

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 อุตสาหกรรมน้ำตาล

#### ความสำคัญของอุตสาหกรรมน้ำตาลต่อเศรษฐกิจไทย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมน้ำตาลในประเทศไทยได้วิวัฒนาการจากการผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้าเป็นอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกที่สำคัญ แม้จะเผชิญกับปัญหาและความยุ่งยากต่าง ๆ แต่ก็นับได้ว่าอุตสาหกรรมน้ำตาลของไทยได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างน่าพอใจ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เป็นมาถึง พ.ศ. 2544 นั้น อุตสาหกรรมน้ำตาลได้ขยายตัวไปอย่างมาก โดยเฉพาะมีโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลตั้งขึ้นใหม่หลายแห่งภายในประเทศ จนทำให้ผู้ผลิตและปริมาณการผลิตได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จนกระทั่งในปัจจุบันมีโรงงานน้ำตาลถึง 46 โรง ปริมาณอ้อยเข้าหีบประมาณ 60 ล้านตัน ชานอ้อยซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากขบวนการหีบอ้อย มีประมาณร้อยละ 25 ของอ้อยที่ใช้ผลิต ซึ่งปริมาณชานอ้อยที่ได้นับว่ามีปริมาณที่สูง โรงงานน้ำตาลจึงมีการนำชานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักสำคัญในหม้อไอน้ำ

#### วัตถุดิบและขั้นตอนการผลิต

วัตถุดิบที่ใช้คือ อ้อยที่มีความหวาน C.C.S. อยู่ในระดับประมาณ 9.0 ถึง 13.0 และขั้นตอนการผลิต แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนดังนี้

การหีบสกัดน้ำอ้อย	(Juice Extraction)
การทำน้ำอ้อยใส	(Juice Clarification)
การต้มระเหยน้ำอ้อย	(Evaporation)
การเคี่ยวและตกผลึกน้ำตาล	(Boiling and Crystallization)
การผลิตน้ำตาลทรายขาว	(Sugar Refinery)
การปั่นและการบรรจุน้ำตาล	(Centrifugal and Packing)

ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากอ้อย

นอกจากจะหีบย่อยไปทำน้ำตาลแล้ว ส่วนประกอบอื่น ๆ ของย่อยที่เหลือ เช่น ชานย่อย กากน้ำตาลหรือโมแลส (Molasses) และขี้ผึ้ง ฯลฯ ก็สามารถนำไปดัดแปลงให้เป็นประโยชน์ทางอื่นได้อีกด้วย

1. ชานย่อย (bagasse) หมายถึง เศษเหลือจากการหีบเอาน้ำย่อยออกจากท่อนย่อยแล้ว ชานย่อยถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ และหากชานย่อยยังคงเหลืออยู่อีกเนื่องจากหม้อไอน้ำใช้ไม่หมด ชานย่อยก็จะถูกนำไปใช้ทำ Fiber Board

2. กากน้ำตาล (Molasses) เป็นของเหลวสีดำที่เหนียวข้น เป็นเนื้อของสิ่งที่ไม่ใช่น้ำตาลที่ละลายปนอยู่ในน้ำย่อยซึ่งประกอบด้วย น้ำตาลซูโครส น้ำตาลอินเวอร์ท (invert sugar) และสารเคมี กากน้ำตาลจัดได้ว่ามีประโยชน์และมีคุณค่ามากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลกว่าร้อยละ 50 นำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล้าและแอลกอฮอล์, อุตสาหกรรมผลิตยีสต์, ผงชูรส, น้ำส้มสายชู และกรดมะนาว

3. ผลผลิตที่ได้จากการหมัก ได้แก่ เหล้ารัม, อุตสาหกรรมแอลกอฮอล์, ส่าเหล้า, อคติโดนและบิวทานอล, เซ็อยีสต์ที่ใช้เป็นอาหาร เป็นต้น

4. ผลผลิตที่เป็นอาหารอย่างอื่น ได้แก่ การใช้กากน้ำตาลเป็นอาหารสัตว์

### สมบัติของเยื่อชานย่อย

เส้นใยชานย่อยเฉลี่ยยาว 1.4 มม. กว้าง 0.02 มม. ส่วนประกอบทางเคมีของชานย่อยคล้ายกับของไม้เนื้อแข็ง (ไม้เนื้อแข็ง ในแง่การทำเยื่อกระดาษ) ส่วนประกอบดังกล่าวแปรไปตามชนิดพันธุ์ อายุและสภาพที่ชานย่อยเติบโตขึ้นมา ชานย่อยมีลิกนิน (lignin) น้อยกว่าไม้ยืนต้นอื่น ๆ บางชนิด ส่วนประกอบเซลลูโลส ชนิด Cross และ Bevan ของชานย่อย มีลักษณะคล้ายกับไม้ที่ใช้ทำกระดาษชนิดอื่น ๆ

### การใช้ประโยชน์ของชานย่อยในอุตสาหกรรม

ชานย่อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนี้

1. ผลิตเซลลูโลสชนิดบริสุทธิ์ (purified cellulose) ซึ่งนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผลิต rayon, pyroxalin, nitro cellulose และทำกระดาษชนิดเนื้อละเอียดซึ่งมีคุณภาพดี

2. ผลิตวัสดุก่อสร้างอาคารบ้านเรือน และทำเครื่องตกแต่งอื่น ๆ โดยผลิตเป็น hard board, soft board, fiber board และ acoustic board
3. ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำของโรงงาน ซึ่งโรงงานน้ำตาลในประเทศไทย เราใช้กันอยู่
4. ใช้ทำเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อใส่ให้กับอ้อยเอง

### หม้อไอน้ำและพลังงานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

หม้อไอน้ำที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำตาลนี้ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในโรงงานทั้งหมดเพื่อเป็นพลังงานในการขับเคลื่อนเครื่องจักรส่วนต่าง ๆ ให้ทำงานตั้งแต่การเคลื่อนตัวของลูกหีบ การทำความร้อนในการต้มและเคี้ยว ตลอดจนนำไปใช้ในการปั่นกระแสไฟฟ้า

เชื้อเพลิงที่ใช้กับหม้อไอน้ำมีหลายประเภท แต่ส่วนมากจะใช้ขานอ้อยเป็นหลัก และมีการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในระยะเริ่มต้น

ขานอ้อยให้ความร้อนในการเผาไหม้สูง จึงได้นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง จากการเปรียบเทียบถึงความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ พบว่ามีค่าดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนและส่วนประกอบของเชื้อเพลิง<sup>[1]</sup>

ชนิด ส่วนประกอบ % นน.	น้ำมันเตา	ขานอ้อย	แกลบ	ไม้สน	ไม้เนื้อ แข็ง
Carbon	86.5 – 90.2	42.9	36.5	55.3	49.7
Hydrogen	9.5 – 12.0	6.8	6.0	5.5	5.4
Sulphur	0.7 – 3.5	0.11	0.14	0.1	0.1
Nitrogen	-	0.22	0.31	0.3	0.2
Oxygen	-	48.2	29.8	37.3	39.3
Ash	0.01 – 0.50	1.77	27.25	1.5	5.3
Heating value Kcal/Kg (Gross)	9,672	4,600	4,048	5,095	4,650

จากตารางที่ 2.1 ถึงแม้ว่าชานอ้อยแห้งจะมีค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูง การเผาชานอ้อยที่มีความร้อน ค่าความร้อนลดลงไปด้วย แต่เนื่องจากชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล ทำให้ต้นทุนการผลิตไอน้ำต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไอน้ำ<sup>[1]</sup>

ชนิดของเชื้อเพลิง	ต้นทุนที่ผลิตไอน้ำ บาท/ตัน
ชานอ้อย	36
น้ำมันเตา	359
ฟืน	911

จากรายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมานั้น ทำให้ทราบถึงความสำคัญของชานอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับโรงงานน้ำตาล เนื่องจากโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก และมีการนำชานอ้อยเกือบทั้งหมดที่ได้ภายหลังจากการหีบสกัดน้ำอ้อยออกแล้วกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

## 2.2 การกำจัดอนุภาคมลสาร

การกำจัดอนุภาคมลสาร อาจทำได้โดยใช้เชื้อเพลิงที่ให้อนุภาคมลสารน้อย และการทำความสะอาดอากาศเสีย การทำความสะอาดเสียเป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป การออกแบบเครื่องมือที่ใช้แยกอนุภาคมลสารออกจากอากาศเสีย ใช้ข้อดีจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี หรือไฟฟ้าของอนุภาคนั้น เครื่องมือที่ใช้แยกอนุภาคมลสารแบบแห้งมีหลายแบบ แต่ที่ใช้กันมากมีดังนี้คือ

1. ห้องตกตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก (Settling chambers)
2. เครื่องแยกที่ใช้แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal separators)
3. เครื่องสั้มผัสแบบเปียก (Wet scrubbers)
4. เครื่องกรอง (Filters)
5. เครื่องตกตะกอนที่ใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitators)

ประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคมลสารวัดโดยส่วนน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่แยกออกโดยคิดที่ขนาดต่าง ๆ รวมกันซึ่งเรียกว่าประสิทธิภาพการเก็บรวม (Overall collection efficiency) ประสิทธิภาพการเก็บรวมนี้ให้เป็นตัววัดระดับการทำงานของเครื่องมือทำความสะอาด และหาได้จากสมการ<sup>[2]</sup>

$$\eta_c = 100 \frac{C_i - C_f}{C_i} \quad \dots (2.1)$$

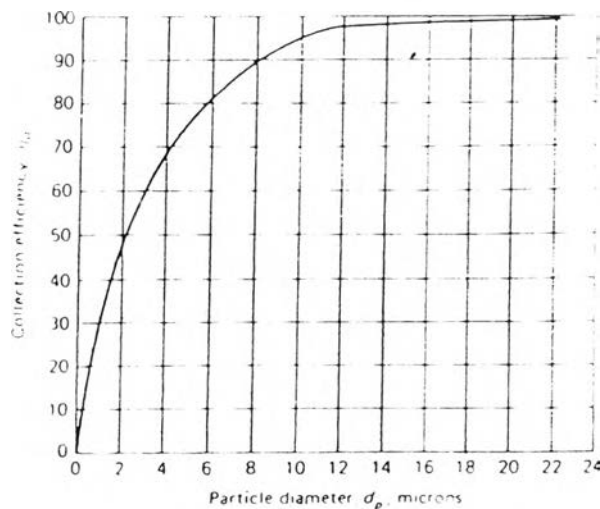
โดยที่  $\eta_c$  = ประสิทธิภาพการเก็บรวมของเครื่องมือ

$C_i$  = ความเข้มข้นของอนุภาคที่เข้าเครื่อง

$C_f$  = ความเข้มข้นของอนุภาคมลสารที่ออกจากเครื่อง

การหาประสิทธิภาพการเก็บรวมรวมนี้ จำเป็นต้องรู้น้ำหนักของฝุ่นที่แยกออกจากกระแสก๊าซ ซึ่งหาได้จากประสิทธิภาพการย่อย ของฝุ่นหรืออนุภาคที่ขนาดต่าง ๆ และการกระจายน้ำหนักของอนุภาคขนาดนั้น ๆ

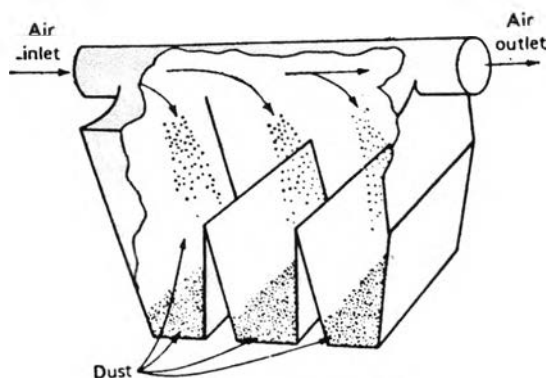
ประสิทธิภาพการเก็บย่อย หรือประสิทธิภาพการเก็บสำหรับฝุ่นแต่ละขนาดนั้น โดยทั่วไปและจะเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาค และแปรอย่างมากกับขนาดของอนุภาค ดังแสดงโดยเส้นโค้งสมมติฐาน ของเครื่องมือเก็บชนิดหนึ่ง ตามรูปที่ 2.1 ประสิทธิภาพการเก็บย่อยนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงขนาดอนุภาคสั้น ๆ รูปร่างของเส้นโค้งจะแปรไปตามชนิดต่าง ๆ ของเครื่องมือ และการออกแบบ และอาจจะแปรตามชนิดและคุณสมบัติของฝุ่นด้วย เช่น รูปร่าง เป็นต้น



รูปที่ 2.1. เส้นโค้งสมมติฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเก็บกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค<sup>[3]</sup>

### 2.2.1 ห้องตกตะกอน

ห้องตกตะกอนมีรูปร่างดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เมื่ออากาศเสียไหลผ่านห้องนี้อนุภาคมลสารในอากาศจะตกลงสู่พื้นห้องโดยแรงถ่วงของโลกความเร็วของอากาศที่ผ่านห้องตกตะกอนนั้นจะต้องต่ำพอที่จะไม่กวาดตะกอนที่ตกแล้วให้ฟุ้งขึ้นมาอีกการลดความเร็วของอากาศเข้าทำโดยผายขนาดท่อเข้าห้องตกตะกอนออกให้ความเร็วอากาศลดลงต่ำพอ



รูปที่ 2.2 ห้องตกตะกอน<sup>[2]</sup>

ในทางปฏิบัติห้องตกตะกอนนี้เหมาะที่จะใช้แยกอนุภาคมลสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมครอน เนื่องจากขีดจำกัดเกี่ยวกับความยาวของห้อง เพราะอนุภาคที่เล็กกว่า 50 ไมครอน ประสิทธิภาพการแยกจะต่ำจึงต้องการห้องที่ยาวมากเกินไป ห้องตกตะกอนนี้เหมาะที่จะใช้เป็นตัวทำความสะอาดสะอาดขั้นแรก (precleaners) เพื่อแยกอนุภาคมลสารที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อนที่จะผ่านกระแסףก๊าซเข้าเครื่องเก็บฝุ่นชนิดอื่นที่มีความละเอียดกว่าเพื่อลดการสึกกร่อน ห้องตกตะกอนนี้มีความดันลดน้อยมาก น้อยกว่า 2.5 ซม. ของน้ำ

ก. ความเร็วของการตกตะกอน การตกตะกอนด้วยแรงถ่วงของโลกเป็นวิธีการพื้นฐานที่ใช้แยกอนุภาค ตัววัด (parameter) ที่สำคัญก็คือความเร็วสุดท้ายของการตกตะกอนซึ่งมีค่าคงที่ ความเร็วนี้เกิดจากความสมดุลระหว่างแรงถ่วงของโลก (gravity) แรงลาก (drag) และแรงลอยตัว (buoyancy) ดังสมการ<sup>[2]</sup>

$$F_{\text{drag}} + F_{\text{buoyancy}} = F_{\text{gravity}} \quad \dots(2.2)$$

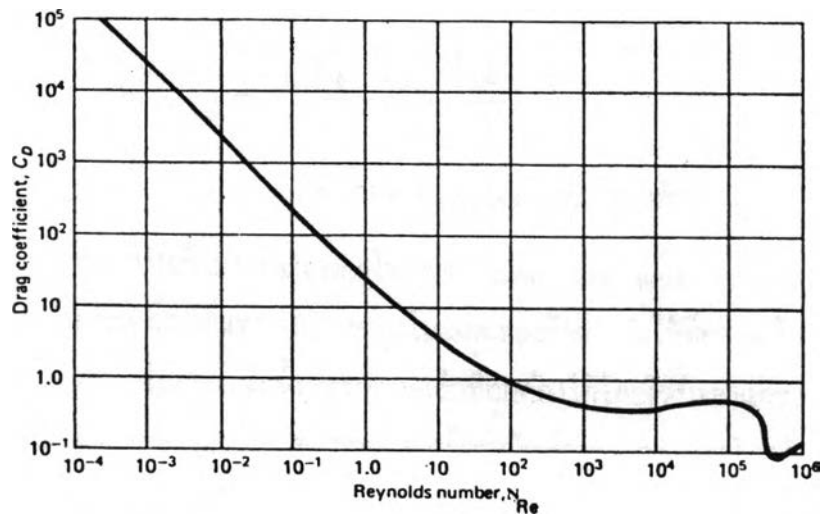
$$\text{หรือ } \frac{\ell AU^2 C_D}{2} + mp \left( \frac{\ell}{l_p} \right) g = m_p g \quad \dots(2.3)$$

- โดยที่  $\ell$  = ความหนาแน่นของก๊าซ (กก./ม.<sup>3</sup>)  
 $l_p$  = ความหนาแน่นของอนุภาค (กก./ม.<sup>3</sup>)  
 $u$  = ความเร็วสุดท้ายของการตกตะกอน (ม./วิ.)  
 $m_p$  = มวลของอนุภาค (กิโลกรัม)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค (ม.<sup>2</sup>)  
 $D_p$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ม.)  
 $G$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 เมตร./วินาที<sup>2</sup>  
 $C_D$  = สัมประสิทธิ์แรงลาก

ถ้าอนุภาคเป็นรูปทรงกลม พื้นที่หน้าตัด  $A = \frac{D_p^2}{4}$

ความเร็วสุดท้ายในการตกตะกอนของอนุภาคจะมีค่าดังสมการ<sup>[2]</sup> ที่ 2.4

$$u = \left( \frac{4D_p(\ell p - \ell)g}{3\ell C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2.4)$$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงลาก  $C_D$  กับจำนวนเรย์โนลด์  $N_{Re}$  สำหรับทรงกลม<sup>[2]</sup>

ค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก(drag-coefficient,  $C_D$ )อยู่กับเรย์โนลด์นัมเบอร์(Reynolds number,  $N_{Re}$ )หาได้จากการทดลองและแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 หรืออาจประมาณได้ตามตารางที่ 2.3

ตาราง ที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ของแรงลากที่  $N_{Re}$  ต่าง ๆ<sup>[2]</sup>

Flow regime	$N_{Re} = \frac{\mu^D P \ell}{\mu}$	$C_D$
Laminar regime	$10^{-4} < N_{Re} < 2$	$C_D = \frac{24}{N_{Re}}$
Transition regime	$2 < N_{Re} < 10^4$	$C_D = 0.4 + \frac{40}{N_{Re}}$
Turbulent regime	$10^4 < N_{Re}$	$C_D = 0.44$

ในกรณีการตกตะกอนอยู่ในเขตการไหลหนืด (Viscous flow,  $N_{Re} < 2$ ) ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคมลสารอาจหาได้จากกฎของสโตกส์ (Stokes' law)<sup>[2]</sup>

$$U_s = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho) g}{18\mu} \quad \dots(2.5)$$

โดยที่  $\mu$  = ความหนืด(Viscosity) ของก๊าซ

เมื่ออนุภาคมลสารเล็กมากมีขนาดอยู่ในระยะมีนฟรีพาทท์(mean free path)ของโมเลกุลของก๊าซ อนุภาคจะเคลื่อนที่แทรกไประหว่างโมเลกุลของก๊าซ ทำให้มีความเร็วมากกว่าที่หาได้จากสมการที่ 2.5 ในกรณีเช่นนี้เราหาความเร็วที่ถูกต้องได้โดยใช้ปัจจัยแก้ไขของคูนนิงแฮม(Cunningham correction factor)แก้ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวของกฎของสโตกส์ดังสมการที่ 2.6

$$C_D = \frac{24}{K_D N_{Re}} \quad \dots (2.6)$$

โดยที่  $K_C$  = ปัจจัยการแก้ไขของนิงแฮม  
 $= 1 + \frac{2\lambda}{C_D} (1.257 + 0.4e^{-1.1D_p/2\lambda}) \quad \dots(2.7)$   
 $\lambda$  = mean free path ของโมเลกุลของก๊าซ 0.1 มคม. ( $10^{-5}$  ซม.)



ข.ขนาดของอนุภาคมลสารที่แยกออกตามทฤษฎี ขนาดของอนุภาคที่แยกออกตามทฤษฎีหรือขนาดเล็กที่สุดของอนุภาคมลสาร ที่แยกออกได้ 100 % หาได้จากความจริงว่า เวลาเฉลี่ยที่ก๊าซอยู่ในห้องตกตะกอนเท่ากับเวลาเฉลี่ยของการตกตะกอน โดยสมมุติว่าอนุภาคที่เข้ามาในห้องตกตะกอนจะกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของห้อง และอนุภาคที่ตกลงสู่พื้นแล้วจะไม่ฟุ้งกลับขึ้นมาอีก ซึ่งอาจจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เวลาเฉลี่ยที่ก๊าซอยู่ในห้องตกตะกอน} &= \text{เวลาเฉลี่ยที่อนุภาคตกตะกอน} \\ \text{หรือ} \quad \frac{L}{\mu_h} &= \frac{H}{\mu} \quad \dots(2.8) \end{aligned}$$

โดยที่  $u_h$  = ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซที่ไหลผ่านห้องตกตะกอน  
 $u$  = ความเร็วที่อนุภาคตกตะกอน  
 $L$  = ความยาวของห้องตกตะกอน  
 $H$  = ความสูงของห้องตกตะกอน

ในกรณีที่มีการตกตะกอนอยู่ในเขตของการไหลหนืด (viscous flow) ขนาดของอนุภาคมลสารที่แยกออกได้ 100% หาได้โดยการแทนสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.8) แล้วจัดสมการใหม่จะได้ว่า

$$Cp = \left( \frac{18\mu_h H \mu}{Lg(\ell_p - \ell)} \right)^2 \quad \dots(2.9)$$

ในกรณีที่อนุภาคไม่ได้มีรูปทรงกลมก็อาจกำหนดขนาดเป็น Stokes radius หรือ equivalent aerodynamic size

Stokes radius,  $R_s$  คือรัศมีของทรงกลมที่มีความเร็วสุดท้ายและความหนาแน่นเท่ากับวัตถุ  
 นั้น

Equivalent aerodynamic size คือ รัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีความเร็วสุดท้ายเท่ากับวัตถุนั้นแต่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1 \text{ ก./ซม.}^3$  ( $1,000 \text{ กก./ม.}^3$ )

ค. ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดี

1. ก่อสร้างง่ายและราคาต่ำ
2. พลังงานที่ใช้้น้อยมากและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ
3. ค่าบำรุงรักษาต่ำ
4. เก็บมลสารอนุภาคได้โดยไม่ต้องใช้น้ำ
6. มีความเชื่อถือได้ (reliability) สูง

### ข้อเสีย

1. มีขนาดใหญ่ต้องการเนื้อที่มาก
2. ประสิทธิภาพในการเก็บด้าและโดยเฉพาะอย่างยิ่งเก็บอนุภาคขนาดเล็กๆ ได้ไม่ดี

### 2.2.2 เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Separators)

เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลางหรือ ไชโคลน (cyclone) ใช้การหมุนของก๊าซทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเพื่อแยกอนุภาคออกจากก๊าซ การหมุนของก๊าซทำให้ฝุ่นเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉื่อยเข้าหาผนังของเครื่องแยกแล้วตกลงสู่ที่รับฝุ่น

ก.แบบของไชโคลน ไชโคลนมีหลายแบบ แบ่งตามลักษณะของการหมุนและการทำให้เกิดการหมุนของก๊าซได้ดังนี้

1. ไชโคลนแบบไหลกลับ (reverse-flow cyclones) มีทางเข้าแบบสัมผัส (tangential inlet) และทางเข้าตามแนวแกน (axial inlet)
2. ไชโคลนแบบไหลตรง (straight-through-flow cyclones)
3. เครื่องเก็บที่ใช้ใบพัด (impeller collectors)

สำหรับไชโคลนแบบไหลกลับที่มีทางเข้าแบบสัมผัส (รูปที่ 2.4 ก.ข.) มลสารก๊าซเข้าทางด้านข้างของส่วนบนของไชโคลน การเข้าทางด้านข้างทำให้ก๊าซเกิดการหมุน มลสารอนุภาคจะได้รับแรงเหวี่ยงเข้าหาผนังของไชโคลนแล้วลื่นลงตามผนังสู่ก้นของไชโคลนด้วยแรงถ่วงของโลก

ส่วนก๊าซเมื่อไหลถึงก้นของไชโคลนก็จะไหลย้อนกลับทำให้เกิดการหมุนชั้นใน (inner core) แล้วออกทางด้านบนของไชโคลน สำหรับไชโคลนที่มีทางเข้าตามแนวแกน (รูปที่ 2.4 ค.) ก๊าซ

จะเข้าตามแนวแกนของไซโคลนผ่านใบพัดที่ติดอยู่กับที่ทางส่วนบนของไซโคลนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยแรงเหวี่ยง (centrifugal motion)

ในไซโคลนแบบไหลตรงก๊าซจะไหลผ่านใบพัดที่อยู่ด้านบนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยแรงเหวี่ยงแล้วออกทางก้นของไซโคลน ไซโคลนชนิดนี้ใช้เป็นตัวทำความสะอาดขั้นแรก (pre-cleaner) เพื่อแยกขี้เถ้าและมลสารอนุภาคขนาดใหญ่ ข้อดีที่สำคัญของมันก็คือมีความดันลด (pressure drop) ต่ำและรับอัตราไหลได้สูง (high volumetric flow rates)

สำหรับเครื่องเก็บที่ใช้ใบพัด (impeller collectors) (รูปที่ 2.4 ง.) ก๊าซเข้าในทิศตั้งฉากกับใบพัดแบบมีหลายใบ มลสารอนุภาคจะถูกใบพัดกวาดเหวี่ยงเข้าไปในช่องที่อยู่รอบๆ ขอบของเครื่องมือ ข้อดีที่สำคัญของเครื่องชนิดนี้ก็คือมีขนาดกะทัดรัด ส่วนข้อเสียที่สำคัญก็คือการอุดตันเนื่องจากอนุภาคมลสารที่สะสมภายในเครื่องมือ

ข. ปัจจัยการแยก (Separation Factor) แรงสำคัญทำให้เกิดการแยกของอนุภาคมลสารในไซโคลนก็คือแรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการหมุนของก๊าซ แรงหนีศูนย์กลางเท่ากับผลคูณของมวลอนุภาคกับความเร่งหนีศูนย์กลาง

$$F_c = m_p \frac{\mu_T^2}{R} \quad \dots(2.10)$$

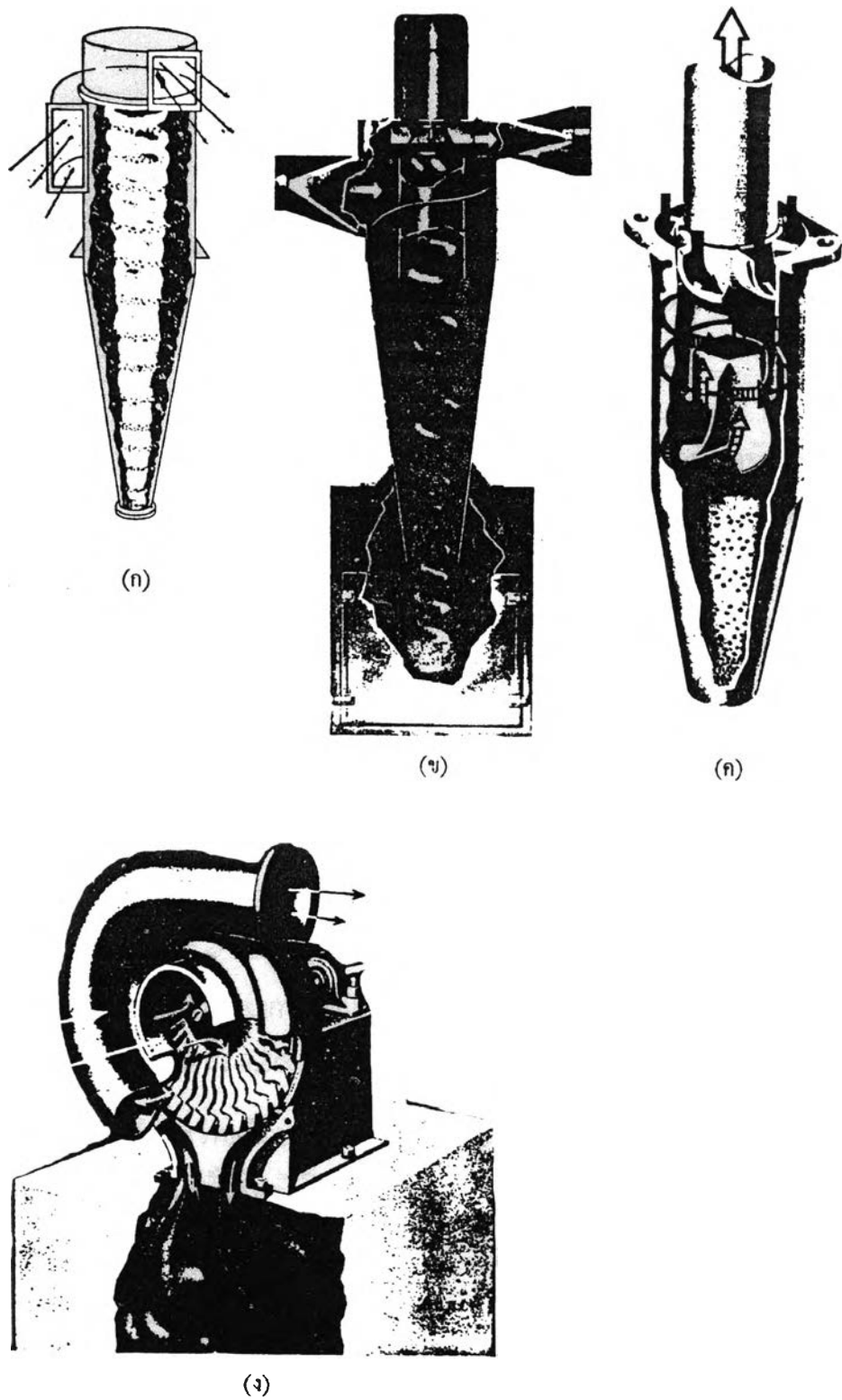
โดยที่	$F_c$	=	แรงหนีศูนย์กลาง
	$m_p$	=	มวลอนุภาค
	$u_T$	=	ความเร็วสัมผัส (Tangential velocity) มีรัศมีของการหมุน R
	R	=	รัศมีการหมุน

แรงหนีศูนย์กลางนี้จะทำให้เกิดความเร็วทางรัศมีของอนุภาคมลสาร

$$\mu R = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho) \mu_T^2}{18 \mu R} \quad \dots(2.11)$$

ขณะเดียวกันจะมีแรงถ่วงกระทำต่ออนุภาคมลสารนั้น

$$F_g = m_p g$$



รูปที่ 2.4 เครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง<sup>[2]</sup> (a) reverse-flow cyclone (b) reverse-flow cyclone ที่มี blower ในตัว (c) cyclone ที่มีทางเข้าตามแนวแกน (d) เครื่องเก็บที่ใช้ใบพัด

โดยที่  $F_g =$  แรงถ่วงของโลก  
 $g =$  ความเร่งเนื่องจากแรงถ่วงของโลก

ในกรณีที่การเคลื่อนที่ของอนุภาคพอลิเมอร์เป็นแบบลามินาร์ (laminar flow) ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคอาจหาได้จากกฎของสโตกส์ (stokes'law)

$$U_s = \frac{D_p^2(\rho_p - \rho)g}{18\mu} \quad \dots(2.4)$$

อัตราส่วนระหว่างแรงหนีศูนย์กลางกับแรงถ่วงของโลกเรียกว่าปัจจัยแยก (Separation factor, S) ซึ่งจะเท่ากับอัตราส่วนความเร็วทางรัศมีของอนุภาคพอลิเมอร์ในไซโคลนกับความเร็วของอนุภาคพอลิเมอร์ที่คำนวณได้จากกฎของสโตกส์

$$S = \frac{F_c}{F_g} = \frac{m\omega^2 R}{m\mu g} = \frac{\mu_T^2}{Rg} \quad \dots(2.12)$$

หรือ

$$S = \frac{R}{\mu S} = \frac{(\rho_p - \rho)D_p^2\mu_T^2}{18\mu} = \frac{\mu_T^2}{Rg}$$

ในทางปฏิบัติปัจจัยการแยกจะมีค่าตั้งแต่ 5 (สำหรับไซโคลนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่และมีความต้านทานต่ำ) ถึง 2,500 (สำหรับไซโคลนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กและมีความต้านทานสูง)

*ค.ความดันลด (Pressure Drop)* ความดันลดเป็นปัจจัยที่สำคัญของไซโคลน ความดันลดอาจประมาณได้จากสมการ (6.13) (Perkins, 1974)

$$\Delta p = \frac{KQ^2Plg}{T} \quad \dots(2.13)$$

โดยที่  $\Delta p =$  ความดันลด, มม. ของน้ำหนัก  
 $Q =$  อัตราการไหลของก๊าซ,  $m^3/นาที่$

ตารางที่ 2.4 ค่า K ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ ของไซโคลน<sup>(4)</sup>

เส้นผ่าศูนย์กลางของไซโคลน(มม.)	736	406	206	112
K	0.106	1.06	10.6	106

ความดันลดในไซโคลนนี้เป็นฟังก์ชันของ dust loading ด้วย ซึ่งอาจประมาณได้จากสมการของ Briggs, L.w.

$$\Delta P_d = \frac{\Delta P}{0.00859\sqrt{C_i} + 1} \quad \dots(2.14)$$

โดยที่  $\Delta P_d$  = ความดันลดเมื่อมีฝุ่นโดยทั่วไปแล้วความดันลดจะมีค่าประมาณ 25 – 200 มม.น้ำ<sup>[4]</sup>

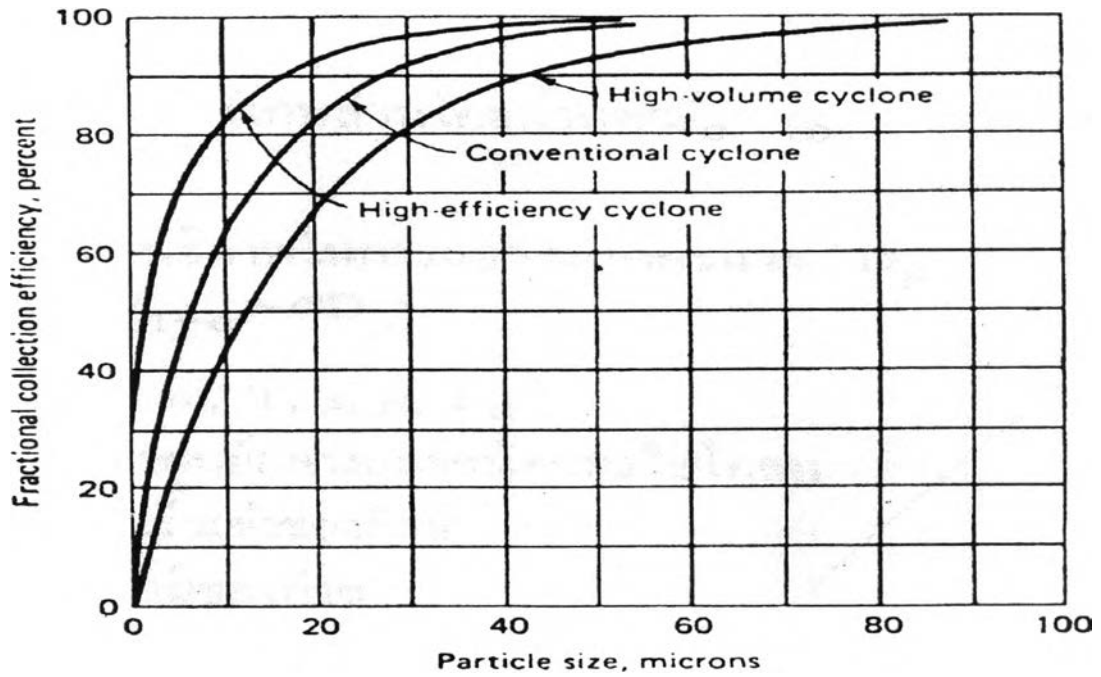
$\Delta P$  = ความดันลดของอากาศที่สะอาด

$C_i$  = ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้า, ก/ม<sup>3</sup>

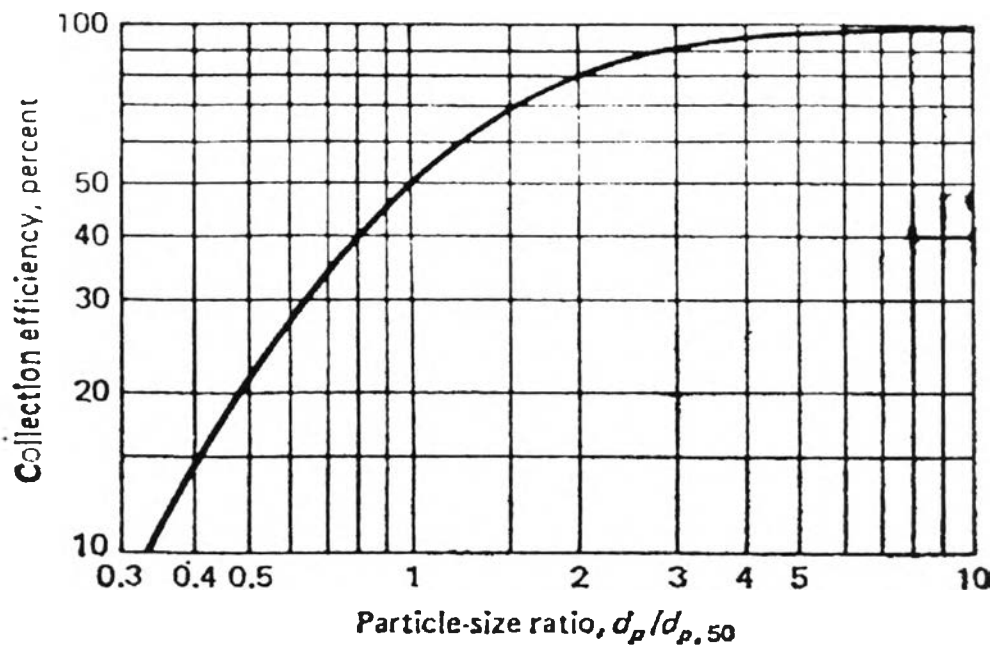
ง. ประสิทธิภาพของไซโคลน ประสิทธิภาพการเก็บ (collection efficiency) ของไซโคลนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยต่อไปนี้เพิ่มขึ้น

1. ขนาดของอนุภาค
2. ความหนาแน่นของอนุภาค
3. ความเร็วเข้าของก๊าซ
4. ความยาวของตัวไซโคลน
5. จำนวนรอบหมุนก๊าซ
6. ความเรียบลื่นของผนังไซโคลน

ประสิทธิภาพไซโคลนอาจประมาณได้จากเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเก็บกับขนาดของอนุภาค และการกระจายน้ำหนักของอนุภาคนั้นตามที่ได้กล่าวไว้ในวรรคที่ 2.2.1 เส้นโค้งแสดงประสิทธิภาพการเก็บกับขนาดอนุภาคนี้เป็นลักษณะเฉพาะของไซโคลนแต่ละแบบและอาจใช้เป็นตัวแทนแสดงคุณสมบัติของไซโคลนนั้นๆ (รูปที่ 2.5) รูปที่ 2.6 แสดงประสิทธิภาพของไซโคลนกับอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่อขนาดตัด (cut size)



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพการเก็บของอนุภาคขนาดต่างๆสำหรับไซโคลนแบบต่างๆ<sup>[3]</sup>



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของไซโคลนกับอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่อขนาดตัด<sup>[3]</sup>

ประสิทธิภาพรวม (overall efficiency) ของไซโคลนอาจหาได้ตามสมการที่ (2.15)

$$\eta_0 = \sum_{D_p=1}^n (\text{เศษส่วนโดย น้ำหนัก})_D \eta_D \quad \dots (2.15)$$

โดยที่  $\eta_D$  = ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาด  $D_p$

$$= 100(1 - e^{-\alpha D_p}) \quad \dots (2.16)$$

$$\alpha = f(D, u_i, T, s, \mu, L_d)$$

$D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางและชนิดของไซโคลน

$u_i$  = ความเร็วเข้าของก๊าซ

$T$  = อุณหภูมิของก๊าซ

$S$  = ความถ่วงจำเพาะของอนุภาค

$\mu$  = ความหนืดของก๊าซ

$L_d$  = ปริมาณฝุ่นที่เข้า (Dust loading)

ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นอาจประมาณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับ อัตราการไหลของก๊าซหรือความเข้มข้นของฝุ่นในกรณีที่อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นจะแปรตาม ความสัมพันธ์อาจประมาณได้ตามสมการที่ (2.17)<sup>[3]</sup>

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} \left( \frac{Q_b}{Q_a} \right)^{0.5} \quad \dots (2.17)$$

โดยที่  $\eta_a, \eta_b$  = ประสิทธิภาพรวมที่สภาพ a และ b, %

$Q_a, Q_b$  = อัตราไหลของก๊าซที่สภาพ a และ b

ในกรณีที่ความเข้มข้นของฝุ่นเปลี่ยนแปลงปานกลาง ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นจะเพิ่มขึ้นกับความเข้มข้นของฝุ่น Baxter ให้สมการไว้ดังนี้<sup>[5]</sup>

$$\frac{100 - \eta_a}{100 - \eta_b} \left( \frac{C_{bi}}{C_{ai}} \right)^{0.182} \quad \dots (2.18)$$

โดยที่  $C_{ai}, C_{bi}$  = ความเข้มข้นทางเข้าของฝุ่นที่สภาพ a และ b, ก./ม<sup>3</sup>.



ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลนแบบแห้งที่ต่อกันแบบอนุกรมอาจ คำนวณได้ตามสมการที่ (2.19)

$$\eta_T = \eta_p + \eta_s (100 - \eta_p) \quad \dots(2.19)$$

โดยที่  $\eta_T$  = ประสิทธิภาพทั้งหมด

$\eta_p$  = ประสิทธิภาพของไซโคลนแรก %

$\eta_s$  = ประสิทธิภาพของไซโคลนที่สอง %

จ.ขนาดตัด (Cut Size) ขนาดตัดของไซโคลนคือ ขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนนั้น แยกได้ 50% โดยน้ำหนักขนาดตัดนี้ใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลนได้ด้วยขนาดตัดนี้หาได้จากสมการ (2.20)

$$D_{pc} = \left( \frac{4.5 \mu Bc}{\pi U_i N_e (\rho_p - \rho)} \right)^{1/2} \quad \dots(2.20)$$

โดยที่  $D_{pc}$  = ขนาดตัดของไซโคลน

$B_c$  = ความกว้างทางเข้าของไซโคลน( ตามแนวรัศมี)

$N_e$  = จำนวนรอบที่ก๊าซหมุน

$U_i$  = ความเร็วของก๊าซ

$\rho_p$  = ความหนาแน่นของอนุภาค

$\rho$  = ความหนาแน่นของก๊าซ

ข. ขอบเขตการทำงานของไซโคลน ไซโคลนใช้สำหรับแยกอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมโครเมตร ถึง 1,000 ไมโครเมตร ในทางปฏิบัติไซโคลนแบบแห้งทำงานได้ดีสำหรับอนุภาคขนาด 8 มคม. ถึง 500 ไมโครเมตร อัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพต่อค่าใช้จ่ายจะมีค่าสูงสุดสำหรับอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร ถึง 200 ไมโครเมตร <sup>[4]</sup> ตัวอย่างประสิทธิภาพการเก็บผงซีเมนต์ที่มีขนาดเฉลี่ยต่างๆของไซโคลนแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 ถ้าในก๊าซมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าประมาณ 200 ไมโครเมตร มาก ควรใช้ห้องตกตะกอนก่อนไซโคลน แต่ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ควรใช้ไซโคลนแบบแห้งตามด้วยเครื่องสัมผัสแบบไซโคลน (cyclone-type scrubber) หรือตามด้วยเครื่องตกตะกอนที่ใช้ไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator)<sup>[5]</sup> ในไซโคลนที่มี

ความเร็วสูง ผุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร จะไม่ทำให้เกิดการสีกกร่อนเท่าไร ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร จะเป็นปัญหามาก

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการเก็บผงซีเมนต์ที่มีขนาดเฉลี่ยต่างๆ ของไซโคลน<sup>[6]</sup>

ขนาดอนุภาค มม.	ประสิทธิภาพการเก็บ %
44	99
30	98
20	97
10	90
5	65
2	30

### 2.2.3 เครื่องกรองใย (fabric filters)

เครื่องกรองใยที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมมักจะมีอยู่ในรูป baghouse ภายใน baghouse นี้จะมีถุงจำนวนหนึ่งแขวนอยู่ ก๊าซที่มีอนุภาคปะปนจะถูกบังคับให้ไหลผ่านถุงเหล่านั้น อนุภาคก็จะถูกเส้นใยและชั้นอนุภาค (cake) ที่เกิดขึ้นกักไว้ จากนั้นอนุภาคที่ติดอยู่กับถุงจะถูกแยกออกจากถุงโดยวิธีต่างๆ รูปที่ 2.7 แสดงวิธีทำความสะอาด baghouse โดยการสั่นสะเทือน (vibration) โดยใช้ลมเป่า (air jet) และโดยใช้ห่วงเคลื่อนที่ (traveling ring)

ก. ประสิทธิภาพการเก็บ กลไกในการเก็บอนุภาคของเครื่องกรองใยประกอบด้วย การรับ (interception) การกระแทกด้วยแรงเฉื่อย (inertial impaction) และการฟุ้ง (diffusion) ในกรณีที่ทราบประสิทธิภาพการเก็บของแต่ละเส้นใย ก็อาจคำนวณหาประสิทธิภาพการเก็บของเครื่องกรองใยได้โดยสมมุติว่า

1. เส้นใยซ้อนกันเป็นชั้นๆ ตั้งฉากกับการไหลของก๊าซ

2.อนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอในก๊าซที่ต้นทางการไหลเข้าเครื่องกรอง ดังนั้นสภาพการทับถม (deposition) ของอนุภาคบนเส้นใยจะสม่ำเสมอ

พิจารณารูปที่ 2.8 ตัวกรอง (filter bed) มีความกว้าง W ความสูง H ในระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลของอากาศ และมีความยาว L ในทิศทางการไหลของอากาศ

ที่ส่วนหนึ่งของตัวกรองที่มีความกว้าง W ความสูง H และความหนา dx ภายในตัวกรองสมมุติว่าเครื่องกรองเป็นระนาบที่มีความหนาแน่นของเส้นใยสม่ำเสมอเท่ากับ c เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยเท่ากับ D และประสิทธิภาพการเก็บของเส้นใยสม่ำเสมอ ความเร็วของก๊าซภายในตัวกรอง

$$u_{\infty} = \frac{Q}{A(1-C)} = \frac{u_0}{1-C} \quad \dots (2.21)$$

โดยที่  $u_{\infty}$  = ความเร็วภายในตัวกรอง

$Q$  = อัตราการไหลของก๊าซ

$A$  = พื้นที่ผิวหน้าของตัวกรอง

$=WH$

$u_0$  = ความเร็วที่หน้าตัวกรอง

อัตราการไหลของอนุภาคผ่านส่วนของตัวกลางที่ตำแหน่ง  $x$

$$\dot{N}(x) = C_{nv} F \quad \dots (2.22)$$

โดยที่  $C_{nv}$  = จำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรที่จุด  $x$

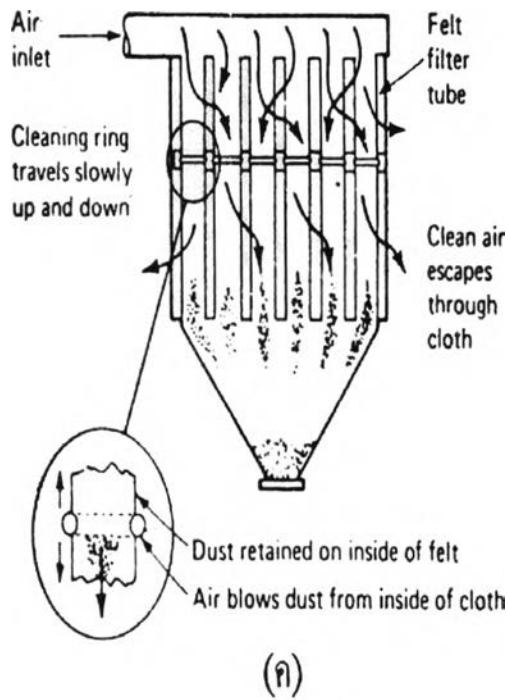
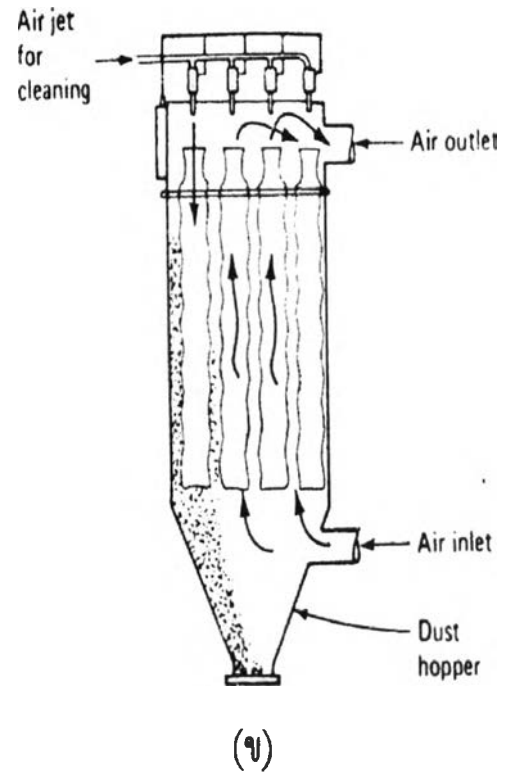
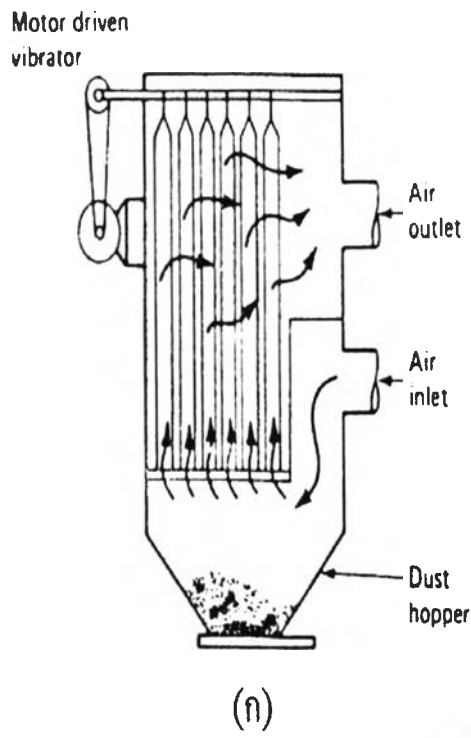
อัตราที่อนุภาคถูกแยกจากกระแสก๊าซในส่วนของตัวกลางที่มีความหนา  $dx$

$$d\dot{N} = -\eta_r C_{nv} u_x D 1WH dx \quad \dots (2.23)$$

โดยที่  $l$  = ความยาวทั้งหมดของเส้นใยในหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวกรอง ( $4c/\pi D^2$ )

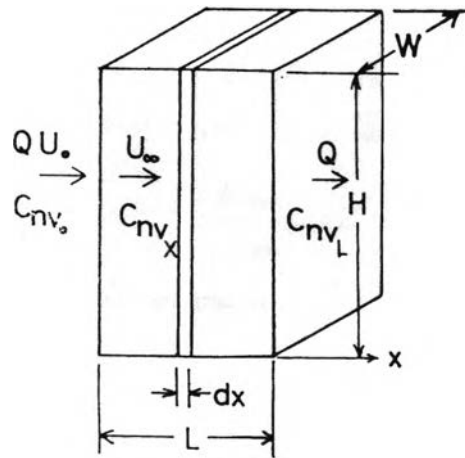
รวมสมการที่ 2.21, 2.22, 2.23 แล้วแทนค่า  $l = 4c/\pi D^2$  จะได้ว่า

$$\frac{dC_{nv}}{C_{nv}} = - \frac{4 c \eta_r dx}{\pi (1 - c) D} \quad \dots (2.24)$$



รูปที่ 2.7 แสดงแบบของ baghouse และวิธีการแยกอนุภาคจากใยกรอง

(ก) motor-drive vibrator (ข) air jet (ค) traveling ring



รูปที่ 2.8 แสดงการไหลผ่านตัวกรอง

โดยการนำ อินทิกรัล สมการ 2.24 จะได้ประสิทธิภาพการเก็บของเครื่องกรอง

$$\eta_0 = 1 - \frac{C_{nv} L}{C_{nv0}} = 1 - e^{\frac{-4c\eta_f L}{\pi(1-c)}} \quad \dots(2.25)$$

โดยที่  $\epsilon$  = ความพรุน (porosity) ของตัวกรอง =  $1 - c$

สมการที่ (2.25) นี้จะนำไปใช้กับการกระจายขนาดของอนุภาคแบบต่างๆ และความยาวต่างๆ ของใย แต่อย่างไรก็ดี สมการนี้ใช้กับตัวกรองใยที่สะอาดเท่านั้น ในระหว่างการกรองประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับชั้นอนุภาคที่ทับถมบนใยสังเคราะห์ โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพการเก็บจะเพิ่มขึ้นกับอัตรารับอนุภาค (loading) เพราะว่าอนุภาคที่ทับถมอยู่จะทำให้ผิวหน้าสำหรับการเก็บเพิ่มขึ้น

ข. ความดันลด ความดันลดผ่านเครื่องกรองใยสังเคราะห์เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง สำหรับเครื่องกรองที่สะอาดแรงดันลดจะมีค่าประมาณ 1.25 ซม. ของน้ำ แต่ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพการกำจัดจะมีค่าต่ำ เมื่อผ่านการกรองไประยะหนึ่งเมื่อฝุ่นจับกันเป็นแผ่นและความดันลดเพิ่มขึ้นเป็น 5.0 ถึง 7.5 ซม. ของน้ำ ประสิทธิภาพการกรองจะเพิ่มขึ้นถึง 99% เมื่อความดันลดเพิ่มขึ้นถึง 12.5 ถึง 15 ซม. ของน้ำก็ต้องทำความสะอาดใยกรอง เพื่อลดความดันลดให้เหลืออยู่ในระดับที่เหมาะสมมิฉะนั้นพลังงานที่ใช้จะมากเกินไป ความดันลดทั้งหมดเป็นผลรวมของความดันลดผ่านผ้ากรองกับความดันลดผ่านชั้นอนุภาคที่ทับถมอยู่ สมมุติว่าการไหลผ่านผ้ากรองและชั้น

อนุภาคเป็นแบบที่มีความหนืด (viscous) ดังนั้น ความดันลดสำหรับชั้นอนุภาคและผ้ากรองอากาศได้จากสมการของ Darcy

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{u_0 \mu_g}{K} \quad \dots (2.26)$$

โดยที่  $K$  = permeability ของอนุภาคหรือเครื่องกรอง

$u_0$  = ความเร็วของก๊าซที่ผิวหน้าซึ่งเท่ากับปริมาตรการไหลผ่านเครื่องกรองหารด้วยพื้นที่ของผ้ากรอง

$L$  = ความลึกของชั้นอนุภาคหรือความหนาของเครื่องกรอง

ดังนั้น ความดันลดทั้งหมดอากาศได้จากสมการที่ 2.27

$$\Delta P_0 = \Delta P_f + \Delta P_p = \frac{L_f \mu_g u_0}{K_f} + \frac{L_p \mu_g u_0}{K_p} \quad \dots (2.27)$$

โดยที่  $\Delta P_0$  = ความดันลดทั้งหมด

$\Delta P_f$  = ความดันลดผ่านใยกรอง

$\Delta P_p$  = ความดันลดผ่านชั้นอนุภาค

ความดันลดผ่านผ้ากรอง ( $\Delta P_f$ ) ควรจะมีค่าคงที่สำหรับผ้ากรองและฝุ่นที่กำหนด ส่วนความดันลดผ่านชั้นอนุภาค ( $\Delta P_p$ ) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคทับถมมากขึ้น สำหรับสภาพการทำงานที่กำหนดให้ (ความหนืดของก๊าซและความเร็วที่ผิวหน้า) ( $\Delta P_p$ ) จะเป็นฟังก์ชันของ Permeability ของฝุ่น ( $K_p$ ) และความหนาของชั้นฝุ่น ( $L_p$ ) ส่วนความหนาของชั้นฝุ่นก็เป็นฟังก์ชันของเวลาของการทำงาน ( $t$ )

การแปรของความดันลดผ่านชั้นฝุ่น ( $\Delta P_p$ ) กับเวลาอากาศได้จากหลักที่ว่ามวลของฝุ่นที่เก็บได้ในเวลา  $t$  หลังจากการเริ่มต้นจะเท่ากับ ปริมาตรการไหลของก๊าซคูณกับช่วงเวลาการทำงานคูณกับมวลของฝุ่นในกระแสน้ำต่อหน่วยปริมาตร ( $L_d$ )

$$\text{มวลที่เก็บได้} = u_0 A t L_d \quad \dots (2.28)$$

โดยที่  $u_0$  = ความเร็วของก๊าซในแนวตั้งฉากกับเครื่องกรอง

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของเครื่องกรอง

$t$  = เวลาการทำงานของเครื่องกรอง

$L_d$  = มวลของฝุ่นในกระแสก๊าซต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซ

และในขณะเดียวกันมวลของฝุ่นที่เก็บได้ก็เท่ากับความหนาแน่นของชั้นอนุภาค ( $\rho_c$ ) บนผิวเครื่องกรองคูณกับปริมาตรของฝุ่นที่เก็บได้ในเวลา  $t$

$$\text{มวลที่เก็บได้} = \rho_c (Atp) \quad \dots (2.29)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (2.28) กับสมการที่ (2.29) จะได้ว่า

$$L_p = \frac{u_o L_d t}{\rho_c} \quad \dots (2.30)$$

ดังนั้นความดันลดผ่านฝุ่นที่ทับถมใหม่ๆ จะมีค่าเป็น

$$\Delta P_p = \frac{L_p \mu_g u_o}{K_p} = \left( \frac{u_o L_d t}{\rho_c} \right) \left( \frac{\mu_g u_g}{K_p} \right) = \frac{u_o^2 L_d t u_g}{K_{p\rho_c}} \quad \dots (2.31)$$

ดังนั้นความดันลดทั้งหมดอาจเขียนได้ว่า

$$\Delta P_o = \mu_g u_o \left( \frac{L_f}{K_f} + \frac{u_o L_d t}{\rho_c K_u} \right) \quad \dots (2.32)$$

เนื่องจาก  $L_f$  และ  $K_f$  เป็นค่าเฉพาะสำหรับผ้ากรองและ  $\rho_c$  กับ  $K_u$  เป็นค่าเฉพาะของอนุภาคที่ทับถม ดังนั้นอาจจัดกลุ่มใหม่ และสมการที่ (2.32) อาจเขียนได้ดังนี้

$$\Delta P_o = \mu_g u_o (K_o + K_1 W) \quad \dots (2.33)$$

โดยที่  $K_o$  = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของผ้ากรอง มีค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.04

$K_1$  = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของชั้นอนุภาค เป็นฟังก์ชันของรูปร่างและความชื้นของชั้นอนุภาค

$$= \frac{L_f}{K_f} \quad \dots (2.34)$$

$W =$  เป็นมวลของชั้นอนุภาคต่อพื้นที่หน้าตัดของเครื่องกรอง, ก.ก./ $m^2$ .

$$= \frac{1}{\rho_c k_p} \quad \dots(2.35)$$

$$= \frac{U_o A t L_d}{A} = U_o L_d t \quad \dots(2.36)$$

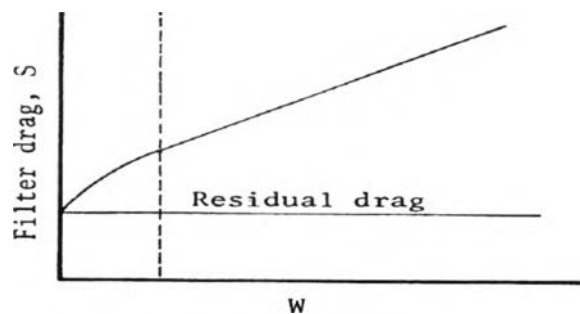
ค.แรงลากของเครื่องกรอง (Filter Drag) อัตราส่วนระหว่างความดันลดผ่านชั้นอนุภาคกับความเร็วของก๊าซที่ผิวหน้าเรียกว่าแรงลากของเครื่องกรอง (filter drag,  $S$ ) และแรงลากของเครื่องกรองนี้อาจเขียนให้อยู่ในค่าของมวลของฝุ่นที่ถูกเก็บได้ที่เวลา  $t$  ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของก๊าซ ( $W$ ) ดังนั้น

$$S = \frac{\Delta P_p}{U_o} = K_1 \mu_g U_o L_d t \quad \dots(2.37)$$

จากสมการที่ (2.36)  $W = U_o L_d t$

จะหาได้ว่า  $S = K_2 W \quad \dots(2.38)$

โดยที่  $K_2 = K_1 \mu_g$



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งแสดงการทำงานของเครื่องกรองใย<sup>[2]</sup>



สำหรับสภาพการไหลของก๊าซและคุณสมบัติของอนุภาคที่กำหนดให้ สมการที่ (2.38) แสดงให้เห็นว่า  $S$  ควรจะแปรเป็นเส้นตรงกับ  $W$  แต่ความจริงจะเป็นไปตามเส้นโค้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ในช่วงแรกของเส้นโค้ง ชั้นอนุภาคที่เกิดใหม่กำลังก่อตัวบนผ้ากรองที่สะอาด ดังนั้นผิวหน้าของชั้นฝุ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนส่วนของชั้นฝุ่นที่ไม่สม่ำเสมอเต็มหมดแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S$  กับ  $W$  จึงจะเป็นเส้นตรง สำหรับเครื่องกรองที่ใช้แล้วหลังจากการทำความสะอาดส่วนหนึ่งของฝุ่นจะยังติดอยู่กับเส้นใย ดังนั้นจะมี residual drag โดยทั่วไป residual drag สำหรับใยที่สะอาดที่มีฝุ่นติดอยู่น้อยที่สุดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 นิ้วของน้ำ/ฟุต-นาที่

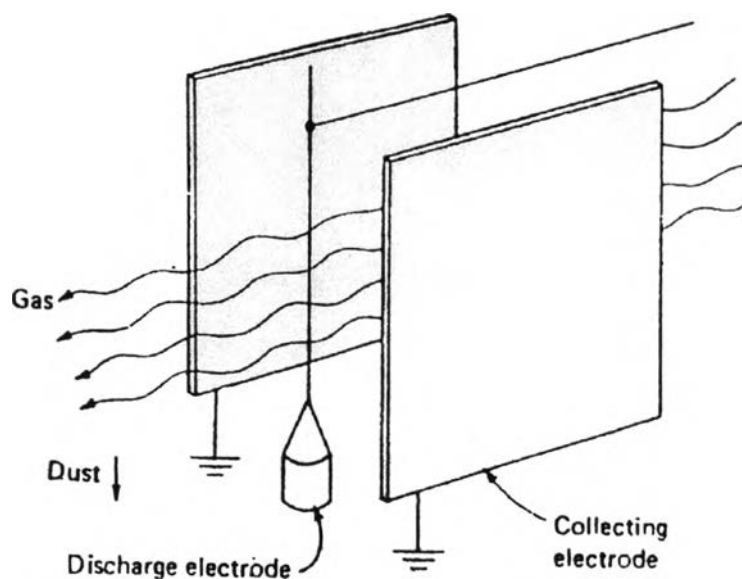
*ง.ปัญหาทางด้านวิศวกรรม* ในการพิจารณาเครื่องกรองใยปัญหาทางด้านวิศวกรรมก็คือการเลือกขนาดเส้นใย วิธีการทำความสะอาด รอบการทำงาน และความดันลดที่ยอมรับได้ เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพดีเชื่อถือได้ในระยะยาวและมีค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำ ข้อเสียที่สำคัญสำหรับเครื่องกรองใยก็คือจำเป็นต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง เพื่อหลีกเลี่ยงความดันลดที่มากเกินไป

#### 2.2.4 เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitators )

เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้าสถิตโดยปกติแล้ว ใช้ทำความสะอาดก๊าซที่มีปริมาณการไหลสูง เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตนี้ใช้มากในการแยกขี้เถ้าจากก๊าซที่ปล่อยออกมาจากโรงจักรไฟฟ้า (power plant ) และใช้เก็บอนุภาคและละอองกรดในอุตสาหกรรมสารเคมีและโลหะ

*ก.หลักการทำงาน* เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้าสถิตได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ในการทำงานก๊าซไหลทางแนวนอนผ่านแถวของแผ่นขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ขนานกันตรงกลางระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าแต่ละชุดนั้นจะมีเส้นลวดที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งหุ้มฉนวนไว้เมื่อความต่างศักย์ระหว่างเส้นลวดถ่ายประจุ (discharging electrode) และแผ่นเก็บประจุ (collecting electrode) มีค่ามากพอ ก๊าซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นจะแตกตัวเป็นไอออน (ions) แล้วเคลื่อนที่ไปสู่แผ่นเก็บที่มีศักย์เท่ากับพื้นดินการเคลื่อนที่ของไอออนของก๊าซเช่นนี้เรียกว่า electric wind ส่วนมากเส้นลวดถ่ายประจุนี้จะมีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 ถึง 100 kv ต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของพื้นดิน (ground-potential) ที่ความต่างศักย์นี้อิเลคตรอน (electron) จะถูกปล่อยออกจากเส้นลวด จะกระทบแล้วติดอยู่กับโมเลกุลของก๊าซที่มีอยู่ใกล้ ๆ การที่โมเลกุลของก๊าซเป็นจำนวนมากแตกตัวเป็นไอออน

อยู่รอบๆ เส้นลวด ไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปสู่แผ่นเก็บ (รูปที่ 2.11 ก.) ขณะที่ไอออนที่มีประจุบวกจะชนกับอนุภาคแล้วทำอนุภาคนั้นมีประจุลบ เนื่องจากไอออนของก๊าซมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคที่เล็กที่สุดมากและมีจำนวนมากอนุภาคทั้งหมดที่ผ่านจะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าแบบลบ อนุภาคที่มีประจุลบนี้จะเคลื่อนที่ไปสู่แผ่นเก็บแล้วถูกยึดอยู่ที่แผ่นเก็บด้วยแรงดูดไฟฟ้าสถิต (รูปที่ 2.11 ข.) อนุภาคจะจับกันเป็นชั้นบนแผ่นเก็บจะค่อย ๆ ถ่ายประจุลบไปสู่แผ่นเก็บ เมื่อชั้นอนุภาคทับถมขึ้นเรื่อย ๆ ประจุของอนุภาคที่เก็บใหม่จะต้องถ่ายผ่านชั้นของอนุภาคเก่าซึ่งมีความต้านทานความต้านทานของชั้นฝุ่นนี้เรียกว่า dust resistivity ขณะที่ความหนาของชั้นของอนุภาคเพิ่มขึ้นอนุภาคที่อยู่ใกล้กับแผ่นเก็บมากที่สุดจะเสียประจุไปเกือบทั้งหมดทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นเก็บกับอนุภาคเหล่านี้อ่อนลงแต่อย่างไรก็ดี อนุภาคใหม่ที่อยู่ด้านนอกของชั้นอนุภาคยังมีประจุไฟฟ้าเต็มอยู่ และเนื่องจากความเป็นฉนวนของชั้นอนุภาคนี้ทำให้อนุภาคใหม่ไม่อาจประจุได้ทันที ดังนั้น จึงช่วยในการยึดชั้นอนุภาคทั้งหมดกับแผ่นเก็บ ชั้นสุดท้ายชั้นอนุภาคก็จะถูกทำให้หลุดออกโดยการเคาะแล้วหล่นลงไปในถังเก็บ



รูปที่ 2.10 หลักการทำงานเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต<sup>[2]</sup>

ข.ประสิทธิภาพการเก็บ ประสิทธิภาพการเก็บของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของเครื่องตกตะกอน อัตราไหลของก๊าซ ขนาดของอนุภาค และคุณสมบัติของก๊าซ ขบวนการเก็บอนุภาคในเครื่องนี้อาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทางขวางกับความเร็วเฉลี่ย กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลทั้งหมดอาจแบ่งออกได้เป็น 3 อย่าง คือ

1. การนำของไฟฟ้าสถิต (electrostatic convection )
2. การกระจายแบบปั่นป่วน ( turbulent diffusion )
3. การเคลื่อนไหวด้วยแรงเฉื่อย ( inertial drift )

ถ้าการไหลของก๊าซในเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตเป็นแบบลามินาร์ ( laminar ) การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเกิดจากการนำทางไฟฟ้าสถิตอย่างเดียว แต่ถ้าการไหลเป็นแบบปั่นป่วนการคาดคะเนการเคลื่อนที่ของอนุภาคต้องพิจารณาทั้งแรงไฟฟ้าสถิตและแรงเฉื่อย การทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการไหลแบบปั่นป่วนเป็นสิ่งที่ยาก และจะไม่นำมาพิจารณาในที่นี้ ประสิทธิภาพการเก็บอาจหาได้จากแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคพิจารณา รูปที่ 2.12 ก๊าซจะไหลระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าเก็บประจุซึ่งอาจขนานกัน ตรงกลางเป็นขั้วไฟฟ้าถ่ายประจุ ( discharging electrode ) อนุภาคที่ปนมากับก๊าซนั้นจะได้รับประจุจากการชนกับไอออนของก๊าซ ตามทฤษฎีประจุอิมพัลส์  $q$  ที่อนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าประมาณ 1 ไมโครเมตร จะมีค่า

$$q = \pi p \epsilon_0 E_c D_p^2 \quad \dots(2.39)$$

โดยที่  $q$  = ประจุไฟฟ้าของอนุภาค (คูลอมบ์)

$$p = 3D / ( D+2 )$$

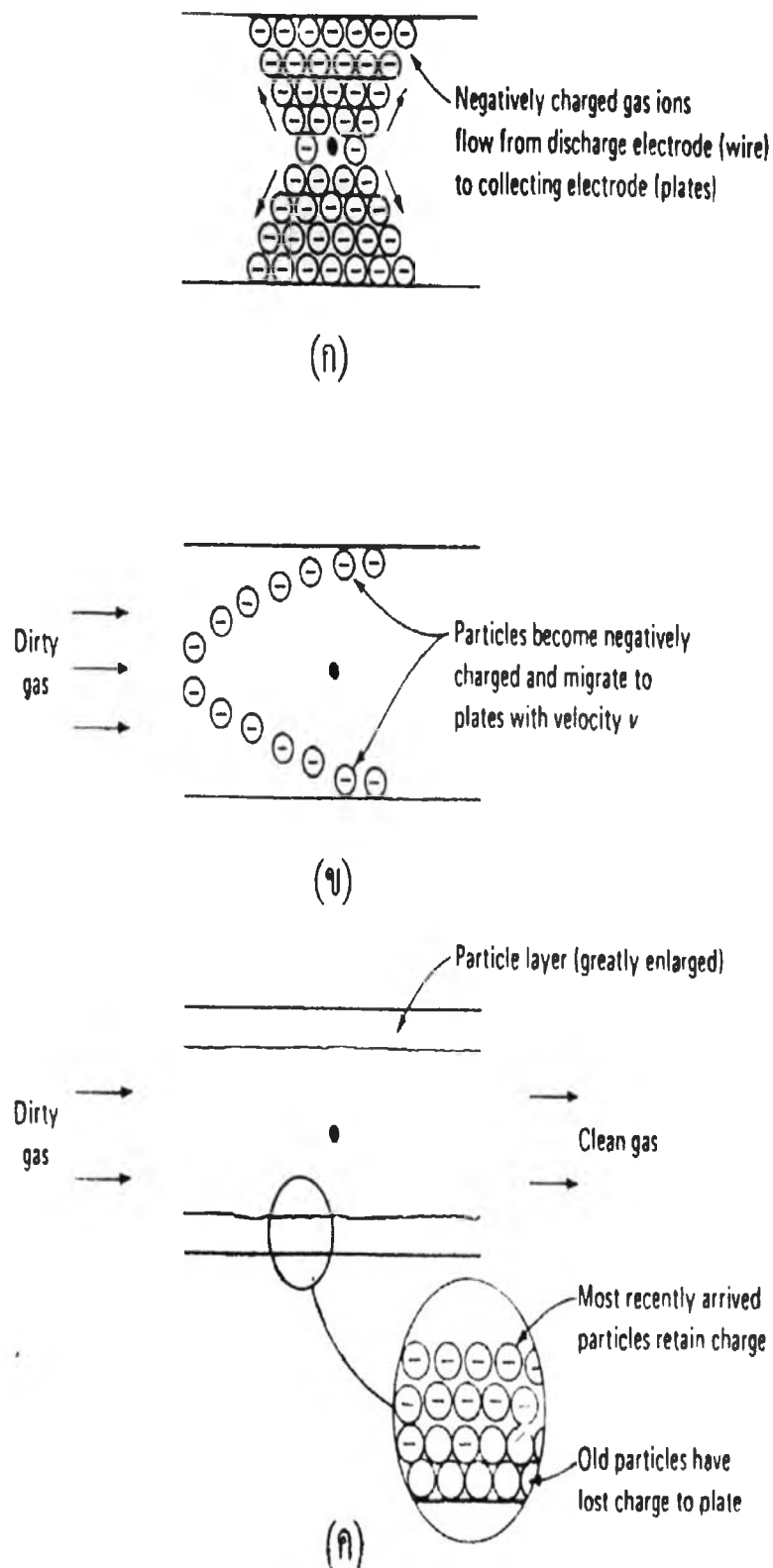
$D$  = dielectric constant ของอนุภาค ( ไม่มีหน่วย )

$\epsilon_0$  = permittivity ของอนุภาค ( ฟาราเดย์/เมตร )

$E_c$  = กำลังของสนามไฟฟ้าถ่ายประจุ ( โวลท์/เมตร )

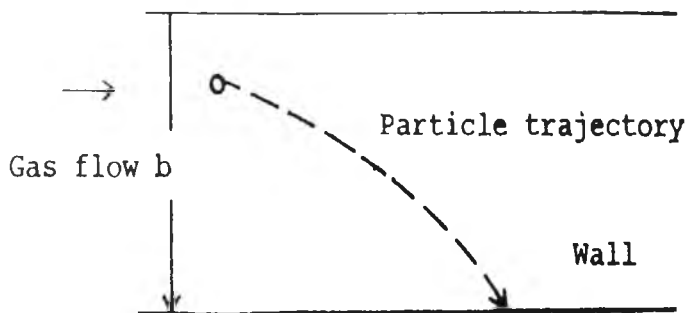
$D_p$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค ( เมตร )

ค่า dielectric constant ของอนุภาคชนิดต่าง ๆ จะมีค่าระหว่าง 2 ถึง 8 ดังนั้น  $p$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.50 ถึง 2.40 อนุภาคที่มีประจุนี้จะเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเก็บด้วยความเร็วหนึ่งซึ่งเรียกว่า migration หรือ drift velocity ,  $u$  ความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับแรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุกับแรงลากที่เกิด



รูปที่ 2.11 กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าสถิต<sup>[2]</sup> (ก) การเกิดของ ions ของก๊าซ (ข) อนุภาคถูกทำให้เกิดประจุแล้วเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเก็บ (ค) ชั้นของอนุภาคที่ทับถมขึ้นบนแผ่น

Discharge electrode



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในเครื่องทำให้ตกตะกอนโดยให้ไฟฟ้าสถิต

จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่ในแผ่นเก็บในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของก๊าซ แรงที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตนี้จะเป็นสัดส่วนกับประจุบนอนุภาคและกำลังของสนามไฟฟ้า (precipitating หรือ collecting field strength )  $E_p$

$$F_e = qE_p = \pi p \epsilon_0 E_c E_p D_p^2 \dots (2.40)$$

โดยที่  $F_e$  = แรงที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต (นิวตัน)  
 $E_p$  = กำลังของสนามไฟฟ้าเก็บประจุ (precipitating หรือ Collecting field strength) (โวลท์ / เมตร )

แรงลากที่เกิดกับอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ในเขตของกฎของสโตกส์ (Stokes' law) หรือ  $N_{Re} < 2$  จะมีค่าเท่ากับ

$$F_d = 3\pi \mu_g D_p u \dots (2.41)$$

โดยที่  $F_d$  = แรงลาก ( drag force ) (นิวตัน)  
 $\mu_g$  = ความหนืดของก๊าซ ( กก. / ม.-วินาที. )

โดยการตั้งสมการให้แรงไฟฟ้าสถิตเท่ากับแรงลาก ความเร็วของอนุภาคทรงกลมในเขตของกฎของสโตกส์ ( $D_p$  ประมาณ 1 ถึง 100 ไมครอน.) อาจหาได้ดังนี้

$$\text{แรงลาก} = \text{แรงไฟฟ้าสถิต} \quad \dots(2.42)$$

$$3\pi\mu_g D_p u = \pi p \varepsilon_0 E_p D_p^2$$

$$u = \frac{p\varepsilon_0 E_p D_p}{3\mu_g} \quad \dots(2.43)$$

สมการที่ (2.43) นี้ไม่รวมผลของการปั่นป่วนและการแปรของความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ากับตำแหน่ง สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าประมาณ 5 ไมครอน ควรคูณสมการที่ (2.43) ด้วยปัจจัยแก้ไขของคันทิงแฮม (Cunningham correction factor)  $K_c$  เพื่อให้ถูกต้องมากขึ้น ค่าของ  $K_c$  สำหรับอนุภาคในอากาศที่ 20° C และ 1 บรรยากาศ อาจประมาณได้โดยสมการที่ (2.44) (Wark & Warner, 1976)

$$K_c = 1 + \frac{0.172}{D_p} \quad \dots (2.44)$$

โดยที่  $D_p$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเป็น ไมครอน.

ในทางปฏิบัติ migration velocity อาจแตกต่างกันมากจากค่าที่ได้จากสมการที่ (2.43) ทั้งนี้เพราะว่าสมการนี้ไม่ได้รวมผลของการปั่นป่วน ผลของแรงเฉื่อยและการแปรของความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ากับตำแหน่ง สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่า 5 ไมครอน เมตร Migration velocity ทางทฤษฎีจะน้อยกว่า 0.3 เมตร/วินาที สำหรับผงซีเมนต์ขนาดเล็ก migration velocity จะอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.2 เมตร/วินาที

การทับถมของอนุภาคที่มีประจุบนแผ่นเก็บเป็นกลไกสำคัญอันหนึ่ง แรง adhesive, cohesive และแรงไฟฟ้าจะเป็นตัวกันการฟุ้งกลับของอนุภาคที่เกิดจากการไหลของก๊าซ คุณสมบัติของชั้นฝุ่นที่สำคัญมากอย่างหนึ่งต่อการทำงานของเครื่องตกตะกอนก็คือ ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของฝุ่น (electrical resistivity) ฝุ่นที่เกิดจากกิจกรรมอุตสาหกรรมจะมีความต้านทานจำเพาะแปรจาก  $10^{-3}$  ถึง  $10^{14}$  โอห์ม-ซม. เมื่อความต้านทานจำเพาะน้อยกว่า  $10^4$  โอห์ม-ซม. จะมีการถ่ายเทประจุจากฝุ่นที่ทับถมสู่แผ่นเก็บอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ประจุไฟฟ้าสถิตที่เหลืออยู่จะไม่พอที่จะยึดอนุภาคให้ติดอยู่กับแผ่นเก็บ และจะเกิดการฟุ้งกลับ (reentrainment) ของอนุภาคทำให้ประสิทธิภาพการเก็บลดลง ตัวอย่างฝุ่นที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำก็คือ carbon black อีกด้านหนึ่ง ถ้าความต้านทานจำเพาะมากกว่าประมาณ  $10^{10}$  โอห์ม-ซม. การทำงานของเครื่องตกตะกอนนี้ก็

จะมีปัญหาเช่นกัน ข้อแรก ชั้นฝุ่นที่มีความต้านทานจำเพาะสูงจะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลด (voltage drop) ระหว่างขั้วทั้งสอง ดังนั้น กำลังที่ทำให้เกิด corona ทั้งหมดจะเหลือเพียงส่วนเดียวที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน และขับให้อนุภาคที่มีประจุเข้าหาแผ่นเก็บ ข้อที่สอง ก็คือปัญหาที่เรียกว่า back corona หรือ back ionization ปัญหานี้จะเกิดเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดผ่านชั้นฝุ่นเกินค่า dielectric strength ของชั้นฝุ่น ionization ปัญหานี้จะเกิดเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดผ่านชั้นฝุ่นเกินค่า dielectric strength ของชั้นฝุ่นนั้น อากาศที่ถูกกักไว้ในชั้นฝุ่นจะแตกตัวเป็นไอออนแล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดอย่างมากผ่านชั้นฝุ่น ไอออนที่มีประจุบวกที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ออกจากแผ่นเก็บและไปทำให้อนุภาคที่มีประจุที่เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเก็บเป็นกลาง ปริมาณอนุภาคที่ทับถมก็จะลดลง นอกจากนี้การแตกตัวเป็นไอออนสามารถทำให้เกิดประกายไฟ (sparking) ในชั้นฝุ่นซึ่งอาจทำให้ชั้นฝุ่นที่เก็บแตกกลับสูงกระแสก๊าซ ปัญหาเหล่านี้เป็นตัวทำให้ประสิทธิภาพการเก็บของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตลดลง

เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ถ้าฝุ่นมี resistivity อยู่ในช่วง  $10^4$  ถึง  $10^{10}$  โอห์ม-ซม. เนื่องจากฝุ่นที่เกิดจากการอุตสาหกรรมโดยมากไม่อยู่ในช่วงนี้จึงมีความจำเป็น บ่อย ๆ ที่ต้องเปลี่ยนสภาพการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บ คุณสมบัติของก๊าซที่มีอิทธิพลต่อ resistivity ของฝุ่นก็คืออุณหภูมิและความชื้นเมื่อปรับอุณหภูมิและความชื้นก็จะได้ resistivity ที่เหมาะสม ตัวอย่างของกรณีนี้ก็คือฝุ่นที่เกิดจากเตาเผาปูนซีเมนต์ วิธีเปลี่ยน resistivity อีกวิธีหนึ่งก็คือการเติมตัวปรับสภาพ (conditioning agents) เข้าในกระแสก๊าซ วิธีนี้ใช้ในช่วงอุณหภูมิต่ำเพื่อทำให้เกิดการนำที่ผิว (surface conduction) ตัวอย่างเช่นการเติม  $SO_3$  หรือ  $NH_3$  จำนวนน้อย ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัว electrolytes เมื่อถูกดูดเข้าไปสู่ชั้นอนุภาคที่ทับถม ทำให้ resistivity ของชั้นฝุ่นนั้นลดลงทันที

ความยาวที่ต้องการของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตสำหรับการแยกอนุภาคนาขนาดหนึ่ง ๆ นั้น อาจประมาณได้จาก drift velocity โดยให้เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บเท่ากับเวลาที่ก๊าซผ่านเครื่องตกตะกอน จะได้ว่า สำหรับประสิทธิภาพการเก็บทางทฤษฎีเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ความยาวของขั้วเก็บประจุที่ต้องการจะหาได้ตามสมการที่ (2.45)

$$L = \frac{Su_g}{u} \quad \dots(2.45)$$

โดยที่	L	=	ความยาวของขั้วเก็บประจุ
	S	=	ระยะทางระหว่างขั้วถ่ายประจุและขั้วเก็บประจุ
	$U_g$	=	ความเร็วของก๊าซในเครื่องตกตะกอน
	u	=	drift velocity

ประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตอาจประมาณได้โดยสมมติว่าเครื่องตกตะกอนประกอบด้วย laminar boundary layer ที่อยู่ใกล้กับผนังเก็บและ turbulent core ใน boundary layer ให้ความเข้มข้นของอนุภาคสม่ำเสมอเท่ากับ  $C$  และอนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังเก็บด้วยความเร็วคงที่  $u$  ในระยะเวลา  $dt$  อนุภาคที่อยู่ในระยะ  $u dt$  จากผนังเก็บจะตกตะกอนบนผนังเก็บที่มีพื้นที่  $dA$  ดังนั้น ความเข้มข้นของอนุภาคใน turbulent core จะลดลงไปเท่ากับ  $dC$  โดยการทำสมดุลของอนุภาคที่หายไปจะได้

$$Qdc = -ucdA \quad \dots(2.46)$$

โดยที่  $Q$  = อัตราการไหลของก๊าซ (ปริมาตร/เวลา)

โดยการทำ integration ระหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องมือนั้นจะได้ว่า

$$\int_{C_i}^{C_o} \frac{dC}{C} = - \int_0^A \frac{u}{Q} dA$$

$$\ln \frac{C_o}{C_i} = - \frac{uA}{Q}$$

$$\frac{C_o}{C_i} = e^{-\frac{uA}{Q}}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนจะเท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{C_o}{C_i} = 1 - e^{-\frac{uA}{Q}} \quad \dots(2.47)$$

โดยที่  $A$  = พื้นที่เก็บทั้งหมด

สมการที่ (2.47) นี้เรียกว่า Deutsch equation เนื่องจากความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่ ( $u$ ) ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ดังนั้นประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค ในทางปฏิบัติสมการนี้ใช้สำหรับการประมาณเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับฝุ่นที่เกิดจากการอุตสาหกรรมค่า effective drift velocity ควรจะต้องหาจากการทดลองที่สภาพต่าง ๆ สำหรับแต่ละกลุ่มของอนุภาค



## 2.3 เครื่องสัมผัสหรือเครื่องเก็บแบบเปียก (Wet Scrubbers )

ในเครื่องเก็บแบบเปียกใช้ของเหลวซึ่งโดยปกติแล้วเป็นน้ำเป็นตัวจับอนุภาคหรือฝุ่น และเพิ่มขนาดของละอองไอ (aerosols) ในกรณีทั้งสองนี้จะทำให้ขนาดมลสารเพิ่มขึ้นและช่วยให้การแยกมลสารจากกระแสก๊าซง่ายขึ้น ของเหลวหรือน้ำจะถูกฉีดให้เป็นละอองเพื่อช่วยให้การสัมผัสระหว่างอนุภาคกับน้ำดีขึ้น สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ จะมีการแยกที่เกิดจากแรงถ่วงของโลกบ้าง ส่วนอนุภาคเล็กๆ ก็จะมีการแยกเนื่องจากแรงที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตหรือแรงที่เกิดจากความร้อนด้วย เครื่องเก็บแบบเปียกนี้สามารถแยกอนุภาคเล็กๆ ที่เป็นของแข็งและของเหลวที่มีขนาดระหว่าง 0.1 ไมครอน ถึง 20 ไมครอน ได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแห้งเพราะอนุภาคเล็กๆ จะรวมตัวใหญ่ขึ้นเมื่อสัมผัสกับน้ำและในขณะเดียวกันการฟุ้งกลับของตะกอน(re-entrainment)จะมีน้อย เพราะอนุภาคจะเปียกและถูกกักไว้ในชั้นของของเหลว (liquid film)

ข้อดีที่สำคัญของเครื่องเก็บแบบเปียกก็คือมีหลายแบบ ทำให้สามารถเลือกเครื่องที่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ข้อเสียของเครื่องก็คือมีความดันลดสูง ดังนั้นจึงต้องการพลังงานมากนอกจากนี้ก็ต้องขนถ่ายและทิ้งของเหลวที่ผ่านการสัมผัสซึ่งมีปริมาณมาก

### 2.3.1 กลไกการดักเก็บอนุภาค

ที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กันในเครื่องเก็บอนุภาคแบบเปียกรูปที่(2.13) รายละเอียดมีดังนี้

*การกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial impaction)* เกิดขึ้นเมื่อกระแสแก๊สเข้าไปใกล้หยดของเหลวที่ระยะทางหนึ่งก่อนที่จะถึงหยดน้ำ กระแสแก๊สจะเริ่มไหลเบี่ยงเบนออกไป ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีแรงเฉื่อย (inertia force) มากจะไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสแก๊สที่ไหลเบี่ยงเบนออกไปแต่จะเริ่มเคลื่อนที่ตรงไปกระทบกับหยดของของเหลว (droplet) และถูกหยดของของเหลวจับไว้ในที่สุด

*การสกัดกั้นโดยตรง (Direct interception)* แม้ว่าอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ตามกระแสแก๊สที่ไหลเบี่ยงเบนไปรอบๆ หยดของของเหลว อนุภาคของแข็งขนาดเล็กเหล่านี้ก็มีโอกาสเข้าสัมผัสและเกาะติดกับหยดน้ำได้ด้วยกลไกของการสกัดกั้นโดยตรง หาก

ว่าจุดศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งซึ่งเคลื่อนที่ไปกับกระแสแก๊สอยู่ห่างจากผิวของหยดของของเหลวเป็นระยะทางน้อยกว่ารัศมีของอนุภาคของแข็งนั้น

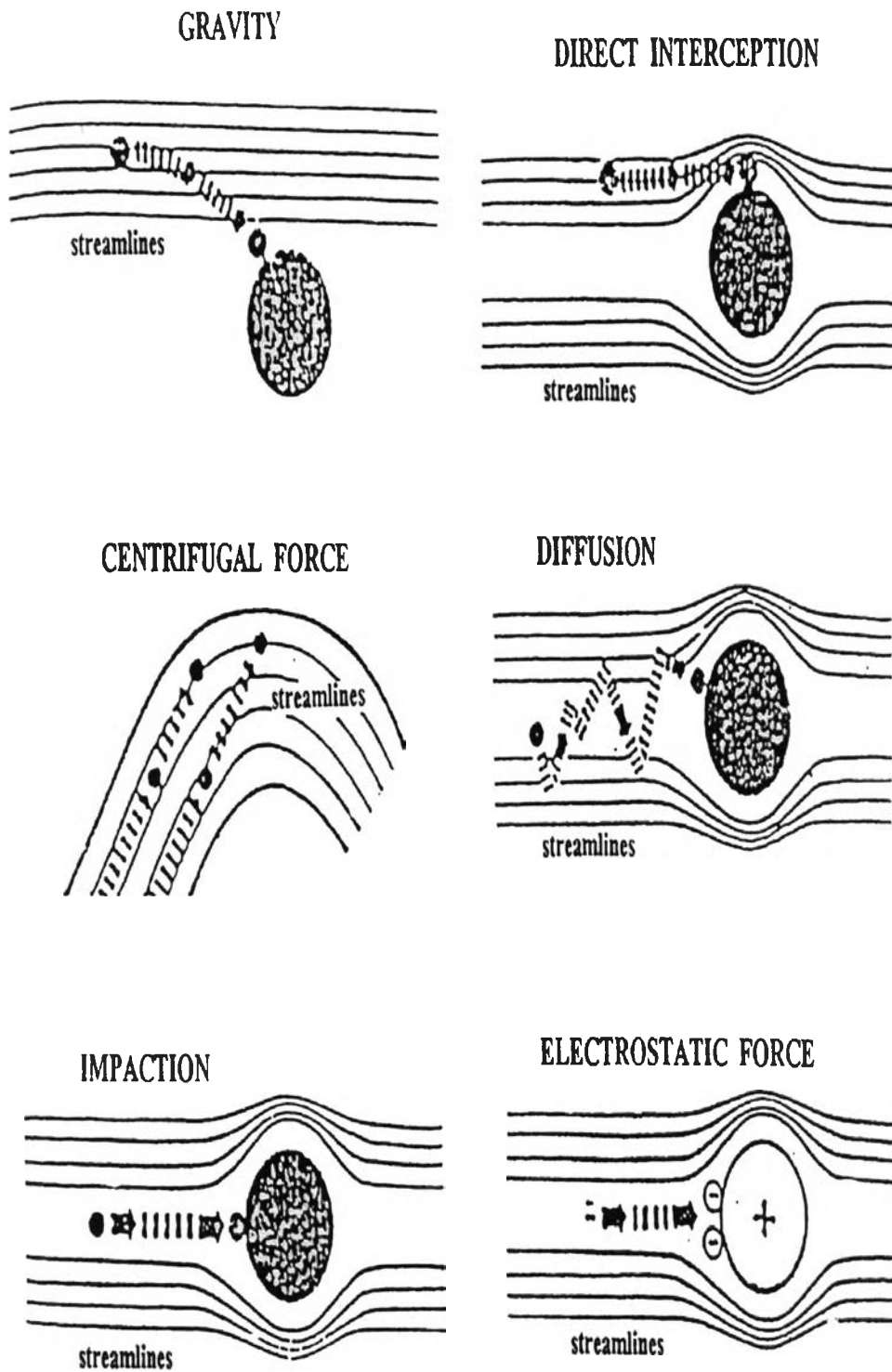
*การแพร่ (Diffusion or Brownian movement)* เป็นการแพร่แบบบราวเนียน กล่าวคือ อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กมากๆ เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.1 ไมครอน (submicron particles) และแขวนลอยอยู่ในกระแสแก๊ส จะมีการเคลื่อนที่แบบซิกแซกที่เรียกว่า Brownian movement เนื่องจากถูกชนโดยโมเลกุลของแก๊สที่อยู่รอบๆ การเคลื่อนที่แบบซิกแซกนี้เองที่ทำให้อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กเหล่านี้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนออกจากกระแสแก๊สกำลังไหลผ่านไปรอบๆ หยดของเหลวและสัมผัสกับหยดของเหลวได้

*แรงโน้มถ่วง (Gravitational force)* อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง (โดยปกติใหญ่กว่า 40 ไมครอน) ซึ่งเคลื่อนที่ไปได้เข้าในอากาศจะค่อยๆ ตกลงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและจะถูกแยกจากกระแสแก๊สไปในที่สุด

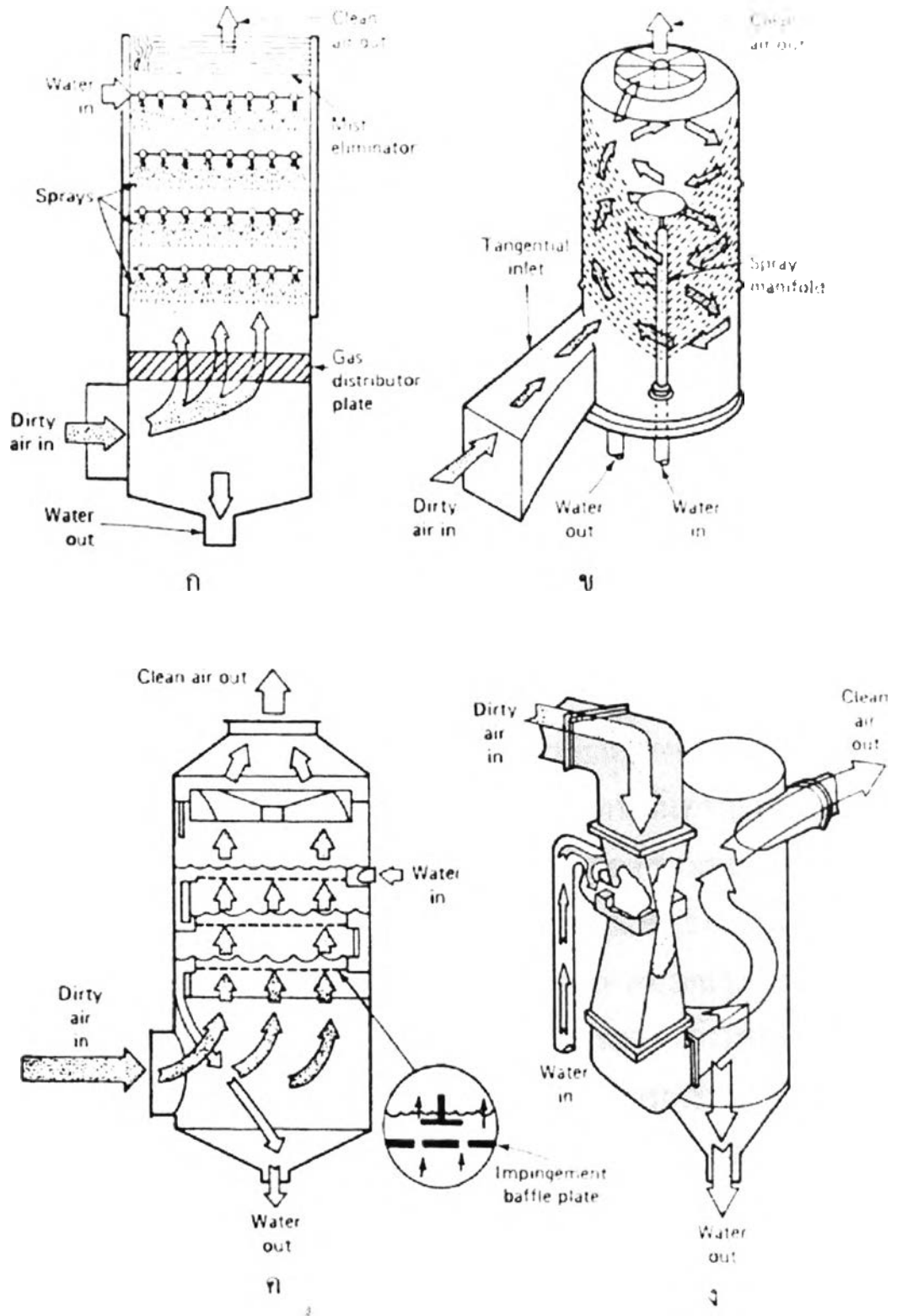
*แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force)* เมื่อมีการบังคับให้กระแสแก๊สเกิดการไหลหมุนวน (vortex flow) ในตัวเครื่องสกรับเบอร์ แรงหนีศูนย์กลางจะทำให้อนุภาคของแข็งมีวิถีการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนและแยกออกจากกระแสแก๊ส โดยอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่จะมีโมเมนตัมมากและเบี่ยงเบนออกจากกระแสแก๊สได้มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

*แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)* อนุภาคของแข็งบางชนิดมีประจุไฟฟ้าอยู่ในตัวโดยธรรมชาติหรืออาจจะได้รับการเติมประจุไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าแรงสูง เมื่ออนุภาคของแข็งที่มีประจุไฟฟ้าวิ่งเข้าไปในสนามไฟฟ้าสำหรับดักอนุภาคของแข็ง แรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคของของแข็งเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นดักฝุ่นซึ่งมีประจุตรงกันข้าม

*การควบแน่น (Condensation)* การควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สร้อนหรืออากาศมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วต่ำกว่าอุณหภูมิหยดน้ำค้าง (dewpoint) ของตัวมันเอง เมื่อความชื้นกลั่นตัวออกจากกระแสแก๊สจะทำให้เกิดกลุ่มหมอกของละอองไอน้ำขึ้น (mist) อนุภาคของแข็งจะถูกพาเข้าไปสู่ใจกลางของการควบแน่นทำให้อนุภาคเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้นอันเป็นผลมาจากการควบแน่นของของเหลวซึ่งจะทำให้โอกาสของการกระทบโดยตรงเพิ่มสูงขึ้น อนุภาคของแข็งก็就会被ดักได้มากขึ้น



รูปที่ 2.13 แสดงกลไกของการดักเก็บอนุภาคในเครื่องเก็บอนุภาคแบบเป็ยก<sup>[8]</sup>



รูปที่ 2.14 เครื่องเก็บแบบเปียก<sup>[8]</sup> ( ก) spray tower ( ข) cyclone spray tower  
( ค) impingement scrubber ( ง) venturi scrubber

### 2.3.2 แบบของเครื่องสัมผัสแบบเปียก

เครื่องสัมผัสแบบเปียกมีหลายแบบ ในรูปที่ 2.14 แสดงเครื่องสัมผัสแบบที่ใช้กันโดยทั่วไป 4 แบบ คือ

- ก. spray tower
- ข. cyclone spray tower
- ค. impingement scrubber
- ง. venturi scrubber

ใน 4 แบบนี้ spray tower เป็นแบบที่ง่ายที่สุด ในเครื่องสัมผัสแบบนี้ น้ำจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดเป็นฝอยเพื่อให้ น้ำสัมผัสกับอนุภาคที่ติดมากับก๊าซได้ดี ทิศทางการไหลของน้ำและก๊าซอาจเป็นแบบทวนกระแส (counter-current) ตามกระแส (co-current) หรือตัดกระแส (cross flow) การไหลแบบทวนกระแสเป็นแบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.3.3 ประสิทธิภาพของเครื่องเก็บแบบเปียก

ประสิทธิภาพการเก็บของเครื่องเก็บแบบเปียกเกี่ยวข้องกับพลังงานที่หายไปทั้งหมดของเครื่องมือ ซึ่งอาจวัดได้จากความดันลดของก๊าซที่ผ่านเครื่องมือ ประสิทธิภาพและปริมาณน้ำที่ต้องการของเครื่องเก็บแบบเปียกแบบต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพและปริมาณน้ำที่ต้องการของเครื่องเก็บแบบเปียก<sup>[2]</sup>

แบบ	ประสิทธิภาพที่อนุภาคขนาดต่างๆ	ปริมาณน้ำที่ต้องการ ลิตร/100 ม. <sup>3</sup> ก๊าซ	ความดันลด ซม.ของน้ำ
Spray tower	High for > 10 $\mu\text{m}$	20-75	2
Cyclonic spray tower	96% for 2 to 3 $\mu\text{m}$	20	2-5
Impingement scrubber	98% for >1 $\mu\text{m}$ (per plate)	10-20	2-20 (per plate)
Venture scrubber	99% for >1 $\mu\text{m}$	20	15-150

**ประสิทธิภาพของเครื่องเก็บแบบเปียกที่ใช้การฉีดน้ำเป็นฝอย** แม้ว่ากลไกในการเก็บอนุภาคของเครื่องเก็บแบบเปียกจะมีอย่างเด็ดหรือหลายอย่างก็ดี กลไกที่สำคัญที่สุดของเครื่องมือนี้ก็คือ impingement หรือ interception ของอนุภาคด้วยหยดของเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาคุณสมบัติของอนุภาค หยดของเหลว และเนื้อของเหลวที่มีอิทธิพลต่อ impingement วิธีการที่ง่ายคือ พิจารณาการที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาหยดของเหลวแล้วกระทบกันด้วยแรงเฉื่อยดังรูปที่ 2.15 ที่ระยะทางหนึ่งทางต้นทางอนุภาคจะแยกออกจากเส้นกระแส (streamline) ของก๊าซที่ไหลแล้วเคลื่อนที่ตรงเข้าสู่หยดของเหลว ขณะนั้นอนุภาคจะอยู่ภายใต้การกระทำของแรงสองชนิดคือแรงเฉื่อยของตัวเองและแรงลากเนื่องจากก๊าซที่อยู่รอบๆ (แรงที่เกิดจากแรงถ่วงของโลก ไฟฟ้า แม่เหล็ก และความร้อนจะไม่พิจารณา) ผลจากแรงทั้งสองนี้จะทำให้อนุภาคเข้าสู่จุดหยุดเมื่อเทียบ กับหยดของเหลว ถ้าระยะหยุด ( $x_s$ ) มากกว่าระยะทางที่อนุภาคเริ่มแยกจากเส้นกระแสถึงหยดของเหลวก็จะเกิดการกระทบ (impaction) ในที่นี้จะให้นิยามจำนวนการกระทบ (impaction number,  $N_i$ ) ว่าเป็นอัตราส่วนที่ไม่มีหน่วยของระยะหยุด ( $x_s$ ) กับเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดของเหลว ( $D_d$ ) หรือ

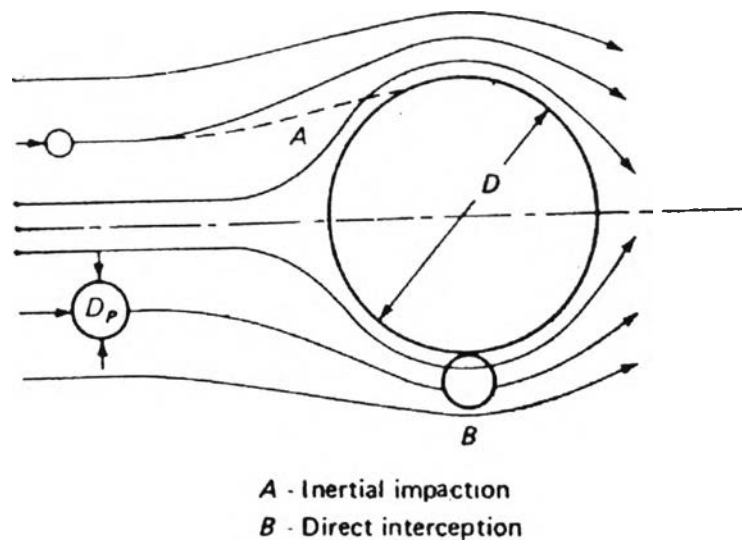
$$N_i = \frac{x_s}{D_d} \quad \dots(2.48)$$

ประสิทธิภาพการชนระหว่างอนุภาคและหยดของเหลวซึ่งทำให้อนุภาคแยกออกจากกระแสก๊าซพบว่ามีความสัมพันธ์กับจำนวนการกระทบระยะหยุดอาจหาได้จากสมดุลของแรงบนอนุภาคโดยสมมติว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นไปตามกฎของสโตกส์ (Stokes' Law)

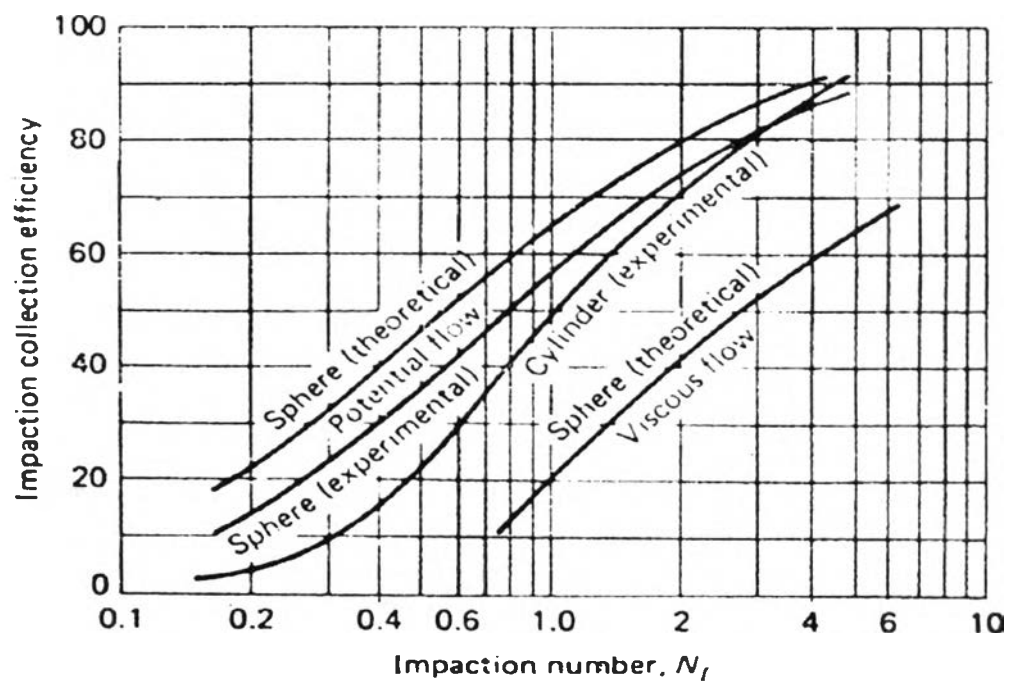
$$F_{inertial} + F_{drag} = 0 \quad \dots(2.49)$$

$$\text{หรือ} \quad m_p \frac{du_p}{dt} + 3\pi u_p \mu_g D_p = 0$$

โดยที่	$m_p$	=	มวลของอนุภาค
	$u_p$	=	ความเร็วของอนุภาค
	$t$	=	เวลา
	$\mu_g$	=	ความหนืดของก๊าซ
	$D_p$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค



รูปที่ 2.15 การเก็บอนุภาคด้วยการกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการรับตรง<sup>[2]</sup>



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเก็บด้วยการกระทบกับจำนวนการกระทบ<sup>[3]</sup>

เพื่อให้ง่ายขึ้น แทนค่า  $u_p$  ในแรงลากด้วยความเร็วเฉลี่ย  $u_p$  ของช่วงที่ความเร็วลดลงและถือว่าเป็นค่าคงที่ แล้วทำ integration

$$\int_{u_{p,0}}^0 - du_p = \int_0^t \frac{18 u_p \mu_g dt}{D_p^2 \rho_p} \quad \dots (2.50)$$

โดยที่  $u_{p,0}$  = ความเร็วสัมพัทธ์เริ่มต้นของอนุภาคในกระแสก๊าซ

$$u_{p,0} = \frac{18 u_p \mu_g t}{D_p^2 \rho_p} = \frac{18 u_g X_s}{D_p^2 \rho_p} \quad \dots (2.51)$$

โดยที่

$$u_p t = X_s \quad \dots (2.52)$$

เมื่อถอดสมการนี้จะได้ระยะหยุดสโตกส์ (Stokes stopping distance)

$$X_s = \frac{u_{p,0} D_p^2 \rho_p}{18 \mu_g} \quad \dots (2.53)$$

โดยส่วนมากแล้ว  $u_{p,0}$  จะเท่ากับความเร็วแรกของกระแสก๊าซเทียบกับหยุดของเหลว แทนค่า  $X_s$  ในสมการที่ (2.53) ลงในสมการที่ (2.48) ก็จะได้ค่าประมาณของ  $N_I$

$$N_I = \frac{u_{p,0} D_p^2 \rho_p}{18 \mu_g} \quad \dots (2.54)$$

[ข้อสังเกต ข้อแรกบางท่านให้นิยามจำนวนการกระทบ  $N_I$  ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะหยุดกับรัศมีของตัวเก็บ ในกรณีเช่นนั้นค่าคงที่ 18 ในสมการ (2.54) ต้องแทนด้วย 9 และการใช้ข้อมูลที่มีผู้ทำได้ทำไว้จะต้องระวังข้อนี้ด้วย ข้อที่สอง สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าประมาณ 5 มคม. ด้านขวาของสมการที่ (2.54) จะต้องคูณด้วยปัจจัยแก้ไขของคินนิงแฮม( $K_C$ )]

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดและความหนาแน่นที่กำหนดให้ จำนวนการกระทบ ( $N_I$ )จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วสัมพัทธ์  $u_{p,0}$  และเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของหยุด



ของเหลว ดังนั้นถ้าความเร็วสัมพัทธ์ยิ่งมากและขนาดหยดของเหลวยิ่งเล็กก็จะให้จำนวนการกระทบมากซึ่งโดยทั่วไปแล้วก็จะให้ประสิทธิภาพการเก็บเนื่องจากแรงเฉื่อยหรือการกระทบมากขึ้น

ประสิทธิภาพการกระทบระหว่างอนุภาคฝุ่นกับหยดน้ำ ( $\eta$ ) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของก๊าซส่วนที่อนุภาคที่ถูกแยกออกอยู่ กับพื้นที่หน้าตัดของหยดน้ำอาจประมาณได้จากรูปที่ 2.16 ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าประมาณ 5 ไมครอน จำนวนการกระทบที่คำนวณได้จะต้องคูณกับปัจจัยแก้ไขของคันทันนิ่งแฮม  $K_c$  ก่อน แล้วจึงนำมาอ่านค่า  $N_p$  ทางแกนนอน

ประสิทธิภาพการเก็บทั้งหมดของเครื่องเก็บแบบเปียกที่ใช้การฉีดน้ำเป็นฝอยพอจะประมาณได้ดังนี้ (Ekman & Johnstone, 1951)

สมมติว่าหยดน้ำเคลื่อนผ่านระยะประสิทธิภาพ  $L_e$  (effective length) ปริมาตรประสิทธิภาพ (effective volume) ที่หยดหนึ่งกวาดผ่าน

$$\text{Effective volume} = \eta_i \frac{\pi D_w^2 L_e}{4}$$

โดยที่  $D_w$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดน้ำ

$$\text{จำนวนหยดน้ำ} = \frac{Q_w}{(\pi D_w^3 / 6)}$$

โดยที่  $Q_w$  = ปริมาตรของน้ำที่ใช้ต่ออากาศหนึ่งหน่วยปริมาตร

ดังนั้นปริมาตรทั้งหมดที่ถูกกวาดโดยหยดน้ำทั้งหมด

$$= \left( \eta_i \frac{\pi D_w^2 L_e}{4} \right) \left( \frac{Q_w}{\pi D_w^3 / 6} \right) = \frac{3 \eta_i L_e Q_w}{2 D_w}$$

อัตราการเก็บอนุภาคจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของอนุภาคและปริมาตรของก๊าซที่ถูกกวาดผ่าน ดังนั้นการเปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาคต่อระยะทางจะเท่ากับ

$$\frac{dc}{dL} = \left( \frac{-3 \eta_i Q_w}{2 D_w} \right) c \quad \dots(2.55)$$

ที่ระยะทาง  $L$  อัตราส่วนของความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกมาต่อความเข้มข้นที่เข้าเครื่องมี้อาจหาได้โดยการจัดสมการที่ 2.56 แล้วทำ integration

$$\int_{c_o}^c \frac{dc}{c} = - \int_0^{L_e} \frac{3 \eta_i Q_w}{2 D_w} dL$$

$$\frac{C}{C_o} = e^{-\frac{3 \eta_i Q_w L}{2 D_w}}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบเปือก  $\eta$  จะเท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{C}{C_o} = 1 - e^{-\frac{3n_i L_e Q_w}{2D_w}} \quad \dots(2.56)$$

สมการที่ (2.56) นี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการเก็บ (collection efficiency) ของเครื่องเก็บแบบใช้ละอองน้ำจะเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพการกระทบ  $\eta$  อัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยอัตราไหลของอากาศ  $Q_w$  ระยะที่หยดน้ำเคลื่อนผ่าน  $L_e$  และลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของละอองน้ำ  $D_w$  เพิ่มขึ้น อนุภาคขนาดหนึ่งจะมีประสิทธิภาพการเก็บสูงสุดเมื่อละอองน้ำมีขนาดหนึ่ง เนื่องจากระยะเคลื่อนผ่านของละอองน้ำขึ้นอยู่กับขนาดของมัน ดังนั้น ถ้าขนาดลดลงระยะเคลื่อนผ่านของละอองน้ำจะลดลงด้วยเนื่องจากความดันทานของอากาศ

ถ้าประสิทธิภาพการกระทบของหยดน้ำ  $\eta$  และทางประสิทธิ์ (effective path) ที่หยดน้ำผ่านคงที่ เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/\eta$  (1-2) กับ  $Q_w$  จะเป็นเส้นตรงอย่างไรก็ดีในกรณีทั่วไปทั้งประสิทธิภาพการกระทบและระยะทางที่หยดน้ำเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของหยดน้ำและความเร็วของก๊าซ ดังนั้นเส้นที่เขียนมักจะไม่เป็นเส้นตรง

## 2.4 การเลือกใช้อุปกรณ์กำจัดฝุ่น

ในการเลือกใช้หรือออกแบบอุปกรณ์กำจัดฝุ่น จะต้องพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และมีความเข้าใจหลายด้านสำหรับเครื่องมือที่เลือกใช้ คือ ด้านเทคนิคในการควบคุมและเดินเครื่อง อุปกรณ์ มีความเข้าใจในแหล่งกำเนิดและอนุภาคที่จะต้องกำจัด และจะต้องปรับใช้อุปกรณ์กับมลสารนั้นได้

### 2.4.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ในการกำจัด

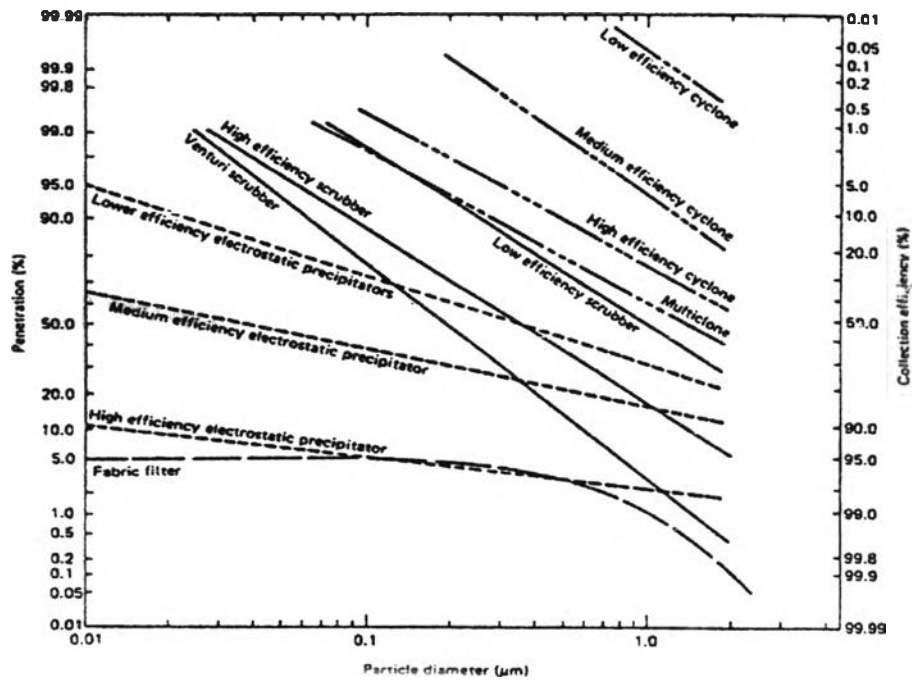
วิธีการกำจัดฝุ่นแบ่งออกเป็นกำจัดแบบเปือกและแบบแห้ง การพิจารณาเลือกใช้จะต้องให้เหมาะสมกับข้อจำกัดหรือความจำเป็นในการบำบัด ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการกำจัดทั้ง 2 แบบ

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องกำจัดฝุ่นแบบเปียกและแบบแห้ง

เครื่องกำจัดแบบเปียก	เครื่องกำจัดแบบแห้ง
<p><b>ข้อดี</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถกำจัดได้ทั้งอนุภาคมลสารและมลสารในรูปก๊าซได้พร้อมๆกัน</li> <li>2. มลสารที่เก็บได้สามารถขนถ่ายไปกำจัดในบริเวณอื่นได้</li> <li>3. ก๊าซที่ผ่านการบำบัดมีอุณหภูมิลดลง</li> <li>4. สามารถปรับสภาพก๊าซที่กักก่อนได้</li> <li>5.ปลอดภัย ไม่มีอันตรายจากการระเบิด ถ้าใช้ของเหลวในการดักจับที่เหมาะสม</li> <li>6. มีขนาดเล็กกว่าการเก็บแบบแห้ง เช่น bag house และ electrostatic precipitator</li> </ol>	<p><b>ข้อดี</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. แยกของแข็งออกมาได้โดยไม่ต้องมีการบำบัดต่อ</li> <li>2. ส่วนใหญ่จะไม่มีกักก่อน</li> <li>3. มีประสิทธิภาพสูงในการเก็บอนุภาคใหญ่กว่า 0.05 ไมโครเมตร</li> </ol>
<p><b>ข้อเสีย</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. อาจต้องมีการตกผลึก หรือแยกสารที่ละลายได้ออก</li> <li>2. ต้องมีการแยกสารที่ละลายไม่ได้</li> <li>3. ต้องมีการบำบัดน้ำเสียอีกครั้ง</li> <li>4. อาจมีไอน้ำปนออกมากับก๊าซ</li> <li>5. ก๊าซที่ผ่านการบำบัดอาจอิมตัวด้วยน้ำ</li> <li>6. อนุภาคที่เล็กมากอาจไม่ถูกกำจัด</li> <li>7. ของเหลวที่ใช้จับอาจแข็งตัวในอากาศเย็น</li> </ol>	<p><b>ข้อเสีย</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ของแข็งบางชนิดอาจติดกันเป็นก้อน</li> <li>2. การบำรุงรักษาหรือการทิ้งอนุภาค อาจมีการดำเนินการที่เป็นอันตราย</li> <li>3. อุณหภูมิสูงอาจจำกัดประสิทธิภาพการเก็บ</li> <li>4. มีข้อจำกัดในการใช้หากในก๊าซเสียมีสารกักก่อน (เช่น สำหรับ bag house)</li> <li>5. อาจมีปัญหาเรื่องประสิทธิภาพการเก็บในช่วงที่มีการนำฝุ่นออกไปจากตัวเก็บ</li> </ol>

ในการเลือกใช้อุปกรณ์การกำจัดในเบื้องต้น จะพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆที่สำคัญของอุปกรณ์กำจัดแต่ละชนิด อาทิ อัตราบรรทุกที่แต่ละเครื่องทำได้ ประสิทธิภาพการกำจัด พลังงานที่ใช้ ค่าใช้จ่าย เป็นต้น และเนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค เราจึงต้องคำนึงถึงขนาดอนุภาคของฝุ่นที่จะบำบัดด้วย

ในตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบปัจจัยที่สำคัญระหว่างเครื่องกำจัดฝุ่นแบบต่างๆ รูปที่ 2.17 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดและการหลุดรอดเครื่องกำจัดของอนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นของอุปกรณ์แบบต่างๆกับขนาดอนุภาค<sup>[14]</sup>

ตารางที่ 2.8 ความดันลดและขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่กำจัดได้สำหรับสครับเบอร์แบบต่างๆ<sup>[9]</sup>

ชนิดของสครับเบอร์	แรงดันลด (นิ้วของน้ำ)	ขนาดที่เล็กที่สุดของอนุภาค
Spray tower	0.5-1.5	10
Cyclone spray scrubber	2-10	2-10
Impingement scrubber	2-50	1-5
Packed-bed , fluidized-bed scr	2-50	1-10
Orifice scrubber	5-100	1
Venturi scrubber	5-100	0.8
Fibrous bed scrubber	5-110	0.5

ขนาดของอนุภาคจะมีผลต่อประสิทธิภาพการเก็บ โดยประสิทธิภาพการเก็บจะต่ำมาก ถ้าขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรและเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้น ในตารางที่ 2.6 และ ตารางที่ 2.8 แสดงความดันลดและขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่สามารถกำจัดได้ สำหรับสครับเบอร์แบบต่างๆ และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของสครับเบอร์แต่ละแบบ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของสครับเบอร์แต่ละแบบ<sup>[9]</sup>

ชนิดของสครับเบอร์	ราคาโดยเฉลี่ย(ดอลลาร์สหรัฐ)/ปริมาตรก๊าซ (acfm)			
	1,000	10,000	50,000	100,000
Venturi	14.00	5.50	3.00	2.20
Packed bed	14.00	3.00	0.80	-
Spray	50.00	5.00	1.00	0.70
Centrifugal	3.00	1.30	0.70	-
Impingement	8.00	3.50	2.00	1.50
Mobile bed	-	3.00	2.00	-

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบปัจจัยและข้อพิจารณาต่างๆของเครื่องเก็บอนุภาค

ข้อพิจารณา	การกำจัดด้วยกลไกแรงโน้มถ่วงและแรงเฉื่อย		
	แบบแห้ง	แบบเปียก	
		พลังงานต่ำ	พลังงานสูง
ชนิดของอุปกรณ์	ห้องตกตะกอน เครื่องแยกด้วยแรงเฉื่อย ไซโคลน	Wetted baffle, Wetted cyclone Wetted dynamic ejector	Venturi scrubber
ชนิดของมลสาร	จากการตัด บด จากแรงกล	จากการตัด บด จากแรงกล	สารเคมี ไฮโดรอะ
อัตราบรรทุก	0.1-100 g/m <sup>3</sup>	0.1-100 g/m <sup>3</sup>	0.1-100 g/m <sup>3</sup>
ประสิทธิภาพการกำจัด	สูงถ้าอนุภาคใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร	สูงถ้าอนุภาคใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร	สูงถ้าอนุภาคใหญ่กว่า 0.25 ไมโครเมตร
พลังงานที่ต้องการ (แรงดันลด-ช.ม.น้ำ)	5-15	5-15	50-200 (ที่ nozzle 30 atm)
ต้นทุนติดตั้ง	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ
ต้นทุนดำเนินการ	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
ความทนทาน	ดี (มีการขัดสี)	ดี (มีการกัดกร่อน)	ดี (มีการกัดกร่อน)

## 2.4.2 ข้อสรุปในการเลือกใช้อุปกรณ์การกำจัดฝุ่น

จากการเปรียบเทียบอุปกรณ์การกำจัดฝุ่นแบบต่างๆ และได้ประเมินเบื้องต้น เราสนใจที่จะทำการกำจัดฝุ่นแบบเปียก ในลักษณะหอสเปรย์ ด้วยเหตุผลดังนี้คือ

- 1) สามารถกำจัดมลสารที่อยู่ในสถานะก๊าซได้ ซึ่งจะทำให้เราสามารถกำจัดก๊าซจากการเผาไหม้อื่นๆ ร่วมกับอนุภาคฝุ่นด้วย เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น
- 2) สามารถกำจัดอนุภาคฝุ่นที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 มก./ลบ.ม. ถึง 100,000 มก./ลบ.ม. ซึ่งความเข้มข้นของฝุ่นที่จะต้องกำจัดมีค่าประมาณ 817 มก./ลบ.ม.
- 3) ให้ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก เมื่อเทียบกับสกรับเบอร์ชนิดอื่นๆ จากตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย เมื่อปริมาณก๊าซที่ต้องบำบัดมากขึ้น ค่าใช้จ่ายต่อปริมาตรก๊าซมีแนวโน้มลดลงมาก สำหรับก๊าซที่เราต้องการบำบัด มีอัตราการไหล 450,300 ลบ.ม./วินาที ซึ่งเท่ากับ  $9.58 \times 10^8$  acfm แสดงว่า ค่าใช้จ่ายในการบำบัดจะต้องต่ำกว่า 0.70 ดอลลาร์สหรัฐต่อ acfm
- 4) ถ้าประสิทธิภาพการกำจัดของหอสเปรย์สูง โดยมีเงื่อนไขว่า ขนาดฝุ่นต้องใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร แสดงว่าจะกำจัดได้ดี เพราะพิจารณาจากขนาดฝุ่นที่ได้จากการเผาไหม้ชานอ้อย ประมาณ 92% มีขนาดใหญ่กว่า 15 ไมโครเมตร และ 99% มีขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพที่ได้อาจต่ำกว่าที่คาดไว้ เพราะฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ อาจถูกกำจัดออกไปก่อนในขั้นตอนการใช้ multicyclone ทำให้สัดส่วนของฝุ่นที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเก็บลดลง
- 5) มีการดำเนินการง่าย ไม่ซับซ้อน และบริษัทมีบุคลากรซึ่งมีความเข้าใจในการควบคุมและเดินเครื่องอยู่แล้ว
- 6) ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ และการกำจัดน้ำเสียที่เก็บฝุ่น เนื่องจาก บริษัทตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีน้ำและมีบริเวณสำหรับการบำบัดเพียงพอ