

บทที่ 3

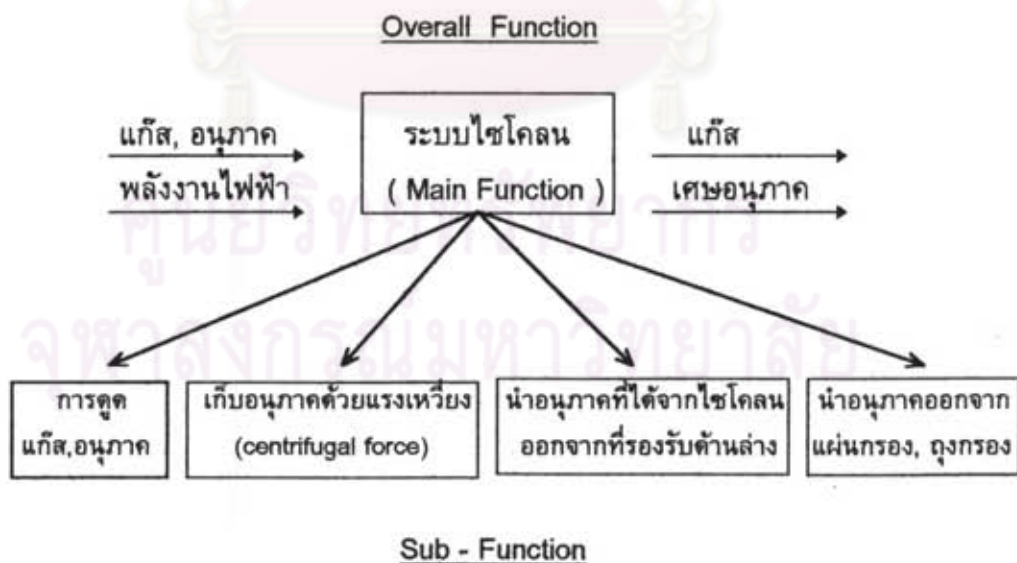
การออกแบบและการคำนวณ

ในการดำเนินการจัดสร้างระบบไซโคลนนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อที่จะลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

- 3.1 หลักการออกแบบ
- 3.2 หลักการคำนวณ
- 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1 หลักการออกแบบ

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้การทำงานของระบบไซโคลนสามารถแสดงด้วย Functional Structure ได้ดังนี้



จากแผนภาพแสดง Function Structure จะเห็นว่าในการทำงานของไซโคลนนี้จะต้องใส่พลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบเพื่อที่จะให้เกิดการดูดแก๊สที่มีอนุภาคปะปนอยู่เข้าสู่กระบวนการดัก

การแยกอนุภาคออกจากแก๊สโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในไซโคลนและอาศัยการเกิดชั้นของอนุภาค (filter cake) บนแผ่นกรอง (filter mat) กับถุงกรอง (bag filter) จากนั้นจึงปล่อยแก๊สที่สะอาดแล้วออกสู่บรรยากาศ ในกระบวนการลดปริมาณอนุภาคสำหรับงานวิจัยครั้งนี้สามารถพิจารณาได้จาก Sub - Function ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1.1 การดูดแก๊สและอนุภาค

การใช้ระบบไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ที่สร้างขึ้นนี้จะใช้งานไปพร้อมกับการทำงานของเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว โดยที่ผนังด้านในของเตาเผาถูกสร้างขึ้นด้วยอิฐทนไฟและคอนกรีตทนไฟชนิด SK30 SP - 25 ส่วนผนังด้านนอกบุด้วยฉนวนทนความร้อนชนิด silica-fiber หนา 5 มิลลิเมตร กับเหล็กแผ่นชุบสังกะสี (Galvanized steel sheet) หนา 1 มิลลิเมตร ที่ความสูงของเตา 1.53 เมตร ดังภาคผนวก ฉ แสดงการออกแบบเตาเผาชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว (Single-chamber incinerator) สำหรับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้จะถูกดูดเข้าสู่กระบวนการดักเก็บอนุภาคด้วยไซโคลนโดยใช้พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal fan) ที่มีแรงดันสูงเป็นอุปกรณ์หลักในการทำงานซึ่งจะดูดอากาศที่บริเวณทางออกของระบบไซโคลน พัดลมดูดอากาศที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นพัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยงชนิด BCF - 2 $\frac{1}{2}$ A สามารถดูดอากาศได้มากที่สุด = 60 m³/min สร้างความดันได้มากที่สุดประมาณ 250 mm.H₂O ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าและสามารถต่อไฟฟ้า 3 เฟสเข้ากับขั้วต่อไฟฟ้าของมอเตอร์ได้แบบต่อตรง ทั้งนี้พัดลมที่จะใช้ในการดูดแก๊สเข้าสู่ระบบควรจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. พัดลมควรมีอัตราการดูดอากาศสอดคล้องกับค่าอัตราการไหลของแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้
2. แก๊สที่ถูกดูดเข้าสู่ระบบควรมีความเร็วสูงมากพอที่จะสามารถพาอนุภาคเข้ามาพร้อมกับการไหลของแก๊สนั้น
3. พัดลมควรมีแรงดันมากพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานและแรงต้านต่าง ๆ จากระบบท่อและระบบไซโคลนได้

3.1.2 การดักเก็บอนุภาคด้วยไซโคลน

ในขณะที่พัดลมดูดอากาศทำงานนั้นแก๊สที่ถูกดูดจะมีความเร็วค่าหนึ่งซึ่งมากพอที่จะทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่มาพร้อมกับแก๊สได้ และอนุภาคที่ถูกดูดมากับแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้นั้นมีหลายขนาดปะปนกัน การไหลของแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนทิศทางไปตาม

รูปร่างของท่อและรูปทรงของไซโคลน ในขณะที่มีการเปลี่ยนทิศทางนั้นอนุภาคจะวิ่งไปชนผนังของท่อและเข้าสู่ระบบไซโคลน อนุภาคบางส่วนจะตกลงสู่ที่รองรับ (hopper) ด้านล่างโดยอาศัยหลักการหมุนวนของแก๊สทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อแยกอนุภาคออกจากแก๊สนั้น และด้วยน้ำหนักของตัวอนุภาคเอง ทั้งนี้การดักเก็บอนุภาคจะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับรูปทรงมาตรฐานของไซโคลนในแบบต่าง ๆ ด้วย ในการวิจัยครั้งนี้ได้พิจารณาเลือกใช้มาตรฐานการออกแบบไซโคลนด้วยวิธีของ Stairmand ซึ่งเป็นไซโคลนแบบที่มีทางเข้าของแก๊สในแนวเส้นสัมผัส (Tangential inlet type) ชนิด High efficiency, medium throughout ดังรูปที่ 2.4 (a) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโคลนเท่ากับ 320.0 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กแผ่น (steel plate) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 3.5 มิลลิเมตร ขนาด 0.48×0.1675 ตารางเมตร ม้วนเป็นทรงกระบอกกับเหล็กแผ่น (steel plate) รูปสี่เหลี่ยมคางหมู หนา 3.5 มิลลิเมตร ขนาด 0.176 ตารางเมตร ม้วนเป็นรูปทรงกรวยแล้วนำมาเชื่อมต่อกันให้เป็นไซโคลน ส่วนตรงบริเวณทางเข้าของไซโคลนมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.16×0.064 ตารางเมตร ดังรูปที่ 3.1 แสดงสัดส่วนต่าง ๆ ของไซโคลน สำหรับรายละเอียดในการคำนวณของการออกแบบจะได้กล่าวต่อไป

3.1.3 การนำอนุภาคออกจากที่รองรับ (hopper) ด้านล่าง

หลังจากแก๊สที่มีอนุภาคผ่านเข้าสู่ระบบไซโคลนแล้วอนุภาคส่วนหนึ่งที่มีขนาดแตกต่างกันจะตกลงสู่ที่รองรับด้านล่างด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) แล้วอนุภาคบางส่วนที่ไซโคลนไม่สามารถดักเก็บไว้ได้ก็จะติดไปกับอากาศที่ถูกดูดกลับขึ้นไปตามท่อขับเพื่อผ่านแผ่นกรอง (filter mat) และถุงกรอง (bag filter) ก่อนที่จะปล่อยแก๊สนั้นออกสู่บรรยากาศ จากนั้นนำอนุภาคที่ไซโคลนดักเก็บได้ไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง 'MASTERSIZER' ดังภาคผนวก ง แสดงการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาค และภาคผนวก จ แสดงการหาประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลน

3.1.4 การนำอนุภาคออกจากแผ่นกรอง (filter mat) และถุงกรอง (bag filter)

เนื่องจากแก๊สที่ออกมาจากไซโคลนนั้นยังมีอนุภาคบางส่วนที่ไซโคลนไม่สามารถดักเก็บได้ซึ่งมีช่วงขนาดต่าง ๆ กันปะปนอยู่ ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยแก๊สนั้นออกสู่บรรยากาศเราจะอาศัยหลักการกรองโดยให้แก๊สนั้นไหลผ่านแผ่นกรอง (filter mat) ชนิด P15/500 S รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.18×0.3 ตารางเมตร หนา 20 มิลลิเมตร กับถุงกรอง (bag filter) ชนิด PE/PE 651 ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัส 0.25 ตารางเมตร ตรงบริเวณทางออกของไซโคลนเสียก่อน ดังตารางที่ ข-7 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของแผ่นกรอง (filter mat) และ

ตารางที่ ข-8 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของถุงกรอง (bag filter) เมื่อแก๊สที่ออกจากไซโคลนผ่านเข้าไปในแผ่นกรองและถุงกรอง อนุภาคจะเกาะบนผิวและแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของเส้นใยซึ่งจะทำให้เกิดชั้นของอนุภาคที่เรียกว่า 'filter cake' ขึ้น การเกิดลักษณะดังกล่าวจะทำให้ช่องว่างของเส้นใยมีขนาดเล็กลงจึงสามารถดักเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่า การเกิดชั้นของอนุภาค (filter cake) นี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักเก็บอนุภาคที่มีขนาดเล็กๆที่ไซโคลนไม่สามารถดักเก็บได้เอาไว้ได้ดี อย่างไรก็ตามการเกิดชั้นของอนุภาคบนแผ่นกรองและถุงกรองนี้จะมีผลทำให้เกิดการอุดตันของเส้นใยได้เร็วขึ้น นั่นคือ เมื่อเกิดชั้นของอนุภาคจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้เกิด pressure drop ของระบบสูงมากขึ้นก็ควรนำเอาแผ่นกรองและถุงกรองนั้นมาทำความสะอาดก่อน โดยทั่วไปการทำความสะอาดแผ่นกรองและถุงกรองนี้มีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการใช้ลมเป่าย้อนกลับทาง (Air reverse jet) เพื่อทำความสะอาด โดยวิธีนี้มักนิยมใช้ในกรณีที่มีการเกิดชั้นของอนุภาคเร็วและมีปริมาณของอนุภาคสะสมมาก แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะทำความสะอาดแผ่นกรองและถุงกรองที่เกิดชั้นของอนุภาคด้วยวิธีการสั่นหรือเขย่า (Manual shaking) หลังจากทำการทดลองเสร็จในแต่ละครั้งเพื่อให้อนุภาคที่เกาะสะสมอยู่ตกลงสู่ที่รองรับแล้วจึงสามารถนำเอาแผ่นกรองและถุงกรองนั้นกลับไปใช้ได้ใหม่อีก ทั้งนี้การให้แก๊สที่ออกจากไซโคลนมาผ่านแผ่นกรองและถุงกรองอีกครั้งก่อนปล่อยสู่บรรยากาศก็เพื่อให้แก๊สนั้นมีความสะอาดมากขึ้นและเพื่อทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สนั้นว่าเป็นไปตามพิกัดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ ตามประกาศสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติในราชกิจจานุเบกษา ของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมหรือไม่

3.2 หลักการคำนวณ

การคำนวณเพื่อการออกแบบระบบไซโคลนได้พิจารณาเลือกใช้ไซโคลนแบบทางเข้าของแก๊สในแนวเส้นสัมผัส (Tangential inlet) ชนิด High efficiency, medium throughput ของ Stairmand ซึ่งอ้างอิงจากตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนมาตรฐานการออกแบบของไซโคลน โดยสามารถพิจารณาระบบออกเป็นช่วงต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.2.1 ระบบท่อจากเตาเผามูลฝอย

จากปล่องไฟ (stack) ของเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 260.0 มิลลิเมตร ($\cong 10''$) จะมีท่อลดขนาด (reducer) จากเส้นผ่าศูนย์กลาง 10'' เป็น 6'' จำนวน 1 ตัว และท่อลดขนาดจากเส้นผ่าศูนย์กลาง 6'' เป็น 4'' อีก 1 ตัว

ดังตารางที่ ข-5 แสดงขนาดของท่อลด ตามมาตรฐาน JIS B 2311 SGP เป็นตัวเชื่อมต่อกับท่อลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 114.5 มิลลิเมตร ($\cong 4''$) ที่บริเวณก่อนทางเข้าไซโคลน

โดยพิจารณาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการควบคุมการแพร่กระจายของอนุภาคที่บริเวณฝาครอบปล่องไฟ (hood) ต่อกับท่อลดขนาด (reducer) เส้นผ่าศูนย์กลาง 10'' ซึ่งคิดเป็นพื้นที่หน้าตัดได้ 0.05 ตารางเมตร โดยใช้ตารางที่ ข-1 พิจารณาเลือกค่าความเร็วจับ (capture velocity) หรือความเร็วควบคุม (control velocity) เท่ากับ 6.0 m/s ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad Q &= vA \\ &= (6.0 \times 0.05) \\ &= 0.3 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

และจากตารางที่ ข-2 พิจารณาเลือกความเร็วภายในท่อก่อนทางเข้าไซโคลน = 29.0 m/s ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อบริเวณก่อนทางเข้าไซโคลน; D_i จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad Q &= v_i A_i \\ A_i &= (0.3 \times 29.0) \\ &= 0.0103 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad D_i = \sqrt{(4 \times A_i) / \pi}$$

เมื่อ D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อบริเวณทางเข้าไซโคลน ; m.

v_i = ความเร็วของอากาศบริเวณทางเข้าไซโคลน ; m/s

A_i = พื้นที่หน้าตัดบริเวณทางเข้าไซโคลน ; m^2

$$\begin{aligned} \therefore D_i &= \sqrt{(4 \times 0.0103) / \pi} \\ &= 114.5 \quad \text{mm.} \end{aligned}$$

3.2.2 ระบบท่อทางเข้าสู่ไซโคลน

ในการออกแบบระบบไซโคลนโดยทั่วไปเนื่องจากต้องการให้ระบบสามารถทำงานได้สูงกว่าจุดทำงาน ($Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$) ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศที่จะใช้ในการคำนวณความดันสูญเสีย (pressure loss) ของระบบและการออกแบบมอเตอร์ของพัดลมจะพิจารณาอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจากจุดทำงานเดิมอีก 10 % ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q &= (1.1 \times 0.3) \\ &= 0.33 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ ดังนั้นความเร็วของอากาศบริเวณทางเข้าไซโคลน มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad v_i &= Q/A_i \\ &= (0.33/0.0103) \\ &= 32.04 \quad \text{m/s} \end{aligned}$$

จากตารางที่ ข-3 พิจารณาความเร็วของอากาศให้อยู่ในรูปความเร็วเนื่องจากความดัน (Velocity Pressure) ดังนั้นจะได้ $(VP)_i = 62.78 \text{ mm.H}_2\text{O}$

เนื่องจากระบบท่อทางเข้าไซโคลนเป็นท่อกลมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ; $D_i = 114.5$ มิลลิเมตร ความเร็วทางเข้าไซโคลน; $v_i = 32.04 \text{ m/s}$

จากรูปที่ ข-1 จะได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ (friction loss inside duct ; f_d) เท่ากับ $10.5 \text{ (mm.H}_2\text{O)/m}$ ที่ความยาวของท่อ = 2.3 เมตร ดังนั้นความดันสูญเสียภายในท่อก่อนทางเข้าไซโคลน; $(h_f)_i$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} (h_f)_i &= (10.5 \times 2.30) \\ &= 24.15 \quad \text{mm.H}_2\text{O} \end{aligned}$$

จากตารางที่ ข-4 พิจารณาข้องอ (round elbow) ที่ค่า $(R/D) = 1.5$ จะมีค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (friction loss in elbow ; f_{el}) เท่ากับ $0.39 (VP)_i$ ดังนั้นความดันสูญเสียในข้องอก่อนทางเข้าไซโคลน ; $(h_{el})_i$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}(h_{el})_i &= (0.39 \times 62.78) \\ &= 24.5 \quad \text{mm.H}_2\text{O}\end{aligned}$$

3.2.3 ตัวไซโคลน

จากตารางที่ 2.1 พิจารณาเลือกมาตรฐานการออกแบบไซโคลนชนิด High efficiency ของ Stairmand โดยที่พื้นที่หน้าตัดของท่อก่อนทางเข้าไซโคลนจะเท่ากับพื้นที่หน้าตัดบริเวณทางเข้าไซโคลน นั่นคือ

$$A_i = (a \times b) = 0.0103 \quad \text{m}^2$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโคลน; (D) ได้ดังนี้

$$\text{จาก } a = 0.5D$$

$$b = 0.2D$$

$$\begin{aligned}\therefore (a \times b) &= (0.5D \times 0.2D) \\ &= 0.0103 \quad \text{m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จะได้ } D &= \sqrt{0.0103 / (0.5 \times 0.2)} \\ &= 320.0 \quad \text{mm.}\end{aligned}$$

สำหรับสัดส่วนต่าง ๆ ของไซโคลนสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 3.1 ดังนี้

a/D	$= 0.5$;	a	$= (0.5 \times 320.0)$	$= 160.0$	mm.
b/D	$= 0.2$;	b	$= (0.2 \times 320.0)$	$= 64.0$	mm.
S/D	$= 0.5$;	S	$= (0.5 \times 320.0)$	$= 160.0$	mm.
D_e/D	$= 0.5$;	D_e	$= (0.5 \times 320.0)$	$= 160.0$	mm.
h/D	$= 1.5$;	h	$= (1.5 \times 320.0)$	$= 480.0$	mm.
H/D	$= 4.0$;	H	$= (4.0 \times 320.0)$	$= 1280.0$	mm.
B/D	$= 0.375$;	B	$= (0.375 \times 320.0)$	$= 120.0$	mm.

- เมื่อ
- D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของไซโคลน ; mm.
 - a = ความสูงบริเวณทางเข้าของไซโคลน ; mm.
 - b = ความกว้างบริเวณทางเข้าของไซโคลน ; mm.
 - S = ความยาวของท่อทางออกในไซโคลน ; mm.
 - D_e = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางท่อทางออกของไซโคลน ; mm.
 - h = ความยาวทรงกระบอกของไซโคลน ; mm.
 - H = ความยาวทั้งหมดของไซโคลน ; mm.
 - B = เส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณทางออกของอนุภาค ; mm.

พิจารณาค่าความดันสูญเสีย (pressure loss) ของไซโคลน; (ΔP_c) ด้วยวิธีของ Stairmand จากสมการที่ (2.14) จะได้

$$\Delta P_c = \frac{\rho_g}{2g\rho_l} \left(v_i^2 \left\{ 1 + 2\phi^2 \left[\frac{2(D-b)}{D_e} - 1 \right] \right\} + 2v_e^2 \right) \quad (2.14)$$

- เมื่อ
- v_e = ความเร็วของแก๊สในท่อทางออกของไซโคลน ; m/s
 - A = พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของแก๊ส ; m²
 - φ = friction loss factor ; ไม่มีหน่วย

โดยที่

$$v_i = \frac{Q}{(a \times b)} = \frac{0.33}{(0.0103)} = 32.04 \text{ m/s}$$

$$v_e = \frac{4Q}{(\pi D_e^2)} = \frac{(4 \times 0.33)}{(\pi \times (0.16)^2)} = 16.41 \text{ m/s}$$

$$A = \left\{ \frac{\pi}{4} (D^2 - D_e^2) + \pi D h + \pi D_e S + \frac{\pi}{2} (D+B) \left[(H-h)^2 + \left(\frac{D-B}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.13)$$

$$= \left\{ \begin{aligned} & \frac{\pi}{4} \left((0.32)^2 - (0.16)^2 \right) + (\pi \times 0.32 \times 0.48) + (\pi \times 0.16 \times 0.16) \\ & + \frac{\pi}{2} (0.32 + 0.12) \left[(1.28 - 0.48)^2 + \left(\frac{(0.32 - 0.12)}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\}$$

$$= 1.18 \quad \text{m}^2$$

$$\phi = \left[\frac{-\sqrt{D_e/2(D-b)} + \sqrt{(D_e/2(D-b)) + (4\Gamma A/ab)}}{(2\Gamma A/ab)} \right] \quad (2.12)$$

$$= \left[\frac{-\sqrt{0.16/2(0.32 - 0.064)} + \sqrt{(0.16/2(0.32 - 0.064)) + ((4 \times 0.005 \times 1.18)/(0.16 \times 0.064))}}{(2 \times 0.005 \times 1.18)/(0.16 \times 0.064)} \right]$$

$$= 0.92$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (2.14) จะได้

$$\Delta P_c = \left(\frac{1.2}{(2 \times 9.81 \times 1000)} \right) \left((32.04)^2 \left\{ 1 + 2(0.92)^2 \left[\frac{2(0.32 - 0.064)}{0.16} - 1 \right] \right\} + 2(16.4)^2 \right)$$

$$= 329.55 \quad \text{mm.H}_2\text{O}$$

3.2.4 ระบบท่อทางออกจากไซโคลน

เมื่ออัตราการไหลของอากาศ มีค่าเท่ากับ $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ ดังนั้นความเร็วภายในท่อทางออกของไซโคลน; (v_e) จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad v_e &= \frac{Q}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D_e^2} \\
 &= \frac{0.33}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \times (0.16)^2} \\
 &= 16.41 \quad \text{m/s}
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ ข-3 พิจารณาความเร็วของอากาศให้อยู่ในรูปความเร็วเนื่องจากความดัน (Velocity Pressure) ดังนั้นจะได้ $(VP)_e = 16.47 \text{ mm.H}_2\text{O}$

เนื่องจากระบบท่อทางออกจากไซโคลนเป็นท่อกลม ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อทางออก; $D_e = 160.0$ มิลลิเมตร และพิจารณาความเร็วภายในท่อทางออกจากไซโคลนที่ $v_e = 16.41 \text{ m/s}$

จากรูปที่ ข-1 จะได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ (friction loss inside duct; f_d) เท่ากับ $2.3 \text{ mm.H}_2\text{O/m}$ ที่ความยาวของท่อทั้งหมด = 6.59 เมตร ดังนั้นความดันสูญเสียภายในท่อทางออกจากไซโคลน; $(h_f)_e$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 (h_f)_e &= (2.3 \times 6.59) \\
 &= 15.16 \quad \text{mm.H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ ข-4 พิจารณาข้องอ (round elbow) ที่ค่า $(R/D) = 1.5$ จะมีค่าการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (friction loss in elbow; f_{el}) เท่ากับ $0.39 (VP)_e$ ซึ่งระบบท่อทางออกจากไซโคลนจนถึงทางเข้าของพัดลมจะมีข้องอทั้งหมด 3 ชิ้น ดังนั้นความดันสูญเสียในข้องอของระบบท่อทางออกจากไซโคลน; $(h_{el})_e$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 (h_{el})_e &= (3 \times 0.39 \times 16.47) \\
 &= 19.27 \quad \text{mm.H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นความดันสูญเสียของทั้งระบบ; $(\Delta P)_{total}$ จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 (\Delta P)_{\text{total}} &= (VP)_i + (h_f)_i + (h_o)_i + (\Delta P)_c + (VP)_o + (h_f)_o + (h_o)_o \\
 &= (62.78 + 24.15 + 24.5 + 329.55 + 16.47 + 15.16 + 19.27) \\
 &= 492.0 \quad \text{mm.H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

ในบางส่วนของระบบที่ไม่ทราบค่าความดันสูญเสีย ดังนั้นจะพิจารณาเพิ่มขึ้นจากจุดทำงานของระบบอีก 10% จะได้

$$\begin{aligned}
 (\Delta P)_{\text{total}} &= (1.1 \times 492.0) \\
 &= 541.2 \quad \text{mm.H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

3.2.5 ระบบพัดลม

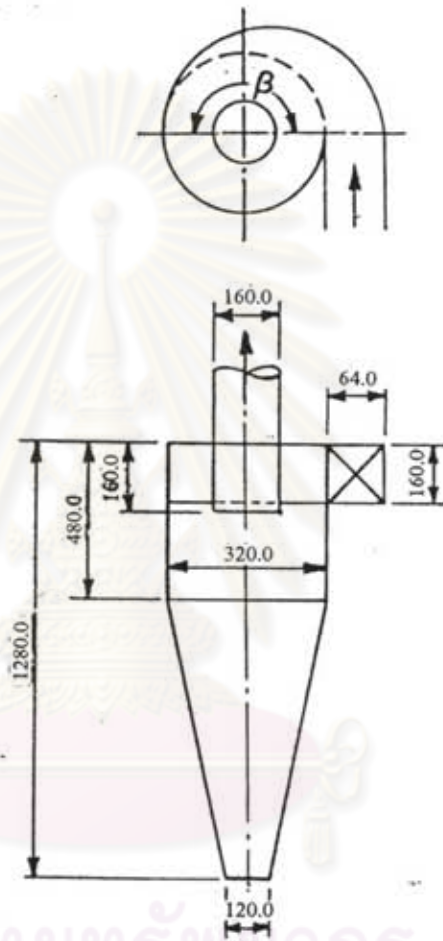
สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal fan) จากค่าอัตราการไหล; (Q) และค่าความดันสูญเสียรวม; $(\Delta P)_{\text{total}}$ ของระบบ จะสามารถหาขนาดของมอเตอร์ที่ต้องการใช้ในการขับพัดลมได้จาก

$$(\text{power})_{\text{motor}} = \frac{(\rho_l \cdot g \cdot Q \cdot (\Delta P)_{\text{total}})}{\eta_{\text{ov}}}$$

เมื่อ η_{ov} = Overall Efficiency ของพัดลม = 85 %

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad (\text{power})_{\text{motor}} &= \frac{(1000 \times 9.81 \times 0.33 \times 0.5412)}{(0.85 \times 746)} \\
 &= 2.76 \quad \text{แรงแม้า}
 \end{aligned}$$

∴ พิจารณาเลือกใช้มอเตอร์ของพัดลมขนาด 3.0 แรงแม้า ที่ความเร็วรอบ 2800 rpm.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แสดงสัดส่วนต่าง ๆ ของไซโคลน

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้สามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ระบบที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

3.3.1 ระบบที่ใช้ในการทดลอง

ระบบที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ เตาเผามูลฝอย ชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว, ตัวไซโคลน, ระบบวัดอุณหภูมิ, ระบบวัดอัตราการไหล, พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง และระบบกรองอากาศ

3.3.1.1 เตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว

เตาเผามีลักษณะห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกระบอก ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ ห้องเผาไหม้มูลฝอย (combustion chamber) สร้างจากคอนกรีตทนไฟชนิด SK30 SP – 25 มีค่า Thermal conductivity ที่อุณหภูมิไม่เกิน $1000^{\circ}\text{C} = 1.4 \text{ W}/(\text{m.K})$ พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.557 ตารางเมตร ความสูง 1.53 เมตร ซึ่งผนังด้านนอกของเตาเผาโดยรอบบุด้วยฉนวนทนความร้อน ชนิด silica-fiber มีค่า Thermal conductivity ที่อุณหภูมิไม่เกิน $1000^{\circ}\text{C} = 0.06 \text{ W}/(\text{m.K})$ หนา 5 เซนติเมตร คิดเป็นพื้นที่ได้ 6.70 ตารางเมตร และเหล็กแผ่นชุบสังกะสี (Galvanized steel sheet) หนา 1 มิลลิเมตร คิดเป็นพื้นที่ 8.10 ตารางเมตร ส่วนผนังด้านบนของเตาเผาจะถูกปิดด้วยฝาครอบ (hood) ซึ่งทำจากเหล็กแผ่น (steel plate) รูปสี่เหลี่ยมคางหมู หนา 3.2 มิลลิเมตร ขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.332 ตารางเมตร จำนวน 4 แผ่นมาประกอบกันโดยแต่ละแผ่นทำมุม 45° กับแนวระดับ นอกจากนี้ยังใช้เหล็กเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มาทำเป็นตะแกรง (grate) ขนาดพื้นที่หน้าตัด (0.01×20) ตารางเมตร ไว้ในเตาเผาเพื่อแบ่งส่วนเป็นห้องเผาไหม้มูลฝอยกับห้องเก็บขี้เถ้า ซึ่งห้องเก็บขี้เถ้ามีความสูง 0.25 เมตร จากพื้นเตาเผา ดังภาคผนวก ฉ แสดงการออกแบบเตาเผาชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว

3.3.1.2 ตัวไซโคลน

ตัวไซโคลนเป็นอุปกรณ์หลักในการลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งต่ออยู่กับเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว (Single-chamber incinerator) โดยมีรายละเอียดหลักการคำนวณเพื่อการออกแบบแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.1 และหัวข้อที่ 3.2

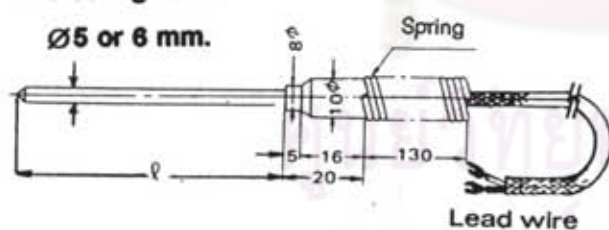
3.3.1.3 ระบบวัดอุณหภูมิ

สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ ในระบบไซโคลนสำหรับงานวิจัยนี้ คือ เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Chromel-Alumel) รุ่น JB-10, RB-10 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ต่อเข้ากับเครื่องอ่านอุณหภูมิชนิดตัวเลข (Digital thermometer) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง $0 - 1200^{\circ}\text{C}$ โดยในระบบนี้จะวัดอุณหภูมิของแก๊สทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ

- 1). บริเวณทางเข้าของไซโคลน
- 2). บริเวณทางออกของไซโคลน
- 3). บริเวณทางออกสู่บรรยากาศ

Protecting Tube

$\varnothing 5$ or 6 mm.



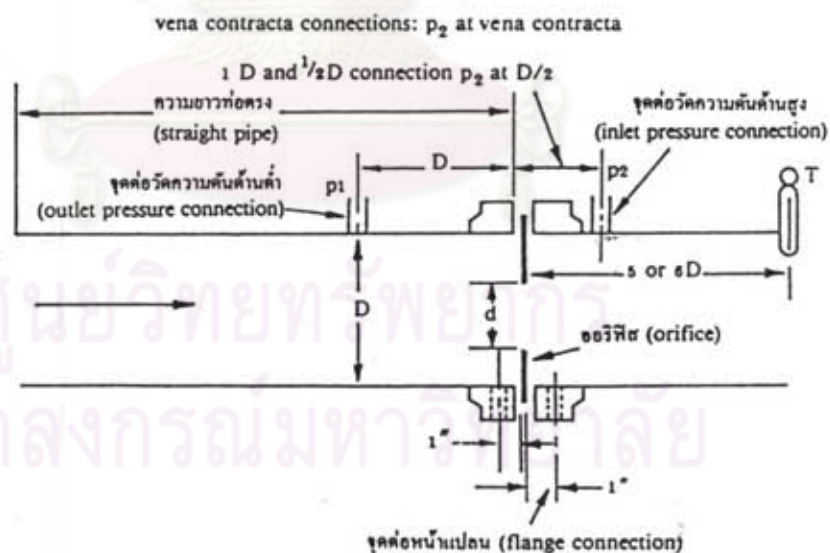
JB-10, RB-10

Element \varnothing	SPECIFICATIONS
	0.65 mm. CA (K), IC (J), (JB-10) PT-100 (RB-10)
Protecting Tube \varnothing	stainless $\varnothing 5$ or 6 mm.
Protecting Tube l	65, 100, 200, 300, 400, 500 mm.
Lead wire - Length	1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, Fiberglass insulation lead wire

รูปที่ 3.2 แสดงเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (แบบ Chromel-Alumel; CA)

3.3.1.4 ระบบวัดอัตราการไหล

ในการวัดอัตราการไหลของแก๊สที่ทางเข้าและทางออกของไซโคลนได้ใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ (Orifice plate) ของสถาบันมาตรฐานประเทศญี่ปุ่น (Japanese Institute Standard, JIS Z 8762-1969) โดยกล่าวว่า ความดันลดที่ผ่านแผ่นออริฟิซนี้จะสามารถอ่านได้จากமானอมิเตอร์ รูปตัว U ในรูปของความสูงแตกต่างของระดับของเหลวที่บรรจุอยู่ในமானอมิเตอร์เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราการไหลของแก๊สเป็นหน่วยมวลต่อเวลาได้ ดังภาคผนวก ก แสดงการหาอัตราการไหลของแก๊ส สำหรับที่บริเวณทางเข้าไซโคลนใช้แผ่นออริฟิซที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง; $d_i = 65.5$ มิลลิเมตร ต่อเข้ากับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง; $D_i = 114.5$ มิลลิเมตร ($\cong 4''$) โดยต่อจุดวัดเข้ากับமானอมิเตอร์ที่ตำแหน่ง $D, D/2$ ส่วนบริเวณทางออกไซโคลนใช้แผ่นออริฟิซที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง; $d_o = 84.5$ มิลลิเมตร ต่อเข้ากับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง; $D_o = 160.0$ มิลลิเมตร ($\cong 6''$) โดยต่อจุดวัดเข้ากับமானอมิเตอร์ที่ตำแหน่ง $D, D/2$ เช่นกัน ดังรูปที่ 3.3 แสดงระบบวัดอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิซ ชนิด $D, D/2$ tapping



รูปที่ 3.3 แสดงระบบวัดอัตราการไหลโดยใช้แผ่นออริฟิซ ชนิด $D, D/2$ tapping

3.3.1.5 พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง

พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal fan) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับดูดแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จากเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยวเข้าสู่ระบบไซโคลน พัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยงนี้เป็นพัดลมชนิด BCF - 2 1/2 A สามารถดูดอากาศได้มากที่สุด = 60.0 m³/min สร้างความดันได้มากที่สุดประมาณ 250 mm.H₂O ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า และสามารถต่อไฟฟ้า 3 เฟส เข้ากับขั้วต่อไฟฟ้าของมอเตอร์ได้แบบต่อตรง

3.3.1.6 ระบบกรองอากาศ

หลังจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคแล้วก่อนปล่อยสู่บรรยากาศแก๊สนั้นจะถูกกรองด้วยแผ่นกรอง (filter mat) ชนิด P15/500S รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดพื้นที่หน้าตัด (0.18 × 0.3) ตารางเมตร หนา 20 มิลลิเมตร และถุงกรอง (bag filter) ชนิด PE/PE 651 ขนาดพื้นที่ผิวสัมผัส 0.25 ตารางเมตร ตั้งตารางที่ ช-7 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของแผ่นกรอง (filter mat) และตารางที่ ช-8 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของถุงกรอง (bag filter) ทั้งนี้เพื่อดักเก็บอนุภาคที่ไซโคลนไม่สามารถดักเก็บได้และนำไปหาค่าความหนาแน่นของอนุภาคในแก๊สนั้นด้วย

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับหาการกระจายขนาดของอนุภาคที่ไซโคลนสามารถดักเก็บได้ในสภาวะต่าง ๆ มีชื่อว่า 'MASTERSIZER' ตั้งอยู่ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

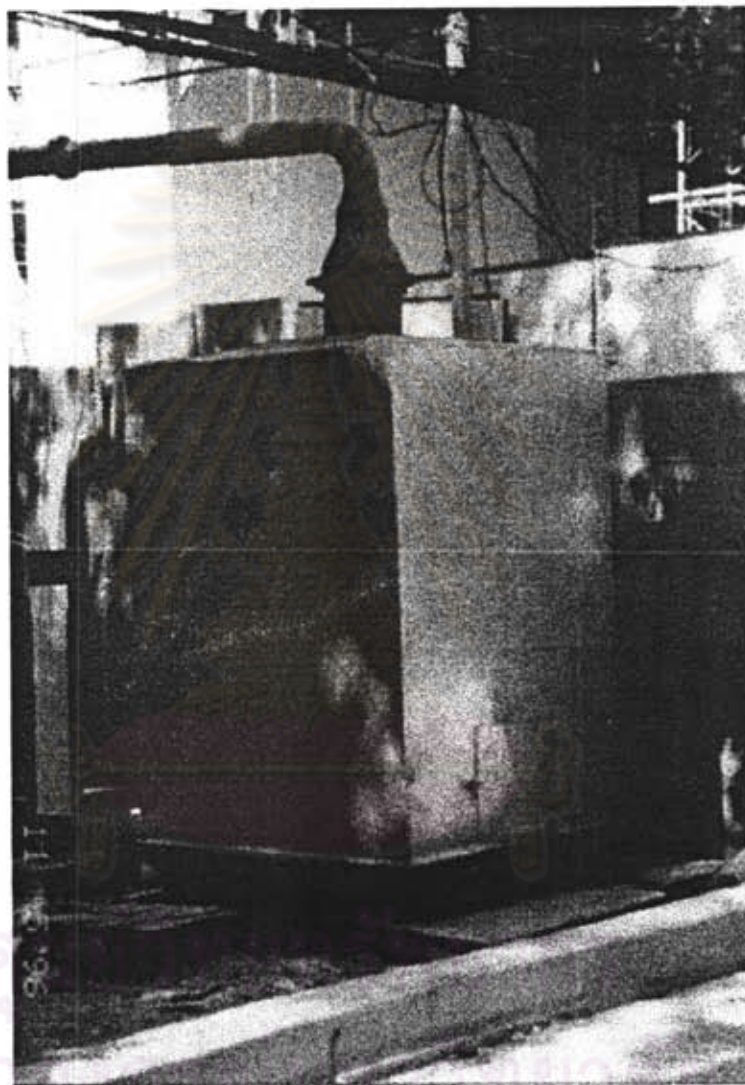
- 1). ส่วนมือนตัวอย่างของอนุภาคที่ต้องการวัดการกระจายขนาด (Small volume sample presentation unit)
- 2). ส่วนกำเนิดแสงและวัดการตกกระทบของแสงบนอนุภาค (Mastersizer optical measurement unit)
- 3). ส่วนประมวลผลและแสดงผล (Computer system)

- 4). ส่วนคำนวณผลด้วยคอมพิวเตอร์ (Malvern operating software) เป็นส่วนที่รับข้อมูลจากส่วนประมวลผลมาแสดง โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า ' Malvern Mastersizer ' เพื่อช่วยในการคำนวณและแสดงผลให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการใช้เครื่องมือนี้แสดงไว้ในภาคผนวก ง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แสดงเตาเผามูลฝอยชนิดห้องเผาไหม้เดี่ยว

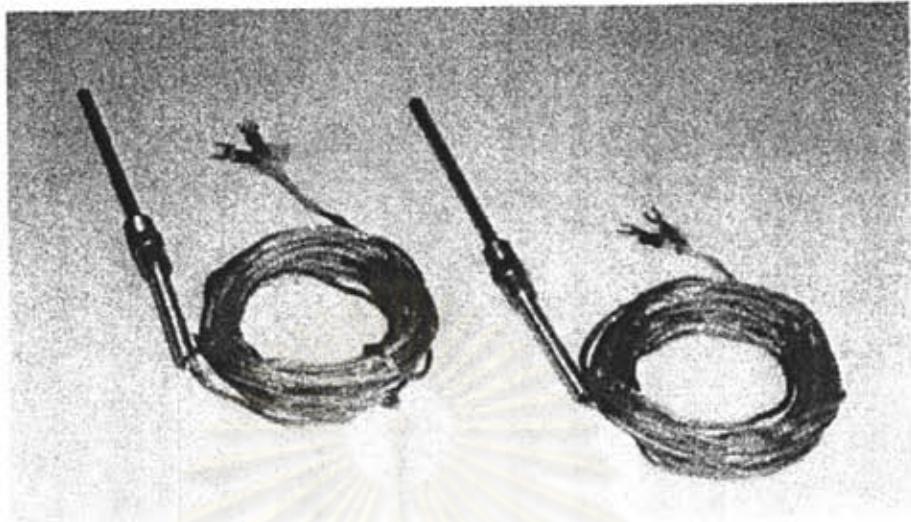


รูปที่ 3.5 แสดงตัวไฮดรอลิกที่ใช้ในการทดลอง

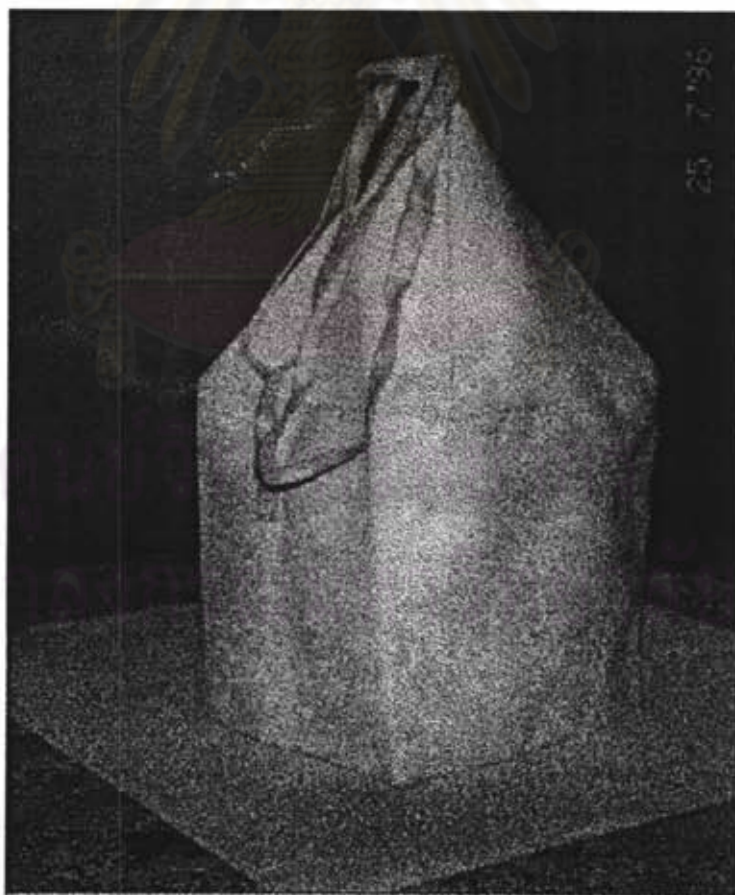
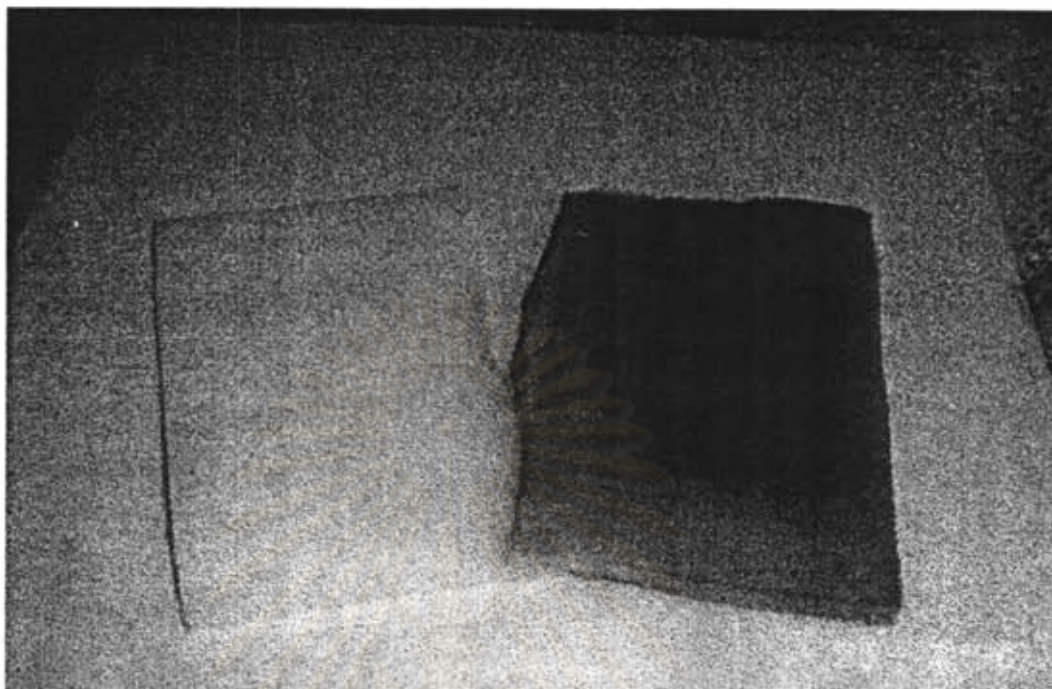


คู่มือ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

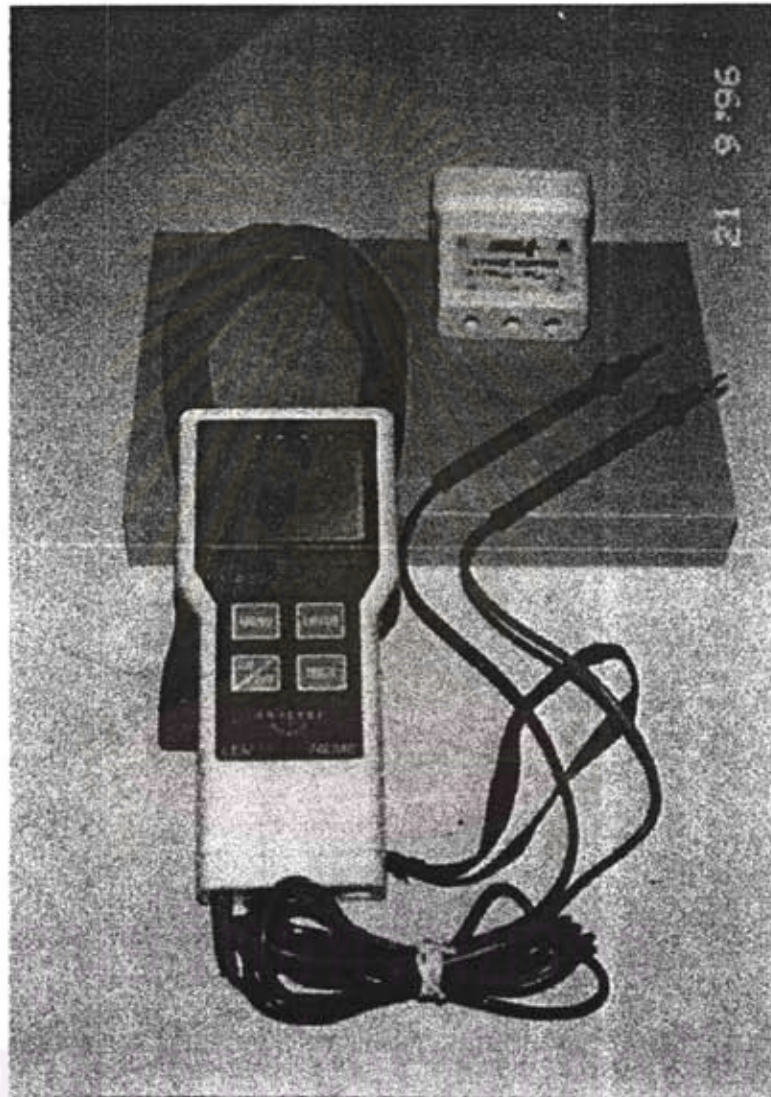
รูปที่ 3.6 แสดงพัดลมดูดอากาศแบบแรงเหวี่ยงที่ใช้ในการทดลอง



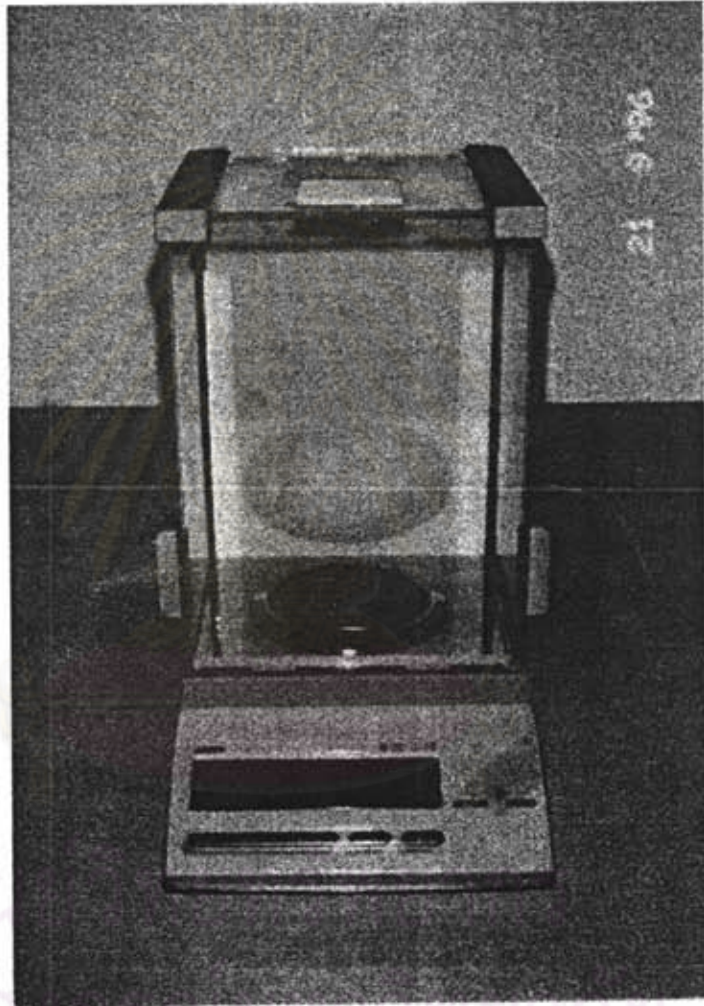
รูปที่ 3.7 แสดงเทอร์โมคัปเปิล และ digital thermometer ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.8 แสดงระบบกรองอากาศแบบแผ่นกรองและถุงกรอง



รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องมือ clamp on ammeter - voltmeter



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องชั่งมวลของอนุภาค 'Mettler Teledo AB 204'