



อุปกรณ์แยกฝุ่นไซโคลนสำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ Cyclone Dust Separator for Laboratory Study

วิโรจน์ เรืองประเทืองสุข¹

ชัยวัฒน์ กันหารี²

เพชร รักถนอม³

บทคัดย่อ

ฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมหรือในกระบวนการทางธรรมชาติ หากไม่มีการควบคุมและการจัดการที่เหมาะสมย่อมส่งผลให้เกิดการฟุ้งกระจายและแขวนลอยในอากาศและอาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์แยกฝุ่นไซโคลนที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยการนำสัดส่วนมิติสำหรับไซโคลนประสิทธิภาพสูงมาประยุกต์กับโมเดลไซโคลนที่มีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนสำหรับการทดสอบและใช้สำหรับการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาโดยใช้อุณหภูมิตัวอย่าง (ทรายบด) ที่คัดแยกเป็นขนาดต่าง ๆ ได้แก่อนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 32, 32-44, 45-124, 125-249, 250-299 และ 300-425 ไมครอน (ความหนาแน่นระหว่าง $2.636 - 2.650 \text{ g/cm}^3$) ใช้อัตราการไหลอากาศอัดคงที่ ณ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ $10.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ อุณหภูมิ $30 \pm 1^\circ\text{C}$ ผลการทดสอบพบว่า ค่าความดันลดคล่อมไซโคลนมีค่าระหว่าง $35.3 - 196.0 \text{ Pa}$ ไซโคลนมีประสิทธิภาพในการเก็บกักอนุภาคขนาดต่าง ๆ สอดคล้องกับมาตรฐานประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาคของไซโคลนประสิทธิภาพสูงตามเส้นโค้งทำนายสัดส่วนประสิทธิภาพของไซโคลนนี้โดยภาวะที่เหมาะสมเพื่อการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (ไม่มีผงอนุภาคบางส่วนตกค้างอยู่บริเวณช่องทางเข้าตัวไซโคลน) คืออัตราการไหลอากาศอัดไม่น้อยกว่า $4.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ และขนาดของอนุภาค (ทรายบด) น้อยกว่า $425.0 \mu\text{m}$ และค่าความดันลดตลอดการศึกษาไม่เกิน 0.0031 บรรยากาศ

คำสำคัญ: ไซโคลน, อุปกรณ์แยกอนุภาค, เครื่องเก็บกักฝุ่น

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² อาจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³ วิศวกร สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา



Abstract

Small particles and dusts generated from industrial process or from natural process, without any proper control or appropriate management, will widely expose and suspense in air and cause pollution. This research work was conducted to evaluate the performance of an inhouse designed and built cyclone dust separator used for test and study in the laboratory at the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Burapha University. The cyclone's dimensions follow the high-efficiency cyclone while the testing equations follow simple models. The particles (grinded sand) were sieved into several size of less than 32, 32-44, 45-124, 125-249, 250-299 and 300-425 microns, respectively, and the constant compressed air flow rates of 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 m³/hr at 30 ± 1 °C were introduced into the cyclone. The test showed that the particles density ranges from 2.636 to 2.650 g/cm³ and the pressure drop across the cyclone were between 19.6 and 313.0 Pa. The cyclone collection efficiency test, under an appropriate condition (without any dust particle trap at the cyclone inlet), showedsatisfactorily agreement with the standard fractional efficiency curve constructed for high performance cyclone. Such conditions were the minimum compressed air flowrate of 4.0 m³/hr and the dust maximum particle size of 425.0 μm while the pressure drop was not exceeded 0.00196 atmospheric pressure.

Keywords: Cyclone, Dust Separator, Dust Collector

บทนำ

ไซโคลน (Cyclone) เป็นเครื่องมือในการแยกสารผสมที่มีความหนาแน่นต่างกัน โดยใช้หลักของแรงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วงที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สร้างและบำรุงรักษาง่าย ใช้ต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับอุปกรณ์อื่น โดยนิยมใช้ไซโคลนเพื่อแยกฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กออกจากอากาศหรือแยกจากก๊าซที่เผาไหม้ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศเพื่อลดมลภาวะเพราะฝุ่นที่มีขนาดเล็กก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำลายเนื้อเยื่อของทางเดินหายใจ โดยเฉพาะปอดที่สำคัญไซโคลนจัดเป็นหนึ่งในบรรดาเครื่องมือที่จำเป็นต้องมีเพื่อการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการของนักศึกษาสาขาวิศวกรรมศาสตร์และบางหลักสูตรที่เกี่ยวข้องทางด้านสุขอนามัยและสิ่งแวดล้อม

องค์ประกอบหลักของไซโคลนประกอบด้วย ท่อนำเข้า ตัวไซโคลนทรงกระบอก ตัวกรวย และ ท่อทางออก โดยหลักการทำงานทั่วไปคืออากาศที่มีฝุ่นผงจะเข้าสู่ไซโคลนและหมุนวนภายในตัวไซโคลนด้วยแรงหนีศูนย์กลาง จากนั้นกระแสอากาศจะหมุนวนต่อไปที่ตัวกรวยและมวล



อากาศจะรวมตัวกันเป็นทรงกระบอกบริเวณแกนกลางของไซโคลนและยกตัวลอยออกจากไซโคลนด้านบนซึ่งมีทิศทางออกอยู่ ณ แกนของตัวไซโคลน การหมุนวนแบบเหวี่ยงดังกล่าวจะทำให้อนุภาคฝุ่นที่ปนมากับอากาศพุ่งปะทะผนังของตัวไซโคลนและตัวกรวยโดยอนุภาคนขนาดใหญ่จะเกิดแรงเหวี่ยงมากกว่าอนุภาคนขนาดเล็ก และในกรณีความเร็วอากาศที่เข้าสู่ไซโคลนเพิ่มขึ้นแรงเหวี่ยงของอนุภาคนขนาดเดียวกันก็จะเกิดแรงเหวี่ยงมากขึ้นด้วยจากนั้นอนุภาคดังกล่าวจะตกสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง

สมรรถนะของอุปกรณ์แยกฝุ่นไซโคลนสามารถประเมินจากประสิทธิภาพในการเก็บกักฝุ่นและความดันลดซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกันเพราะประสิทธิภาพในการเก็บกักฝุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากผู้ใช้งานต้องการคัดแยกอนุภาคฝุ่นตามขนาดและสัดส่วนที่กำหนดภายใต้ค่าใช้จ่ายในการอัดอากาศให้มีแรงดันสูงเพื่อให้เกิดความดันลดตามเป้าหมาย ดังนั้น ในการออกแบบอุปกรณ์แยกฝุ่นไซโคลนจะต้องพิจารณาประสิทธิภาพและความดันลดควบคู่กันไป ในห้วงเวลาที่ผ่านมากลุ่มนักวิจัย (Stairmand, 1951; Lapple, 1951; Iloza and Leith, 1989; Hoffmann and Stein, 2002; Yetilmezsoy, 2005; Oriaku and Agulanna, 2014) ต่างสนใจผลกระทบของขนาดมิติต่าง ๆ ของตัวไซโคลนต่อสมรรถนะการทำงานของไซโคลนและนำเสนอขนาดโครงสร้างไซโคลนต่าง ๆ ที่ให้ความหลากหลายทั้งสมรรถนะการเก็บกักและขนาดของความดันลด ในขณะเดียวกันก็มีกลุ่มนักวิจัยที่มุ่งค้นคว้าและพัฒนาขั้นตอนเพื่อการทำนายความดันลด ซึ่งบ้างก็มีสมการที่ง่ายและสะดวกในการใช้ และบ้างก็เสนอสมการความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน (Shepherd and Lapple, 1939; Alexander, 1949; Stairmand, 1949; First, 1950; Barth, 1956; Casal and Martinez-Benet, 1983; Chen and Shi, 2007; Taiwo, 2016) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยเริ่มนิยมประยุกต์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) เพื่อทำนายสมรรถนะการไหลและความดันลดสำหรับไซโคลน (Xiang, et al., 2001; Elsayed and Lacor, 2010; Elsayed and Lacor, 2011) และในประเทศไทยมีการค้นคว้าวิจัยที่หลากหลายเช่นกัน อาทิ การออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพไซโคลน ไซโคลนสกรับเบอร์ และไฮโดรไซโคลน (สามารถ พรเจริญ, 2541; ฉัตรชัย นิยมล, 2548; ฉัตรชัย นิยมล, 2551; อภิชาติ ศุภจรรยาภิรักษ์ และสุจิต คุรุจิต, 2554; พิชัย สร้อยสนและคณะ, 2557; สันฐิตา รัตนพันธุ์ และคณะ, 2558)

เนื่องจากไซโคลนที่ออกแบบและสร้างนี้จะใช้ประโยชน์สำหรับการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ เราจึงเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วมาประกอบกับไซโคลนที่สร้างขึ้นและเลือกใช้สมการหรือความสัมพันธ์สำหรับประเมินประสิทธิภาพของไซโคลนและความดันลดที่มีรูปแบบสมการง่าย ๆ เพื่อช่วยให้นักศึกษาความเข้าใจหลักการเบื้องต้นของไซโคลน มีทักษะการใช้งานและสามารถนำไปใช้งานได้จริง



วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างและทดสอบประสิทธิภาพของไซโคลนเพื่อใช้สำหรับการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและสร้างไซโคลน

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการออกแบบไซโคลนตามสัดส่วนมิติสำหรับไซโคลนประสิทธิภาพสูง (Stairmand 1951, Swift 1969) โดยมีรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1 แสดงแบบร่างและไซโคลนที่สร้างตามแบบโดยมีส่วนประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ปัมลมขนาด 2.2 kW ความดัน 10 kg/cm^2 มีขนาดถังจุ 50 ลิตรทำหน้าที่อัดอากาศผ่านชุดกรองดักฝุ่นและผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล ก่อนเข้าสู่โรตารีเพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศอัดและพัดพาผงอนุภาคที่จะบรรจุเข้าสู่ตัวไซโคลนโดยมีแมนอมิเตอร์ตรวจวัดความดันตลอดไซโคลนระหว่างปากช่องทางเข้าและท่อทางออกด้านบนของไซโคลน ทั้งนี้ผงอนุภาคจะถูกเก็บกักด้วยภาชนะโลหะที่ประกบพอดีกับส่วนปลายของไซโคลน ณ ทางออกล่าง และส่วนผงอนุภาคที่ไม่สามารถเก็บกักจะหลุดลอยออกทางปลายท่อด้านบนที่เชื่อมโยงกับปล่องทรงกระบอกที่ส่วนปลายสุดมีถุงกรองฝุ่นดักไว้เพื่อป้องกันฝุ่นฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 1 ขนาดและสัดส่วนมิติของไซโคลนที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการศึกษานี้

รายละเอียด, สัญลักษณ์มิติ	สัดส่วนมิติ ⁽¹⁾ (มิติ/D)	การศึกษานี้ (ชม.)	สัดส่วนมิติ ⁽²⁾ (มิติ/D)
1. เส้นผ่านศูนย์กลางตัวไซโคลน (Body diameter), D	1.000	21.60	1.000
2. ความสูงช่องทางเข้า (Height of inlet), H	0.500, 0.440	10.50	0.486
3. ความกว้างช่องทางเข้า (Width of Inlet), W	0.200, 0.210	4.00	0.185
4. เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกบน (Diameter of gas exit), D_e	0.500, 0.400	4.80	0.222
5. ความยาวท่อหากระแสวน (Length of vortex finder), S	0.500	14.50	0.671 ⁽³⁾
6. ความยาวตัวไซโคลน (Length of body), L_b	1.500, 1.400	30.00	1.389



ตารางที่ 1 ขนาดและสัดส่วนมิติของไซโคลนที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการศึกษานี้ (ต่อ)

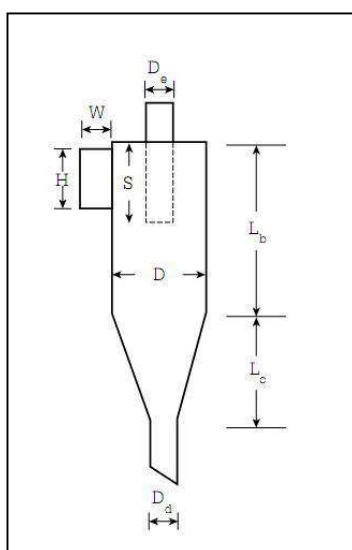
รายละเอียด, สัญลักษณ์มิติ	สัดส่วนมิติ ⁽¹⁾ (มิติ/D)	การศึกษานี้ (ซม.)	สัดส่วนมิติ ⁽²⁾ (มิติ/D)
7. ความยาวกรวย (Length of cone), L_c	2.500	48.60	2.250
8. เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกล่าง (Diameter of dust outlet), D_d	0.375, 0.400	7.40	0.343

หมายเหตุ

(1) ไซโคลนประสิทธิภาพสูง (Stairmand, 1951 และ Swift, 1969)

(2) ไซโคลนสำหรับการศึกษานี้

(3) ระหว่างไซโคลนประสิทธิภาพสูงและไซโคลนกระแสผ่านสูง (Stairmand, 1951) (ระหว่าง 0.500 และ 0.875)



ภาพที่ 1 รายละเอียดของตัวแปรและไซโคลนที่สร้างตามแบบสำหรับการศึกษานี้

สมรรถนะของไซโคลนที่สร้างขึ้นนี้สามารถประเมินจากการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีตามแบบจำลองสำหรับไซโคลนที่สร้างขึ้นโดยทั่วไปจะนิยมทำการทดสอบประสิทธิภาพในการเก็บกักรวม (Over All Collection Efficiency) และทดสอบความดันลด (Pressure Drop) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการคำนวณขนาดตัดอนุภาค (Cut Diameter) มิติของไซโคลนและอัตราการไหลของอากาศที่พัดพาอนุภาคเข้าสู่ไซโคลน เนื่องจากไซโคลนที่สร้างแล้วเสร็จจะนำไปประกอบการเรียนการสอนเพื่อให้นักศึกษามีความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ใน



การนำไปใช้งานต่อไป ดังนั้น เราจะใช้โมเดลที่มีรูปแบบง่าย ใช้สมการที่ไม่ซับซ้อนและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย (Lapple, 1951) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) **ประสิทธิภาพการเก็บกักรวม** เป็นเส้นโค้งมาตรฐานจากการคำนวณประสิทธิภาพการเก็บกักย่อยสำหรับอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่อขนาดตัดอนุภาค ณ ค่าอัตราการไหลของอากาศที่กำหนด (Lapple, 1950) ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นสมการ (Theodore และ DePaola, 1980) เพื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บกักย่อย, η_i แทนเส้นโค้งมาตรฐานเพื่อความสะดวกในการใช้งานดังนี้

$$\eta_i = 1 / [1 + (d_{p,c} / d_{pi})^2] \quad (1)$$

โดยที่ η_i คือ ประสิทธิภาพการเก็บกักย่อยของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i, (d_{pi})$, [-]

$d_{p,c}$ คือ ขนาดตัดอนุภาค, [m]

d_{pi} คือ ขนาดของอนุภาค, [m]

อนึ่ง ขนาดตัดอนุภาคเป็นพารามิเตอร์ที่คำนวณขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของไซโคลอนที่สามารถคัดแยกและเก็บกักอนุภาคไว้ในไซโคลอนด้วยประสิทธิภาพ 50% โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดตัดอนุภาคจะเล็ดลอดสู่บรรยากาศมากกว่า 50 % และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดตัดอนุภาคจะถูกเก็บกักไว้ในไซโคลอน (เก็บกัก ณ ท่อทางออกล่าง) มากกว่า 50 % ทั้งนี้ ขนาดตัดอนุภาคคำนวณได้จากสมการ

$$d_{p,c} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_a)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

โดยที่ μ คือ ความหนืดของอากาศ, [Pa.s]

W คือ ความกว้างช่องทางเข้า, [m]

N_e คือ จำนวนรอบของกระแสวน (Outer Vortex), [-]

V_i คือ ความเร็วของอากาศเข้าสู่ไซโคลอน, [m/s]

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค, [kg/m³]

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, [kg/m³]

โดยทั่วไปจำนวนรอบของกระแสวน, N_e จะมีค่าประมาณ 6 และเมื่อใช้ไซโคลอนตามขนาดมาตรฐานของ Lapple จะสามารถคำนวณได้จาก

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b - \frac{L_c}{2} \right] \quad (3)$$

โดยที่ H คือ ความสูงช่องทางเข้า, [m]

L_b คือ ความยาวตัวไซโคลอน, [m]

L_c คือ ความยาวกรวย, [m]



เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการเก็บกักย่อยที่คำนวณจากสมการ (1) มาพลอต จะได้เส้นโค้งสัดส่วนประสิทธิภาพ (Fractional efficiency curve) หรือเส้นโค้งมาตรฐานสำหรับใช้ทำนายสัดส่วนการเก็บกักอนุภาคที่อัตราส่วนขนาดอนุภาคต่อขนาดตัดอนุภาค โดยขนาดอนุภาคที่ทำให้อัตราส่วนขนาดอนุภาคต่อขนาดตัดอนุภาคลดลง (หรืออนุภาคที่มีขนาดลดลง ณ อัตราการไหลอากาศอัด หรือ ณ ขนาดตัดอนุภาคเดียวกัน) จะมีประสิทธิภาพการเก็บกักย่อยลดลงด้วย สำหรับภาคปฏิบัติเราสามารถคำนวณประสิทธิภาพการเก็บกักรวมได้จากสมการ

$$\eta = \sum_{i=1}^n n_i M_i \quad (4)$$

โดยที่ n_i คือ จำนวนขนาดอนุภาค i ที่ทำการทดลอง

M_i คือ สัดส่วนโดยมวลของการเก็บกักย่อยของอนุภาคขนาด d_{pi} ที่ได้จากการทดลอง

(2)ความดันลด (Pressure Drop) เป็นค่าบ่งชี้ให้ทราบถึงปริมาณพลังงานที่สิ้นเปลืองหรือสูญเสียไปในการขับเคลื่อนอากาศที่พัดพาอนุภาค (ขนาดต่าง ๆ ณ ความเข้มข้นต่าง ๆ) เข้าสู่ไซโคลนเพื่อทำการคัดแยกและเก็บกักไว้ที่ท่อทางออกด้านล่างถ้าความดันลดมากก็จะสิ้นเปลืองพลังงานมาก (แต่ประสิทธิภาพการเก็บกักจะสูงด้วย)ทั้งนี้ พลังงานที่สูญเสียนี้ส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดทานขณะกระแสน้ำอากาศอัดปะทะและหมุนวนตามผนังตัวไซโคลนและผนังกรวยซึ่งทำให้อนุภาคที่มีความมวลมาก (ขนาดใหญ่ ความหนาแน่นสูง) หมุนเวียนแรงขึ้นจนปะทะและประชิดผนังตัวไซโคลนและผนังกรวย และแยกออกจากกระแสน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง(Avci and Karagoz, 2003) นอกจากนี้ พลังงานบางส่วนอาจสูญเสียจากการปรับเปลี่ยนทิศทางของกระแสน้ำอากาศอัดภายในไซโคลนด้วย (Karagoz and Avci, 2005 และ Chen and Shi, 2007) ซึ่งรายละเอียดของรูปแบบความสัมพันธ์เหล่านี้ยังคงต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป อนึ่งที่ผ่านมาจะนิยมใช้สมการความสัมพันธ์กึ่งเชิงประจักษ์ (semi-empirical correlation equation) ในการคำนวณความดันลด (Shepherd and Lapple, 1939 และ Lapple, 1951)ดังนี้

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_a V_i^2 H_v \quad (5)$$

โดยที่ ΔP คือ ค่าความดันลด, [Pa]

H_v คือ จำนวนinlet velocityhead, [-]

ซึ่งคำนวณได้จาก

$$H_v = K \left[\frac{HW}{D_e^2} \right] \quad (6)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16 สำหรับไซโคลนที่มีท่อเข้าตามแนวสัมผัส (tangential inlet)

H คือ ความสูงช่องทางเข้า, [m]

W คือ ความกว้างช่องทางเข้า, [m]

D_e คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกบน, [m]



อนุภาคตัวอย่างและขั้นตอนการทดลอง

อนุภาคตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้จะใช้ทรายที่บดและคัดแยกเป็นขนาดต่าง ๆ และวัดความหนาแน่น ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับขั้นตอนการทดลอง จะดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เปิดปั๊มลมและปรับอัตราการไหลอากาศอัดเท่ากับ 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จดบันทึกค่าอุณหภูมิและค่าความดันลดคล่อมไซโคลน
2. ทอยยบรจอนุภาคตัวอย่างขนาดน้อยกว่า 32 ไมครอน จำนวน 50.00 กรัม โดยใช้เวลาประมาณ 150 วินาที
3. รอประมาณ 2 นาที จึงเก็บผงอนุภาคตัวอย่างจากทางออกล่างซึ่งน้ำหนักและบันทึกค่า
4. ทดลองซ้ำตามข้อ 1. -3. รวมจำนวน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของผงอนุภาคตัวอย่างและคำนวณร้อยละของการเก็บกักอนุภาคโดยมวลซึ่งได้จาก (ค่าเฉลี่ยของมวลอนุภาคตัวอย่างที่เก็บกักได้/มวลของอนุภาคที่บรรจุ) $\times 100$
5. ทดลองซ้ำตามข้อ 1. - 4. โดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคตัวอย่างเป็นช่วงขนาด 32-44, 45-124, 125-249, 250-299 และ 300-425 ไมครอน ตามลำดับ
6. ทดลองซ้ำตามข้อ 1. - 5. โดยเปลี่ยนอัตราการไหล เป็น 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ผลการวิจัย

จากการทดลองดังกล่าวข้างต้น เมื่อดำเนินการตามข้อ 1. อุณหภูมิห้องมีค่าเฉลี่ย $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และค่าความดันลดคล่อมไซโคลน ณ อัตราการไหลอากาศอัดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 สำหรับตารางที่ 4 แสดงค่าขนาดตัดอนุภาคจากการคำนวณตามสมการ (2) และร้อยละของการเก็บกักอนุภาคโดยมวล ณ อัตราการไหลอากาศอัดต่าง ๆ จากการทดลองข้อ 4. โดยที่อัตราการไหลอากาศอัด $1.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ จะทำการทดลองที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 16.0, 38.0, และ $59.5 \mu\text{m}$ เท่านั้น สำหรับขนาดอนุภาคเฉลี่ยตั้งแต่ $99.5 \mu\text{m}$ ขึ้นไปจะไม่ได้ทำการทดลองเนื่องจากอนุภาคจะตกค้างอยู่บริเวณช่องทางเข้าไซโคลนเป็นจำนวนมากเพราะอัตราการไหลอากาศอัดไม่มากพอที่จะพัดพาอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีมวลมากเข้าสู่ตัวไซโคลนได้ทั้งหมด



ตารางที่ 2 ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคตัวอย่างจากการทดลอง

ขนาดอนุภาค (μm)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(μm)	ความหนาแน่น (g/cc)
น้อยกว่า 32	16.0	2.650
32-44	38.0	2.650
45-74	59.5	2.650
75-124	99.5	2.650
125-249	187.0	2.645
250-299	274.5	2.640
300-424	362.0	2.636

ตารางที่ 3 ความดันลด ณ อัตราการไหลลมอัดต่าง ๆ

อัตราการไหลอากาศอัด (m^3/hr)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
ความดันลด (mmH_2O)	3.6	3.8	4.4	5.0	6.0	7.8	10.3	13.2	16.2	20.0

ตารางที่ 4 ขนาดตัดอนุภาคจากการคำนวณและร้อยละของการเก็บกักอนุภาคฝุ่นโดยมวล ณ อัตราการไหลลมอัดต่าง ๆ

อัตราการไหลลมอัด, Q (m^3/hr)	ขนาดตัดอนุภาคจากการคำนวณ, $d_{p,c}$ (μm)	ร้อยละของการเก็บกักอนุภาคโดยมวล, ($\eta_i \times 100$) ณ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)						
		16.0	38.0	59.5	99.5	187.0	274.5	362.0
1.0	34.3	12.21	49.70	30.25 ⁽¹⁾	-	-	-	-
2.0	24.3	28.17	66.31 ⁽¹⁾	40.48 ⁽¹⁾	15.09 ⁽¹⁾	14.72 ⁽¹⁾	14.94 ⁽¹⁾	10.24 ⁽¹⁾
3.0	19.8	36.35	74.78	84.84	75.23 ⁽¹⁾	21.73 ⁽¹⁾	17.56 ⁽¹⁾	16.75 ⁽¹⁾
4.0	17.2	41.51	81.84	91.00	92.12	85.97	89.07	91.67
6.0	14.1	53.51	87.53	92.27	95.95	94.04	95.20	97.09
8.0	12.2	59.51	89.78	94.67	96.01	97.13	96.97	97.95
10.0	10.9	65.51	90.07	95.11	97.14	98.14	97.93	98.68

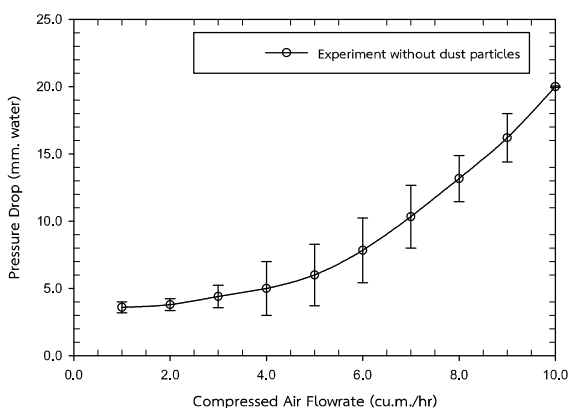
หมายเหตุ

⁽¹⁾ มีอนุภาคบางส่วนตกค้างอยู่บริเวณช่องทางเข้าไซโคลน

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของความดันลดต่อไซโคลน ณ อัตราการไหลอากาศอัดค่าต่าง ๆ จากผลการทดลองตามตารางที่ 3 โดยเส้นโค้งในภาพนี้จะสอดคล้องกับสมการ (5) ซึ่งบ่งชี้ว่าความดันลดจะแปรผันกับ $V_i^2 = \left(\frac{Q}{HW}\right)^2$ หากแต่มีค่าจุดตัด ณ แกน y ที่มากกว่าศูนย์



อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีการนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการ เราจะใช้อัตราการไหลอากาศอัดที่มีค่าสูงกว่า $4.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งจะนำเสนอต่อไป อนึ่งค่าความดันลดคล่อมไซโคลนในช่วงการทดลองระหว่างอัตราการไหลอากาศอัด $4.0\text{--}10.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ จะมีค่าความดันลดระหว่าง $35.3\text{--}196.0 \text{ Pa}$ หรือไม่เกิน 0.00196 บรรยากาศ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลอากาศอัด

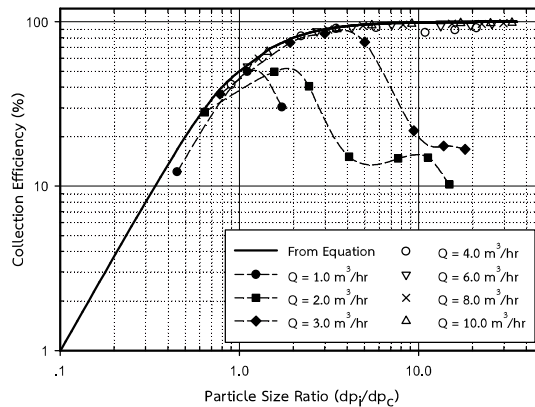
ภาพที่ 3 แสดงเส้นโค้งมาตรฐานของไซโคลนที่สร้างขึ้นซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาค ณ อัตราส่วนขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อขนาดตัดอนุภาคตามสมการ (1) โดยใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคตัวอย่างตามตารางที่ 2 และขนาดตัดอนุภาคที่คำนวณจากสมการ (2) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะสำหรับไซโคลนที่สร้างและทำการทดลองตามอัตราการไหลอากาศอัดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 โดยเส้นโค้งนี้สามารถใช้อ้างอิงกับการทดสอบต่าง ๆ ได้ในภายหลังหรือนำไปใช้คัดแยกและเก็บกักอนุภาคตามขนาดที่กำหนด เช่น กรณีจะคัดแยกเก็บกักผงอนุภาคขนาดที่กำหนด $X_1 \mu\text{m}$ ไม่น้อยกว่า 90% จะมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกตำแหน่งบนเส้นโค้งมาตรฐานที่มีค่าประสิทธิภาพการเก็บกักไม่น้อยกว่า 90% (ค่า y) และอ่านค่าอัตราส่วนขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อขนาดตัดอนุภาค (ค่า x) ได้ค่า อัตราส่วนที่ Ratio_{90}

2. เนื่องจากทราบค่าขนาดอนุภาคที่กำหนด $X_1 \mu\text{m}$ จึงสามารถคำนวณขนาดตัดอนุภาคได้เท่ากับ $(X_1/\text{Ratio}_{90}) \mu\text{m}$

3. จากค่าขนาดตัดอนุภาค $(X_1/\text{Ratio}_{90}) \mu\text{m}$ ที่ได้ใช้สมการ (2) คำนวณค่าความเร็วของอากาศอัด

4. นำค่าความเร็วอากาศอัดตามข้อ 3. มาคูณด้วย HW (พื้นที่หน้าตัดช่องทางเข้าตัวไซโคลน) จะได้อัตราการไหลอากาศอัดขั้นต่ำได้



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาค ณ อัตราส่วนขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อขนาดตัดอนุภาคต่าง ๆ

นอกจากเส้นโค้งมาตรฐานแล้ว ภาพที่ 3 ได้แสดงค่าร้อยละของการเก็บกักอนุภาคโดยมวลที่ได้จากการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 ณ อัตราการไหลอากาศอัดคงที่ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 m³/hr ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลอากาศอัดคงที่ 1.0, 2.0, และ 3.0 m³/hr จะมีเส้นโค้งแบบประชิดมโยร้อยละของการเก็บกักอนุภาคโดยมวลและเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ขึ้นพบว่า ณ อัตราการไหลอากาศอัด 3.0 m³/hr หรือต่ำกว่าไซโคลนจะสามารถเก็บกักเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีอนุภาคตกค้างอยู่บริเวณช่องทางเข้าไซโคลน (ดังระบุในตารางที่ 4) ทำให้ประสิทธิภาพการเก็บกักมีค่าเปี่ยงเบนจากเส้นโค้งมาตรฐานโดยขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นค่าเปี่ยงเบน (ร้อยละของอนุภาคที่ตกค้างอยู่บริเวณช่องทางเข้าไซโคลน) จะเพิ่มขึ้นด้วยตามเส้นโค้งแบบประที่แสดงในภาพที่ 3

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บกัก ณ อัตราการไหลอากาศอัดตั้งแต่ 4.0 m³/hr ขึ้นไป จะไม่พบอนุภาคตกค้างอยู่บริเวณช่องทางเข้าไซโคลน (สำหรับการศึกษานี้) อาจเป็นเพราะอัตราการไหลอากาศอัดตั้งแต่ 4.0 m³/hr มีความแรงเพียงพอในการพัฒนาอนุภาคตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (ขนาดน้อยกว่า 425.0 μm) เข้าสู่ตัวไซโคลนได้ โดยเมื่อนำข้อมูลร้อยละของการเก็บกักอนุภาคโดยมวลจากตารางที่ 4 มาพลอตในภาพที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพการเก็บกักมีค่าใกล้เคียงกับเส้นโค้งมาตรฐาน ดังนั้น การทดลองของนักศึกษาในห้องปฏิบัติการที่ใช้ไซโคลนที่สร้างขึ้นนี้ จำเป็นต้องใช้อัตราการไหลอากาศอัดไม่น้อยกว่า 4.0 m³/hr และขนาดของอนุภาค (ทรายบด) ต้องมีขนาดน้อยกว่า 425.0 μm อนึ่ง สำหรับกรณี que เลือกใช้อนุภาคอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ทรายบด (อนุภาคมีความหนาแน่นแตกต่างจากการศึกษานี้) ผู้วิจัยแนะนำให้ต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บกัก ตามขั้นตอนการทดลองข้างต้น เพื่อสร้างเส้นโค้งมาตรฐาน จากนั้นทำการการศึกษาเพื่อกำหนดอัตราการไหลอากาศอัดขั้นต่ำและขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดเพื่อป้องกันปัญหาจากการตกค้างของอนุภาคขนาดใหญ่บริเวณช่องทางเข้าไซโคลน



การวิจัยครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อการออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะของไซโคลน (ประสิทธิภาพการเก็บกักผงอนุภาคและความดันลด) เพื่อใช้เป็นบทเรียนในห้องปฏิบัติการของ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ดังนั้น วัสดุอุปกรณ์รวมถึงเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจะมุ่งเน้นเพื่อการ สร้างความเข้าใจในหลักการทำงานของไซโคลนเท่านั้น โดยจะเน้นให้ใช้เครื่องมือแบบง่าย ๆ และ สมการที่เกี่ยวข้องก็เป็นรูปแบบง่าย ๆ เพื่อให้ นักศึกษามีความเข้าใจในหลักการ มีทักษะการ ปฏิบัติ และสามารถนำไปประยุกต์กับงานที่เกี่ยวข้องได้ จากรายละเอียดการศึกษาข้างต้น จะสรุปได้ดังนี้

2. ไส้โคลนที่สร้างขึ้นมีข้อจำกัดของช่วงการใช้งาน(ซึ่งเป็นปกติ) โดยสามารถใช้งานได้สำหรับอัตราการไหลอากาศอัดไม่น้อยกว่า 4.0 m³/hr และขนาดของอนุภาค (ทรายบด) น้อยกว่า 425.0 μm ทั้งนี้ข้อมูลของขอบเขตหรือข้อจำกัดการใช้งานจะตรวจสอบได้ด้วยการทดสอบประสิทธิภาพ โดยตัวไส้โคลนต้นแบบ ควรออกแบบให้สามารถถอดและประกอบส่วนต่าง ๆ ได้ง่าย

ข้อสังเกตจากตัวไฮโคลนที่สร้างขึ้นนี้คือสัดส่วนมิติของเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกบน (Diameter of gas exit), D_e มีขนาดเล็กกว่ามาตรฐาน (สัดส่วนมิติเพียง 0.222 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน 0.500 หรือ 0.400 ในตารางที่ 1) จึงมีประสิทธิภาพการเก็บกักเพิ่มขึ้น (แต่ก็เพิ่มความดันลด) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเพื่อเพิ่มสมรรถนะของไฮโคลนด้วยการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกบน (El-Batsh, 2013) ซึ่งพบว่า การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกบนจะเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกับรวมแต่ก็จะเป็นการเพิ่มความดันลด ในขณะที่ความยาวท่อหากระแสวน (S) ไม่กระทบต่อความดันลด



เอกสารอ้างอิง

- ฉัตรชัย นิยมล. (2548). การออกแบบไซโคลนดักฝุ่นเพื่อการควบคุมภาวะทางอากาศ. **เทคนิคเครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม**. 21 (244) 1-11.
- ฉัตรชัย นิยมล. (2551). ระบบกำจัดฝุ่นและการระบายอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- พิชัย สร้อยสน ประธาน วงศ์ศรีเวช และธนิต สวัสดิ์เสวี. (2557). ผลของอัตราส่วนการไหลและอัตราส่วนความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนขนาด 100 มิลลิเมตร. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 37 (4) 417-427.
- สัณฐิตา รัตนพันธุ์ ธนิต สวัสดิ์เสวีพิชัย สร้อยสน และประธาน วงศ์ศรีเวช. (2558). ผลของของความยาววอร์เท็กซ์เพเดอร์และแบบจำลองการถดถอยของอัตราส่วนการไหลของน้ำกับความยาวทรงกระบอกและความยาวกรวยของไฮโดรไซโคลน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 38 (1) 87-100.
- สามารถ พรเจริญ. (2546). การจับเก็บฝุ่นขนาดเล็กด้วยไซโคลนสกรับเบอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อภิชาติ ศุภจรรยาภิรักษ์ และสุดจิต ครุจิต. (2554). การพัฒนาไซโคลนสกรับเบอร์สำหรับเตาเผามูลฝอยขนาดเล็ก. **วารสารวิจัย มข**. 16 (7) 802-812.
- Alexander, R. M. (1949). Fundamentals of cyclone design and operation, **Proceedings of Australian Institute of Mining and Metallurgy**. 152: 203-228.
- Avci, A., Karagoz, I. (2003). Effect of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. **Aerosol Science**. 34: 937-955.
- Barth, W. (1956). Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations, **Brennst-Warme-Kraft**. 8: 1-9.
- Casal, J., Martinez-Benet, J. M. (1983). A better way to calculate cyclone pressure drop. **Chem. Eng. N. Y**. 99: 100-111.
- Chen, J., Shi, M. (2007). A universal model to calculate cyclone pressure drop. **Powder Tech**. 171: 184-191.
- El-Batsh, H. M. (2013). Improving cyclone performance by proper selection of exit pipe, **Appl. Math. Model**. 37: 5286-5303
- Elsayed, K., Lacor, C. (2010). Optimization of cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical model and CFD simulations, **Chem. Eng. Sci**. 65: 6048-6058.



- Elsayed, K., Lacor, C. (2011). The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, **Appl. Math. Model.** 35: 1952-1968.
- First, M. W. (1950). **Fundamental Factors in the Design of Cyclone Dust Collectors.** Ph.D Thesis, Harvard University.
- Hoffmann, A. C., Stein, L. E. (2002). **Gas Cyclone and Swirl Tubes: Principle, Design, and Operation,** Springer, Berlin, Germany.
- loza, D. L., Leith, D. (1989). Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency, **Aerosol Sci. Tech.** 10: 491-500.
- Kaeagoz, I., Avci, A. (2005). Modelling of pressure drop in tangential inlet cyclone separators. **Aerosol Sci. and Tech.** 39: 857-865.
- Lapple, C. E. (1950). Gravity and centrifugal separation. **Ind. Hyg. Quart.** 11: 40-48.
- Lapple, C.E. (1951). Processes use many collection types, **Chem. Eng.** 58: 144-51.
- Oriaku, E. C., Agulanna, C. N., Edeh, C. J., Adiele, I. D. (2014). Correlation between entry velocity, pressuredrop and collection efficiency in a designed Stairmands' cyclone. **American J. Eng. Research.** 3 (6): 120-126.
- Sheperd, G. B., Lapple, C. E. (1939). Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors. **Industrial and Engineering Chem. Res.** 31: 972-984.
- Stairmand, C. J. (1949). Pressure drop in cyclone separators, **Eng. Lond.** 168: 409-411.
- Stairmand, C. J. (1951). The design and performance of cyclone separators. **Trans. Instn. Chem. Engrs.** 29: 356-383.
- Swift, P. (1969). Dust control in industry. **Steam Heating Engineering.** 38: 453-456.
- Taiwo, M. I., Namadi, M. A. James, B. M. (2016). Design and analysis of cyclone dust separator. **American J. Eng. Research.** 5 (4): 130-134.
- Theodore, L., De Paola, V. (1980). Predicting cyclone efficiency. **J. Air Pollut. Control Assoc.** 30 (10): 1132-1133.
- Xiang, R., Park, S. H., Lee, K. W. (2001). Effect of cone dimension on cyclone performance, **J. Aerosol Sci.** 32: 549-561.
- Yetilmezsoy, K. (2005). Optimization using prediction models: air cyclones' body diameter/pressure drop, **Filtr. Sep.** 42: 32-35.