

## การศึกษาและออกแบบเครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนสำหรับเตาเผาชีวมวล

### Study and Design of Cyclone Separator for Biomass Furnace

สิริธิดา สุขทั่ว<sup>1</sup>, จารุวัตร เจริญสุข<sup>1</sup> และ ณ์ติวิภา เจียรระโนวชิระ\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\*ติดต่อ: [kjvipa@kmitl.ac.th](mailto:kjvipa@kmitl.ac.th), เบอร์โทรศัพท์02-3298351, เบอร์โทรสาร02-3298352

#### บทคัดย่อ

เครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพื่อคัดแยกอนุภาค โดยประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ดีจะขึ้นกับสัดส่วนที่เหมาะสมของไซโคลน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการคัดแยกผงเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการสร้างแบบจำลองไซโคลนตามขนาดมาตรฐานเพื่อใช้ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamic, CFD) ทำการจำลองการไหลในไซโคลนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร โดยศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาด ได้แก่ขนาด 5, 10, 100 และ 500 ไมครอนที่ได้จากการทดลอง และจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้นำเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาดมาเปรียบเทียบกับผลการคัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลองจากผลการเปรียบเทียบพบว่าเส้นทางเดินของอนุภาคที่มีขนาด 5 และ 10 อนุภาคจะหลุดออกทางด้านบนของไซโคลน ที่อนุภาคขนาด 100 ไมครอน อนุภาคจะหมุนวนที่บริเวณทางออกด้านบนของไซโคลน ส่วนอนุภาคที่มีขนาด 500 ไมครอน อนุภาคจะหมุนวนอยู่บริเวณทางออกด้านล่างทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถตกลงสู่ทางออกด้านล่างได้มากขึ้น

**คำหลัก** : ไซโคลน, เตาเผาชีวมวล, การคำนวณพลศาสตร์ของไหล

#### Abstract

Cyclone separator has been one of the most widely used for particle separation. The excellent performance of cyclone separator relies on appropriate geometrical dimensions. In this research, separation efficiency of biomass is studied based on the standard dimension of cyclone separator by computational fluid dynamic (CFD). Simulation was carried out on cyclone diameter equal to 0.20 m. Trajectories of particle size 5, 10, 100 and 500 micron were monitored and compared with experimental result. Three distinctive scenario were observed; for the particle trajectories of 5 and 10 micron, it was found that the particle could escape at top of cyclone outlet while particle size 100 micron was centrifuged around top of cyclone and the largest particle size of 500 micron was centrifuged around the bottom of cyclone and fell to dipleg more than small particle.

**Keywords** :Cyclone, Biomass Furnace, Computational Fluid Dynamic

$\mu$  ความหนืดของแก๊ส(ปาสคาลต่อวินาที) $b$  ความกว้างของท่อเข้า(เมตร) $\rho_p$  ความหนาแน่นของอนุภาค(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) $\eta$  ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาครวม $f_j$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในแต่ละช่วงขนาด $\rho$  ความหนาแน่นของอนุภาค $g$  ค่าแรงดึงดูดของโลก(9.81 เมตรต่อวินาที) $A_F$  พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ $N_e$  จำนวนรอบของการหมุนของแก๊ส $V_i$  ความเร็วขาเข้าไซโคลน(เมตรต่อวินาที) $\rho_g$  ความหนาแน่นของแก๊ส(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) $\eta_j$  ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคในแต่ละช่วงขนาด $v$  ความเร็วสิ้นสุด $m$  มวลของวัตถุ $C_D$  สัมประสิทธิ์ของแรงต้านทาน

## 1. บทนำ

เครื่องคัดแยกอนุภาคไซโคลนหรือไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดแยกอนุภาคซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยอากาศที่มีอนุภาคจะหมุนลงด้านล่างแล้วย้อนกลับสู่ด้านบน แรงเหวี่ยงทำให้อนุภาคที่มากับอากาศแยกตัวออกและตกลงสู่ด้านล่างทั้งนี้ขนาดและรูปร่างของไซโคลนเป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนให้ดีขึ้น

Stairmand[1] ออกแบบไซโคลนประสิทธิภาพสูงโดยสันนิษฐานว่าอัตราส่วนความสูงกระบอกไซโคลนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเท่ากับ 1.5 และอัตราส่วนความสูงกรวยไซโคลนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเท่ากับ 2.5 กล่าวคือความสูงไซโคลนมีค่าเป็น 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน Shi และWu [2] ทำการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแยกอนุภาคเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเกินอัตราส่วนที่ดีที่สุด ประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่เพิ่มขึ้นเลย โดย Shi และ Wu กล่าวว่าอัตราส่วนความสูงไซโคลนมีค่าเป็น 3 ถึง 3.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน Hoffmann และคณะ [3] ได้ทดลองหาประสิทธิภาพการคัดแยกไซโคลนโดยการปรับอัตราส่วนให้เพิ่มขึ้นจนถึงค่าความสูงที่ประสิทธิภาพสูงสุดโดยหากใช้ค่าที่มากกว่าความสูงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกตกลงอย่างรวดเร็ว Elsayed และ Lacor [4,5] ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อให้ความดันลดต่ำสุด ด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) และใช้แบบจำลองของ Muschelknautz ซึ่งได้ความสูงกระบอกไซโคลนและความสูงไซโคลนเท่ากับ 1.618 และ 4.236 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนตามลำดับ เห็นได้ว่าการศึกษาและทดลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะทำการศึกษาการเดินทางของอนุภาคขนาดต่างๆในไซโคลนที่ได้ออกแบบขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองไซโคลนขนาดมาตรฐาน ประกอบการคำนวณพลศาสตร์ของไหล ทำการจำลองการไหลในไซโคลน เพื่อศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการคัดแยกเบื้องต้นที่ได้จากการนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปใช้ในการคัดแยกขนาดผงขี้เลื่อยก่อนนำไปใช้ในระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การคำนวณและออกแบบ

ในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลน คือ รูปร่างสัดส่วน, การกระจายตัวและขนาดอนุภาค และอัตราการไหลของไซโคลน เนื่องจากในไซโคลนแรงที่ถูกใส่เข้าไปให้อนุภาคจะมีการหมุนเหวี่ยงซึ่งเกิดจากการหมุนของกระแสบกาศ ซึ่งแรงนี้จะมากกว่าแรงโน้มถ่วง และทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนจะมาก

น้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับรูปร่างมาตรฐานที่เหมาะสม โดยรูปร่างมาตรฐานที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ดีที่สุดและถูกเลือกใช้ในการทดลองนี้คือ Stairmand (High Efficiency) ซึ่งเป็นไซโคลนแบบที่มีทางเข้าของแก๊สในแนวเส้นสัมผัส (Tangential Inlet Type) โดยสัดส่วนมาตรฐานและไซโคลนที่ออกแบบมีค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 1 ตารางที่ 1 สัดส่วนมาตรฐานของ Stairmand และขนาดไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	สัดส่วน, ขนาด (เมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน (D)	1.000, 0.20
ความสูงช่องทางเข้า (a)	0.500, 0.10
ความกว้างช่องทางเข้า (b)	0.200, 0.40
ความยาวช่องทางออก (S)	0.500, 0.10
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก (D <sub>e</sub> )	0.500, 0.10
ความสูงช่วงทรงกระบอก (h)	1.500, 0.30
ความสูงทั้งหมด (H)	4.000, 0.80
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายฝุ่น (B)	0.375, 0.75

โดยได้คำนวณหาประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนได้เท่ากับ 99.76% ทั้งนี้ มีหลายตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลน เช่น ความเร็วของแก๊สที่บริเวณทางเข้าของไซโคลน, การกระจายตัวของอนุภาค เป็นต้นในการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาดหนึ่ง เรียกว่าประสิทธิภาพย่อย (Grade or Fractional Efficiency) หาได้จากสมการ Semiempirical ของ Lapple โดยใช้หลักการสมดุลของแรงเหวี่ยง และแรงจุด (Drag Force) ที่กระทำในไซโคลน เพื่อคำนวณหาขนาดตัดของอนุภาค ( $d_{pc}$ ) ซึ่งเป็นขนาดของอนุภาคที่ถูกคัดแยกด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 50 ซึ่งคำนวณได้จาก Lapple ดังสมการที่ 1

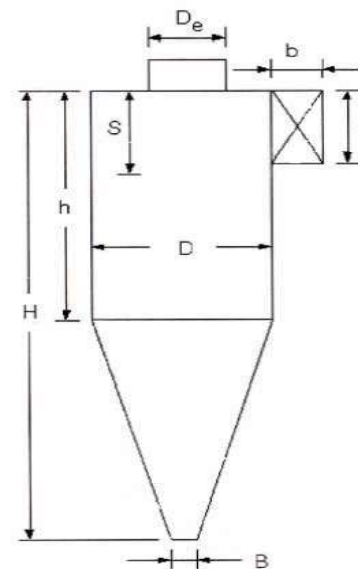
$$d_{pc} = \left( \frac{9\mu gb}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

สำหรับค่าประสิทธิภาพรวมหาได้จากสมการที่ 3

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} \quad (2)$$

$$\eta = \sum \eta_j f_j \quad (3)$$

ในการศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาค ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดขนาดอนุภาคที่ 5, 10, 15, 100 และ 500 ไมครอนซึ่งเป็นตัวแทนประชากรอนุภาคที่ได้จากการบดของเครื่องบดเชื้อเพลิง ทำการจำลองเส้นทางเดินของอนุภาคด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) เปรียบเทียบกับผลการคัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการคัดแยกอนุภาค กับเส้นทางเดินที่ได้จากการจำลองเหล่านั้น

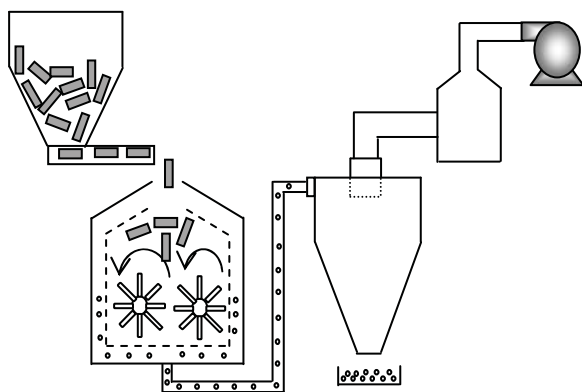


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของไซโคลน

## 2.2 ขั้นตอนการทดลอง

แผนภาพอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งมวลอัดแท่งในถังพักจะถูกสกรูลำเลียงนำเข้าสู่เครื่องบดเพื่อบดให้ได้ขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตรการทดลองแต่ละ

ครั้งจะใช้เครื่องดูดอากาศ (Blower) ดูดชีวมวลน้ำหนัก 1 กิโลกรัมเข้าสู่ไซโคลนที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ไซโคลนจะแยกชีวมวลส่วนใหญ่ออกจากอากาศที่เก็บไว้ที่ส่วนล่าง ชีวมวลที่ได้จากเครื่องบดและชีวมวลที่แยกไซโคลนจะถูกนำไปชั่งน้ำหนักและทดสอบหาค่ากระจายตัวของอนุภาค (Sieve Analysis) ทั้งนี้จะมีชีวมวลบางส่วนไม่ได้ถูกแยกด้วยไซโคลนและจะปนไปกับอากาศที่ออกทางด้านบนของไซโคลนชีวมวลส่วนนี้จะถูกแยกออกจากอากาศด้วยตัวกรองอากาศ



รูปที่ 2 แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง

### 2.3 การจำลองการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD Simulation)

ประสิทธิภาพที่ดีในการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนจะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของอนุภาคและรูปทรงที่เหมาะสมของไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละขนาด ได้แก่ขนาด 5, 10, 100 และ 500 ไมครอน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาความเร็วสิ้นสุด (Terminal velocity) ในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่ในไซโคลนโดยการทดลองได้นำเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละขนาดมาเปรียบเทียบกับผลการคัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนถัดไปจะพิจารณาประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนโดยทำการศึกษเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโคลนด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Simulation) และทดลองเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองต่อไป

#### 2.3.1 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD Model)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS 12.0 และใช้การจำลองที่สภาวะคงที่ (Steady State) โดยใช้แบบจำลองความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds Stress Model : RSM วสันต์ ศรีเมือง[5] ได้ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนระหว่าง K-epsilon และ RSM มาจำลองการไหล พบว่า การใช้แบบจำลองแบบปั่นป่วน RSM เท่านั้นที่สอดคล้องกับการทดลองจริง และได้รับการยอมรับว่ามีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของสนามการไหลในไซโคลนโดยสมการความต่อเนื่องที่ใช้สำหรับเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วในการจำลองนี้ได้เลือกฉีดอนุภาคเข้าสู่ไซโคลนจากฝั่งพื้นที่ทางเข้าของไซโคลนและเลือกแรงที่กระทำต่ออนุภาคเป็น Saffman Liftforce ซึ่งจะทำให้อนุภาคลอยตัวโดยเกิดจากแรงเฉือนในการจำลองนี้จะใช้ความแม่นยำในการลู่อู่เข้า  $10^{-3}$  ทั้งนี้ในการหาความเร็วและเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้ได้อย่างแม่นยำด้วยเงื่อนไขขั้นเวลา (time step size) จะเป็นค่าที่เหมาะสมหากกำหนดค่าที่น้อยเกินไปจะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ต้องทำงานหนักในงานวิจัยนี้เงื่อนไขขั้นเวลาจะเลือกใช้ที่ 0.001 วินาทีการไหลของแก๊สและการจำลองการไหลของอนุภาคในไซโคลนจะถูกแสดงด้วยแบบจำลองของการไหลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (discrete phase) และ Particle Track Method จะถูกนำมาใช้แต่ยังไม่สามารถแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ที่แตกต่างของอนุภาคได้อย่างชัดเจนโดยมีการตั้งสมมุติฐานว่า หากอนุภาคสัมผัสกับส่วนล่างของทางออก อนุภาคจะสิ้นสุดการเคลื่อนที่และถูกกักเก็บที่ส่วนนี้โดยประสิทธิภาพการเก็บกักจะถูกคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างอนุภาคที่ตกลงมาสู่ด้านล่างไซโคลนกับอนุภาคที่ปล่อยเข้ามา

#### 2.3.2. แบบจำลองไซโคลน (Cyclone Model)

การออกแบบไซโคลนสัดส่วนตามมาตรฐาน (ดังแสดงในตารางที่ 1) และสร้างแบบจำลองเมช (Mesh) ของไซโคลนแสดงดังรูปที่ 3 และทำการเปรียบเทียบจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนเมชจาก 124,020 , 221,608 , 512,000 กริด

พบว่าเมชขนาดเท่ากับ 512,000 กริด มีความเหมาะสม  
สำหรับใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เมชของไซโคลน

### 2.3.3 เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด

โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละ  
ขนาด ได้แก่ขนาด 5, 10, 100 และ 500 ไมครอนที่ได้  
จากการทดลอง และจากการจำลองพลศาสตร์ของไหล  
เชิงคำนวณได้นำเส้นทางเดินของอนุภาคแต่ละขนาดมา  
เปรียบเทียบกับผลการตัดแยกอนุภาคที่ได้จากการทดลอง  
เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลน

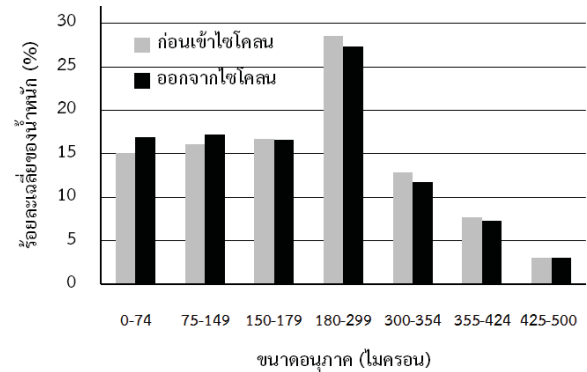
### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการคัด  
แยกอนุภาคของไซโคลนโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของ  
ไหลเชิงคำนวณเข้ามาร่วมด้วยเพื่อใช้ทำนายเส้นทางเดิน  
ของอนุภาคแต่ละขนาดเพื่อทำการเปรียบเทียบและ  
วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการคัดแยกเพื่อทำการ  
เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้โดยผลการทดลองได้  
แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

#### 3.1 ผลจากการทดลอง

หลังจากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการคัดแยก  
อนุภาคของไซโคลนได้ทำการหาการกระจายตัวของ

อนุภาค (Sieve Analysis) ก่อนเข้าและออกจากไซโคลน  
ผลที่ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกระจายตัวของอนุภาคก่อนเข้า  
และออกจากไซโคลน

จากผลการทดลองนำอากาศและอนุภาคขนาด 0.5  
มิลลิเมตรหนัก 1 กิโลกรัมเข้าสู่ไซโคลนที่ความเร็ว 10  
เมตรต่อวินาทีด้วยเครื่องดูดอากาศ (Blower) และทำการ  
เก็บอนุภาคที่ฝั่งขาออกด้านล่างของไซโคลนไปชั่งน้ำหนัก  
พบว่าอนุภาคทั้งหมดของฝั่งขาออกด้านล่างมีน้ำหนัก  
0.98 กิโลกรัม จากนั้นได้นำไปทำการหาการกระจายตัว  
ของอนุภาคในแต่ละขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดซึ่งมี  
ตะแกรงทั้งหมด 7 ขนาดได้แก่ 0, 75, 150, 180, 300,  
355 และ 425 ไมครอน โดยนำอนุภาคมาทดลองทั้งก่อน  
เข้าและฝั่งขาออกด้านล่างของไซโคลนอย่างละ 200 กรัม  
ใช้เวลาในการร่อนตะแกรงเพื่อหาการกระจายตัวของ  
อนุภาค ครั้งละ 10 นาที จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักของ  
อนุภาคในแต่ละขนาดที่ผ่านตะแกรงร่อนด้วยเครื่องชั่ง  
แบบดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัม (ดังรูปที่ 5) โดยทำ  
ทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นนำน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่  
ละขนาดมาหาร้อยละของน้ำหนักทั้งหมดที่นำมาทดลอง  
และหาค่าเฉลี่ย จากผลการทดลองจากรูปที่ 4 แสดงให้  
เห็นว่าอนุภาคที่ออกจากเครื่องบดนั้นมีการกระจายตัว  
ของอนุภาคที่หลากหลาย โดยมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ย  
ของอนุภาคอยู่ในช่วง 180 - 299 ไมครอนมากที่สุด, 150  
- 179 ไมครอน, 75 - 149 ไมครอน, 0 - 74 ไมครอน,  
300 - 344 ไมครอน, 355 - 424 ไมครอน และ 425 -  
500 ไมครอน ตามลำดับ เมื่ออนุภาคผ่านไซโคลนพบว่า

การกระจายตัวของอนุภาคโดยมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 180 – 299 ไมครอนมากที่สุด, 75 – 149 ไมครอน, 0 – 74 ไมครอน, 150 – 179 ไมครอน 300 – 344 ไมครอน และ 355 – 424 ไมครอนตามลำดับ จากการหาการกระจายตัวของอนุภาคที่ผ่านเครื่องบดและทางออกด้านล่างของไซโคลนพบว่าน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคที่อยู่ในช่วง 150 – 424 ไมครอนจะมีน้ำหนักลดลงเมื่อผ่านไซโคลน และมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคที่อยู่ในช่วง 0 – 75 ไมครอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กบางส่วน ไซโคลนไม่สามารถทำการคัดแยกได้จึงปะปนไปกับอากาศและหมุนวนหลุดไปที่ทางออกของไซโคลนในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่เกิดการหมุนวนที่บริเวณทรงกรวยและทางออกด้านล่างของไซโคลนทั้งหมดซึ่งอนุภาคที่เลือกนำมาวิเคราะห์อาจเกิดการแตกตัวหรือถูกขัดสีให้มีขนาดเล็กลงเนื่องจากแรงปะทะจากการป้อนอนุภาคที่มีความเร็วสูงเบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล [6]

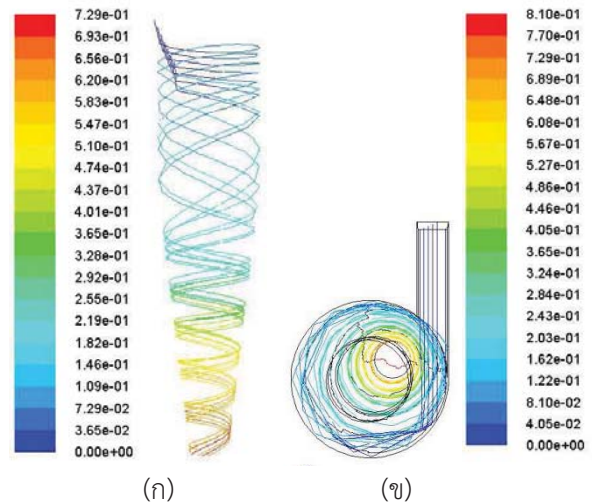


รูปที่ 5 เครื่องชั่งน้ำหนัก “ARC120” 0.01 กรัม

### 3.2 ผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD)

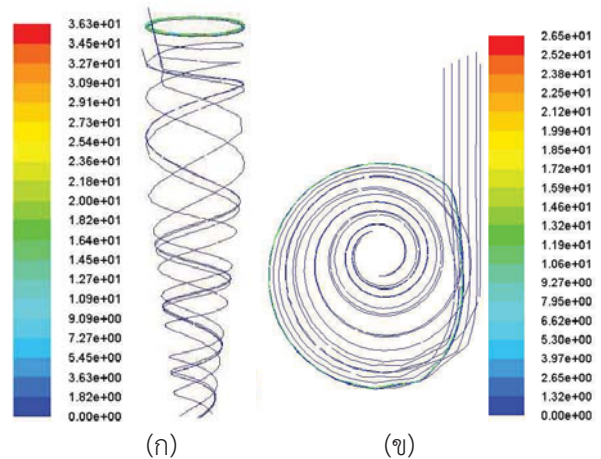
จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ขนาดอนุภาคเท่ากับ 500 ไมครอนดังรูปที่ 6 กำหนดให้เริ่มนับเวลาเดินทางของอนุภาคบริเวณทางเข้าที่ 0 วินาที จากนั้นอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่และหมุนวนอยู่บริเวณ

ทางออกด้านล่างที่เวลา 7.29 วินาที หากอนุภาคสัมผัสกับส่วนล่างของทางออกไซโคลน อนุภาคจะสิ้นสุดการเคลื่อนที่และหลุดออกไปยังส่วนทางออกด้านล่างของไซโคลน



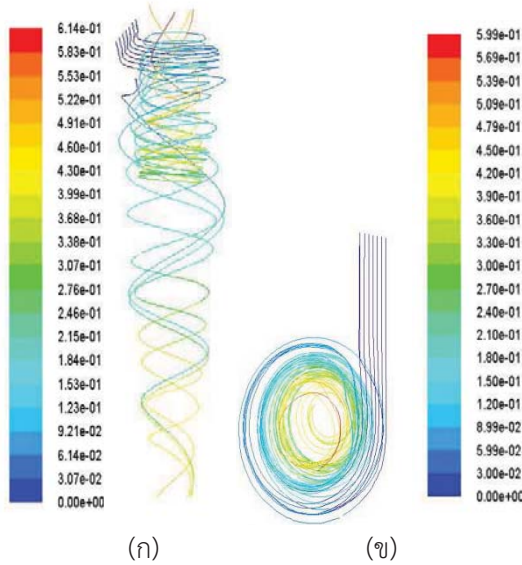
รูปที่ 6 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาด 500 ไมครอน (ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0

เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาด 100 ไมครอน อนุภาคจะมีการหมุนวนที่บริเวณทางออกไซโคลนที่เวลา 1.82-3.63 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7

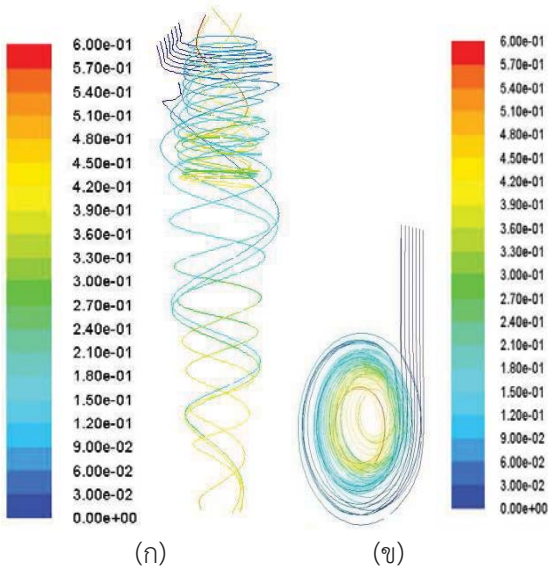


รูปที่ 7 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาด 100 ไมครอน (ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0 ที่อนุภาคเท่ากับ 10 และ 5 ไมครอนดังรูปที่ 8 และ 9 พบว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคบริเวณทางเข้าที่เวลา 0 วินาที จากนั้นอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่และหมุนวนและหลุด

ออกที่ทางออกของไซโคลนด้านบนที่เวลา 6.14 และ 6.0 วินาที



รูปที่ 8 เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 10 ไมครอน  
(ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0



รูปที่ 9 เส้นทางเดินของอนุภาคขนาด 5 ไมครอน  
(ก) ด้านหน้าที่ระนาบ Z=0 (ข) ด้านบนที่ระนาบ Y=0  
จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคของไซโคลนมีค่าเท่ากับ 98.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการคัดแยกของไซโคลนที่ได้ออกแบบไว้มีค่าเท่ากับ 99.76 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าเมื่อผ่านไซโคลนแล้วการกระจายตัวของอนุภาคจะมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคช่วง 150 – 424 ไมครอนมี

น้ำหนักลดลง ซึ่งจากผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลจะพบว่าในช่วงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในช่วง 100 – 500 จะมีอนุภาคหมุนวนที่บริเวณทรงกรวยและทางออกด้านล่างของไซโคลนที่เวลามากขึ้นและอาจทำให้อนุภาคมีการขัดสีทำให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากแรงปะทะจากการป้อนอนุภาคที่มีความเร็วสูงจึงทำให้อนุภาคส่วนนี้มีการแตกตัว เบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล [6] และทำให้อนุภาคที่มีการกระจายตัวช่วง 0 – 75 ไมครอนมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยของอนุภาคเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและรูปที่ 4 จะพบว่าอนุภาคที่มีขนาด 0 – 10 ไมครอนจะเกิดการหมุนวนที่บริเวณทางออกไซโคลนและหลุดออกไปที่ทางออกด้านบน

#### 4.สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่าไซโคลนมีประสิทธิภาพในการคัดแยกได้ 98.60 เปอร์เซ็นต์ และมีอนุภาคที่ไม่สามารถดักจับได้อยู่ 1.40 เปอร์เซ็นต์ จากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้แสดงให้เห็นว่าเส้นทางเดินของอนุภาคภายในไซโคลนของอนุภาคขนาดเล็ก มีแนวโน้มที่จะอยู่ในบริเวณทางออกด้านบนของไซโคลนมาก ทำให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพต่ำในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กในช่วง 0 – 10 ไมครอน ในขณะที่เส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะใช้เวลาอยู่ในบริเวณทรงกรวยและทางออกด้านล่างของไซโคลนมากกว่า ทำให้ไซโคลนมีประสิทธิภาพสูงในการดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ในช่วง 100 – 500 ไมครอน ทั้งนี้การกระจายตัวของอนุภาคมีน้ำหนักร้อยละโดยเฉลี่ยเข้าไซโคลนและหลังการคัดแยกด้วยไซโคลนของอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ร้อยละเฉลี่ยโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่จะมีค่าลดลง เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่มีการหมุนวนที่บริเวณทรงกรวยและทางออกของไซโคลนในเวลาที่มากขึ้นในการวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคบางส่วนอาจเกิดการขัดสีมีขนาดเล็กลงและตกลงสู่ทางออกด้านล่างของไซโคลนด้วย

### 5.เอกสารอ้างอิง

- [1] C.J. Stairmand, The design and performance of cyclone separators, *Trans. Inst.Chem. Eng.* 29 (1951) 356–383.
- [2] M.X. Shi, X.L. Wu, Development of cyclone separation technology, in: G.H.Yang (Ed.), *Collected Works of Petroleum Science and Technology*, University of Petroleum Press, Dongying, Shangdong, China, 1993, pp. 175–191.
- [3] A.C. Hoffmann, L.E. Stein, *Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation*, second ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [4] K. Elsayed, C. Lacor, The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, *Appl. Math. Model.* 35 (2011) 1952–1968.
- [5] วสันต์ ศรีเมือง (2547).การจำลองวิธีระเบียบเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน, *ปริญญานิพนธ์ (วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล)*, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [6] เบญจวรรณ โชคพิพัฒนาผล(2539).การศึกษาและออกแบบไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้, *ปริญญานิพนธ์ (วศ.ม.วิศวกรรมเคมี)*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย