักเก็บคือ อัตราส่วนของอนุภาคที่ถูกเก็บได้ต่ออนุภาคที่ไหลเข้าไปทั้งหมด

$$\eta(d_p) = \frac{N_0 W \int_{-H/2}^{y^*} u_x(y) dy}{N_0 \bar{u} WH} = \frac{1}{H\bar{u}} \int_{-H/2}^{y^*} u_x(y) dy \qquad (2.8)$$

โดยการแทนค่าสมการที่ (2.1) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\eta(d_p) = \frac{1}{2} + \frac{3y^*}{2H} - 2\left(\frac{y^*}{H}\right)^3 \qquad (2.9)$$

จากสมการ (2.7) และสมการ (2.9) จะพบว่ามีตัวที่ไม่ทราบค่าอยู่ 2 ตัวคือ y*/H และ η เพื่อให้ง่ายแก่การแก้สมการสมมุติให้ z = 1/2 + (y*/H)

$$\frac{\beta}{\alpha} = 2z^2 - \frac{4}{3}z^3 \qquad (2.10)$$

และสามารถเขียนสมการที่ (2.9) ได้เป็น

$$\eta(d_p) = 3z^2 - 2z^3 \tag{2.11}$$

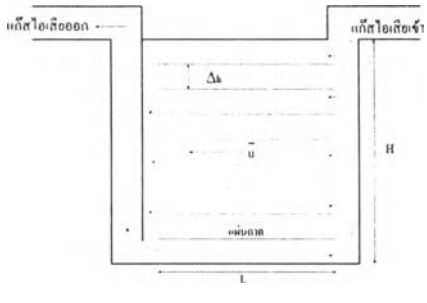
เมื่อรวมสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะได้

$$\eta(d_p) = \frac{3\beta}{2\alpha} = \frac{v_t L}{\bar{u} H} \tag{2.12}$$

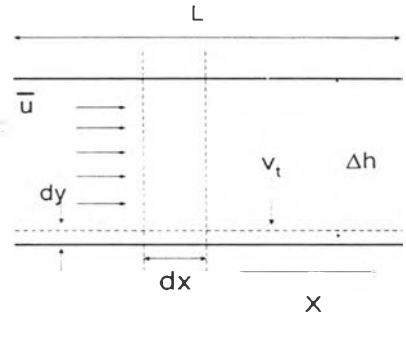
สมการที่ 2.12 คือสมการที่ใช้หาประสิทธิภาพของการดักเก็บอนุภาคของแก๊สไอเสียในห้องดักอนุภาคที่มีความกว้าง W, ความยาว L และ ความสูง H ที่มีการไหลแบบราบเรียบในห้องดักเก็บอนุภาค ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมากกว่า 100 ไมครอน [7] ก็สามารถใช้กฎของสโตร์คหาค่า $v_t = gd_p^2(\rho_p - \rho_g)/18\mu$ โดยไม่คิดผลเนื่องจากลื่นไถล (Slip correction factor) แต่ถ้าอนุภาคที่จะเก็บมีขนาดใหญ่กว่า 200 ไมครอน เราจะคำนวณความเร็วสุดท้ายในการตกของอนุภาคโดยการใช้วิธีหา Drag coefficient

2.2 *การไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องดักอนุภาค*

การไหลแบบปั่นป่วนในห้องเก็บอนุภาคเพื่อให้ง่ายแก่การศึกษาจะถูกสมมุติว่ามีความเร็วที่ที่หน้าตัดการไหลเป็นรูปแบบเดียวกัน, อนุภาคผสมเข้ากันได้อย่างดีในแนวดิ่ง, อนุภาคมีความเข้มข้นสม่ำเสมอทั่วห้องดักอนุภาค และอนุภาคที่ถูกเก็บได้จะเกิดขึ้นที่ชั้นบางๆที่พื้นผิวของชั้นดักอนุภาคดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 ห้องดักอนุภาคชนิดมีแผ่นกาดภายใน



รูปที่ 2.4 การไหลแบบปั่นป่วนในห้องดักอนุภาค

การไหลในช่องทางสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถสมมุติให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนได้ เมื่อ Re > 2800 [8], Re > 3000 [3] เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลในท่อเรากำหนดให้เป็น $Re_c = 4r_H v\rho/\mu$ เมื่อ r_H คือ รัศมีไฮโดรลิคของท่อ ถ้าท่อสูง Δh, กว้าง W จะมีค่า $r_H = \Delta hW / [2(\Delta h + W)]$, ค่า v คือ ส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) หารด้วยพื้นที่หน้าตัด (HW) ถ้าท่อหรือห้องดักอนุภาคในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยแผ่นถาดจำนวน n ถาด ช่องระหว่างถาดมีอัตราการไหล Q/n และมีระยะห่างระหว่างแผ่นถาด H/n (ไม่คิดความหนาของถาด) เรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับการไหลภายในช่องระหว่างถาด [8] คือ

$$\mathrm{Re} = \frac{2Q\rho_g}{(H + nW)\mu_g} \tag{2.13}$$

พิจารณาอนุภาคตัวหนึ่งที่บริเวณชิดผนังในช่วงเวลา dt อนุภาคจะเดินทางด้วยระยะทาง dx = $\bar{u}$dt เมื่อ $\bar{u}$ คือความเร็วเฉลี่ยของการไหลในห้องดักอนุภาค ในช่วงระยะเวลาเดียวกัน dt อนุภาคจะตกด้วยระยะ dy = $v_t$dt ดังนั้นระยะทาง dx และ dy จะมีความสัมพันธ์กันคือ dy = $v_t$dx/ $\bar{u}$

ในการพัฒนาสมการการออกแบบทั้งหมดของห้องดักอนุภาคที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะพิจารณาว่ามีอนุภาคกระจายสม่ำเสมอในบริเวณ dx (รูปที่ 2.4) และเศษส่วนของอนุภาคในชั้นบางที่มีความหนา dy จะมีค่าเท่ากับ dy/Δh เนื่องจาก dy ถูกนิยามในเทอมของ dx ดังนั้น dx เป็นเพียงระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวราบในขณะที่อนุภาคตกเป็นระยะทาง dy อนุภาคทั้งหมดใน dy จะถูกดักเก็บเอาไว้ตลอดระยะทาง dx ดังนั้นเศษส่วนของอนุภาคที่ถูกดักเก็บไว้ในระยะทาง dx คือ dy/Δh = $v_t$dx / $\bar{u}\Delta h$

ถ้าพื้นที่หน้าตัดของห้องดักอนุภาค คือ A_c สมดุลจำนวนอนุภาคตลอดระยะทาง dx คือ

$$\bar{u}A_c\left(N\big|_x - N\big|_{x+dx}\right) = \left(\frac{v_t dx}{\bar{u}\Delta h}\right)\bar{u}A_c N\big|_x \tag{2.14}$$

ทางซ้ายของสมการ คือ ผลต่างของการไหลของอนุภาคเข้าและออกจากปริมาตร $A_c$dx และทางขวา คือ จำนวนของอนุภาคที่ถูกดักเก็บในปริมาตรนั้น โดยการหารตลอดสมการนี้ด้วย dx และใส่ลิมิตให้ x เข้าใกล้ 0 จะได้

$$\frac{dN}{N} = -\frac{v_t}{\bar{u}\Delta h}dx \tag{2.15}$$

ถ้าความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคที่ทางเข้าห้องดักอนุภาคคือ N_0 ดังนั้นเมื่ออินทิเกรตสมการ 2.15 จะได้

$$N(x) = N_0 \exp(-\frac{v_t x}{\bar{u}\Delta h}) \tag{2.16}$$

ประสิทธิภาพย่อยของการดักเก็บอนุภาคที่ช่วงขนาด d_p ของห้องดักอนุภาคที่มีความยาว L คือ

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{N(L)}{N_0} = 1 - \exp\left(-\frac{v_t L}{\bar{u}\Delta h}\right) \tag{2.17}$$

เมื่อ

$$v_t = \frac{g d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{18\mu_g} \tag{2.18}$$

เมื่อแทนค่า v_t ลงในสมการที่ (2.17) จะได้สมการประสิทธิภาพย่อยของการดักเก็บอนุภาคขนาด d_p คือ

$$\eta(d_p) = 1 - \exp\left(-\frac{nLWg(\rho_p - \rho_g)d_p^2}{18\mu_g Q}\right) \tag{2.19}$$

เมื่อ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สที่ไหลผ่านห้องดักอนุภาค $Q = \bar{u}HW$

W คือ ความกว้างของห้องดักอนุภาค