

บทความ: “ไซโคลน” เครื่องมือคัดแยกฝุ่นใน

ภาคอุตสาหกรรม

รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail: ratchanon.p@chula.ac.th

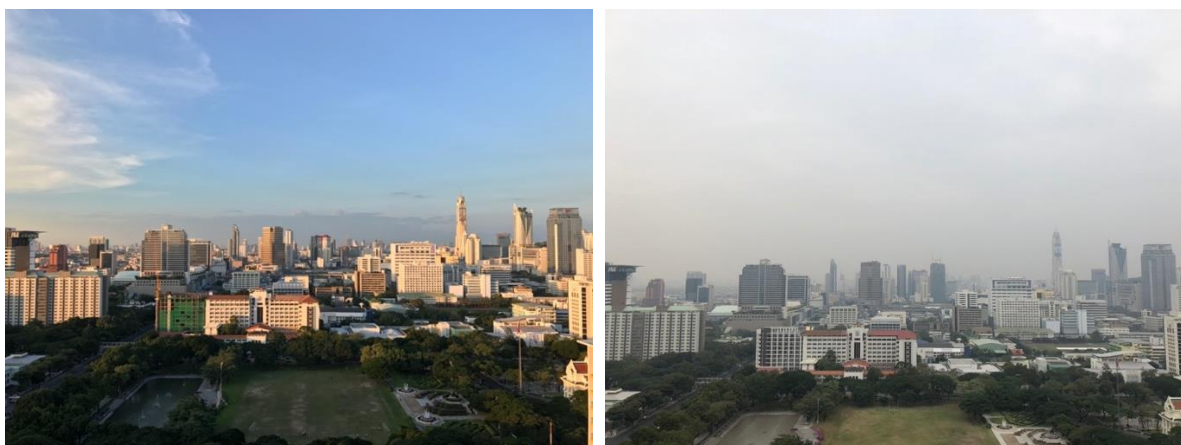
การอ้างอิง: รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง. (2563). “ไซโคลน” เครื่องมือคัดแยกฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม, วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 24 (ฉบับที่ 4).

บทนำ

ปัญหามลพิษทางอากาศของละอองฝุ่นขนาดเล็ก (particulate matter, PM) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน หรือ PM₁₀ ไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน หรือ PM_{2.5} เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากในประเทศไทยในช่วงปีที่ผ่านมา (รูปที่ 1 มลพิษทางอากาศในกรุงเทพมหานคร ปี 2562) ฝุ่นละอองเหล่านี้สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและส่งผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชาชน (Jan, Roy, Yadav, & Satsangi, 2017) โดยเฉพาะโรคเรื้อรังในระบบทางเดินหายใจ เช่น หอบหืด ภาวะถุงลมโป่งพอง และโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง เป็นต้น (Xing, Xu, Shi, & Lian, 2016) แหล่งกำเนิดฝุ่นที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทยแบ่งตามขนาดของละอองฝุ่น คือ ละอองฝุ่นขนาดเล็กที่พบได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในยานพาหนะ และการเผาไหม้ชีวมวล ส่วนละอองฝุ่นขนาดใหญ่มักพบได้จากการก่อสร้างอาคารและการพัฒนาของดิน (Chuersuwan, Nimrat, Lekphet, & Kerdkumrai, 2008; Wimolwattanapun, Hopke, & Pongkiatkul, 2011)

นอกจากนี้ กิจกรรมในภาคอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงชีวภาพ ล้วนแล้วแต่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นด้วยกันทั้งสิ้น ดังนั้น กระทรวงอุตสาหกรรมจึงมีแนวทางและกฎหมายกำกับดูแลและควบคุม โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. ๒๕๔๘, 2006) ให้มีค่าฝุ่นละอองทั้งหมดที่เกิดจากหม้อไอน้ำไม่เกิน 240-320 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือจากกระบวนการผลิตไม่เกิน 320-400 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตว่ามีการเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือไม่ ส่งผลทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องติดตั้งอุปกรณ์ในการคัดแยกละอองฝุ่นเพื่อดักจับฝุ่นก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ โดยมีหลักการและปัจจัยในการเลือกใช้งาน เช่น ประสิทธิภาพในการคัดแยก ขนาดของละอองฝุ่นที่สามารถคัดแยก ต้นทุนของเครื่องคัดแยก และพลังงานที่ใช้ในการคัดแยก เป็นต้น อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ แผ่นกรองอนุภาค (filters) เครื่องคัดแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitators) เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบเปียก (wet separators) และไซโคลน

(cyclones) อุปกรณ์แต่ละชนิดมีช่วงการตัดแยกขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ตารางที่ 1 แสดงช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและประสิทธิภาพในการตัดแยกของอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 1 สถานการณ์ฝุ่น PM10 และ PM2.5 ในเขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร ในช่วงเวลาที่มีค่าปริมาณฝุ่น (ซ้าย) ภายในเกณฑ์มาตรฐาน (ขวา) สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

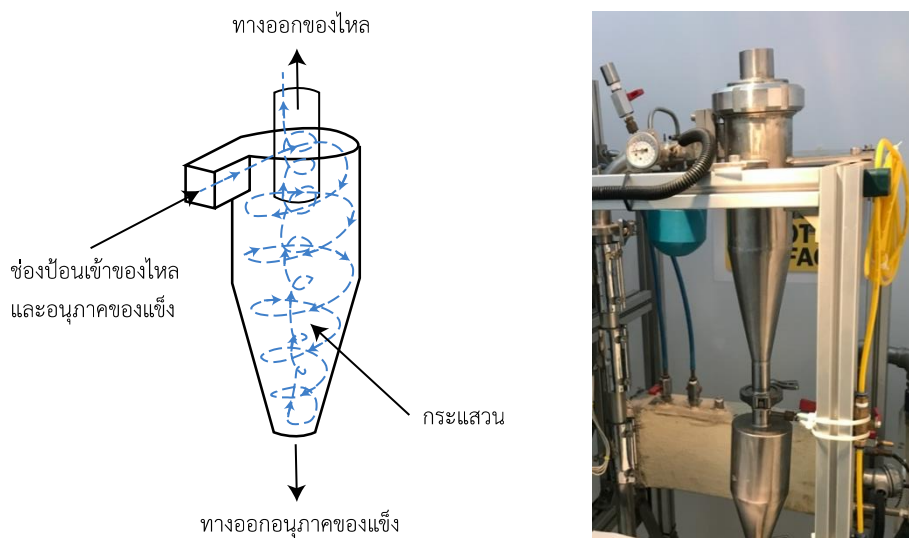
ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพในการตัดแยกอนุภาคของอุปกรณ์ต่าง ๆ (Rhodes, 2008)

อุปกรณ์	ช่วงขนาดอนุภาคในการตัดแยกที่เหมาะสม (ไมครอน)	ประสิทธิภาพในการตัดแยก (%)
แผ่นกรอง	0.1-2.0	80-99
เครื่องตัดแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต	0.2-10.0	55-99
เครื่องตัดแยกอนุภาคแบบเปียก	0.2-50.0	10-99
ไซโคลอน	0.5-100.0	1-99

เนื่องจากไซโคลอนมีการใช้พลังงานที่ต่ำ และเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน จึงทำให้ไซโคลอนได้รับความนิยมในการติดตั้งเพื่อตัดแยกฝุ่น หากพิจารณาจากข้อมูลในตารางที่ 1 ไซโคลอนสามารถใช้แยกฝุ่นได้ดีในช่วงกว้าง แต่ประสิทธิภาพในการแยกมีช่วงกว้างตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 99 ทั้งนี้ การเลือกใช้รูปแบบของไซโคลอนรวมถึงภาวะดำเนินการของไซโคลอนที่เหมาะสม จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการตัดแยกที่ต้องการ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของไซโคลอน บทความนี้จึงได้นำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับไซโคลอน ที่พบได้มากในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการเกษตร และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานไซโคลอนที่เหมาะสม

ทำความรู้จักกับไซโคลน

ไซโคลนเป็นเครื่องมือคัดแยกอนุภาคของแข็ง (ละอองฝุ่น) ออกจากของไหล (ของเหลว หรือ ก๊าซ) โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rhodes, 2008) ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ตำแหน่งทางเข้าของไซโคลน อนุภาคของแข็งที่ผสมกับของไหลจะถูกป้อนเข้ามา โดยอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ไปตามผนังของไซโคลนที่เป็นรูปทรงกระบอก ทำให้เกิดไหลแบบหมุนวน และ ก่อตัวเป็นกระแสมหมุนวน (vortex) ขณะที่อนุภาคของแข็งถูกเหวี่ยงอยู่ในกระแสมหมุนวนจะเกิดแรงในแนวสัมผัส (tangential force) ที่จะผลักให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนตัวออกจากศูนย์กลางกระแสมออกสู่ผนังไซโคลน ด้านล่างของไซโคลนที่ลักษณะเป็นทรงกรวยที่ปลายทางออกมีลักษณะบีบเข้า ทำให้กระแสมมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลสวนทางย้อนกลับขึ้นด้านบน ด้วยความต่างของความหนาแน่นของของไหลและอนุภาคของแข็ง จึงทำให้อนุภาคของแข็งถูกผลักลงสู่ทางออกทางด้านล่าง และของไหลที่ปราศจากอนุภาคของแข็งจึงไหลออกที่ทางออกด้านบนของไซโคลน



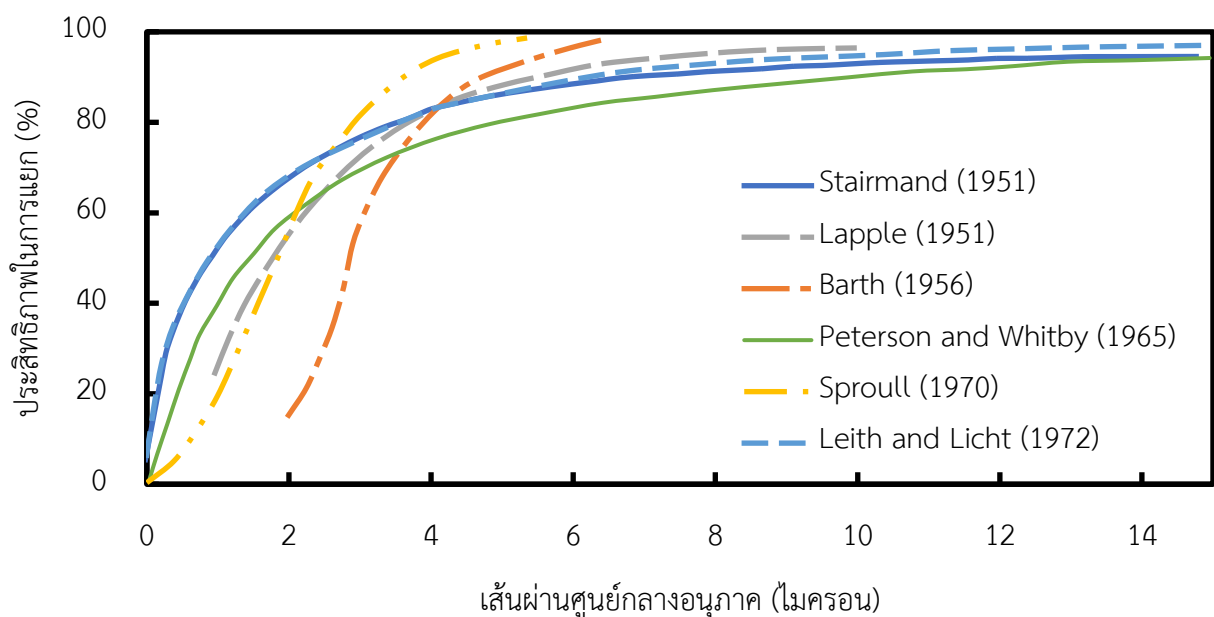
รูปที่ 2 (ซ้าย) รูปแบบการไหลภายในไซโคลน (ขวา) ไซโคลน Lapple

ไซโคลนรูปแบบต่างๆ

การออกแบบไซโคลนในปัจจุบัน มักคำนึงถึงการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การใช้งานที่เน้นประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคสูง (high efficiency cyclone) ไซโคลนประเภทนี้มักจะมีขนาดเล็กที่เน้นในการแยกอนุภาคของแข็งให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็ต้องใช้พลังงานสูงในการดำเนินการ ด้วยข้อจำกัดในด้านอัตราการไหลของของไหลที่อุปกรณ์สามารถรับได้ เช่น ไซโคลน Stairmand ไซโคลน Peterson และ Whitby ไซโคลน Leith and Licht และไซโคลน Lapple จึงทำให้มีไซโคลนอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งจะเน้นที่ปริมาณในการคัดแยกหรืออัตราการไหลที่สูง (high flowrate cyclone) ตัวไซโคลนมักมีขนาดใหญ่กว่า จึงทำให้สามารถรับรองอัตราการไหลที่สูงขึ้นแต่ก็แลกมากับประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ต่ำลง เช่น ไซโคลน Sproull และ ไซโคลน Barth ไซโคลนแต่ละชนิดที่กล่าวมาข้างต้นมีโครงสร้างหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้ ไซโคลนแต่ละ

ชนิดจะมีความแตกต่างกันที่สัดส่วนท่อทรงกระบอก ท่อทรงกรวย ความยาวของตัวไซโคลน ช่องป้อนเข้าของไหล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นต้น

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า อนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่ไซโคลน Stairmand สามารถแยกอนุภาคได้ คือ ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 ไมครอน โดยมีประสิทธิภาพในการแยกร้อยละ 60 ถึง 70 เท่านั้น วิศวกรจึงพยายามออกแบบไซโคลนให้สามารถคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กได้ดียิ่งขึ้น (Juengcharoensukying, Poochinda, & Chalermssinsuwan, 2017; Piemjaiswang, Ratanathamman, Kunchonthara, Piumsombon, & Chalermssinsuwan, 2016) นอกจากนี้ยังมีวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกให้สูงขึ้น คือการต่อไซโคลนมากกว่า 1 ตัวเข้าด้วยกัน ในรูปแบบอนุกรมและแบบขนาน ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแล้วยังช่วยให้สามารถคัดแยกได้ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการแยกของไซโคลนประเภทต่างๆ

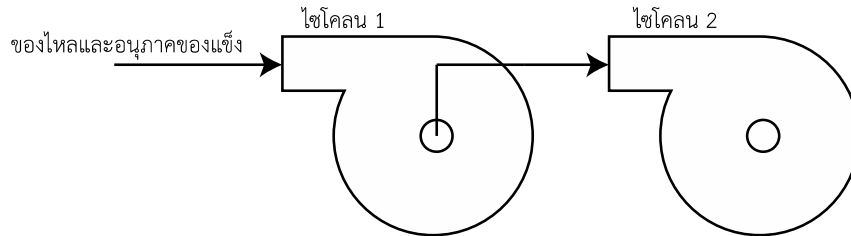
ที่มา: Leith & Mehta, 1973

ทำอย่างไรให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงขึ้นแต่ยังคงคัดแยกได้ในปริมาณที่สูง

1. การต่อไซโคลนแบบอนุกรม

การต่อไซโคลนแบบอนุกรมจะทำการป้อนเข้าของไหลและอนุภาคของแข็งที่ไซโคลนตัวที่หนึ่ง หลังจากเกิดการคัดแยกอนุภาค ของแข็งที่ไม่สามารถคัดแยกได้ด้วยไซโคลนตัวแรก จะถูกส่งต่อเข้าสู่ไซโคลนตัวที่สอง ดังแสดงใน รูปที่ 4 เพื่อทำการคัดแยกอีกครั้งจนได้ประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ต้องการเมื่อทำการเปรียบเทียบการคัดแยกด้วยอุปกรณ์ไซโคลนตัวเดียวและอุปกรณ์ไซโคลนสองตัวแบบต่ออนุกรม พบว่า ความดันลดในระบบที่ใช้อุปกรณ์ตัวเดียวมีค่าสูงกว่าไซโคลนตัวแรกแบบต่ออนุกรม (Whitelock & Buser, 2007) โดยไซโคลนตัวแรกจะเสมือนเป็นการคัดกรองอนุภาคแบบ

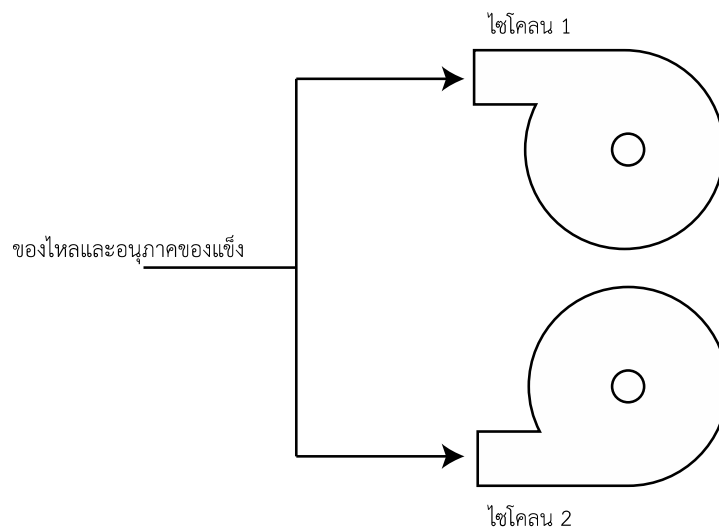
หยابที่เน้นการดักจับอนุภาคของแข็งปริมาณมาก และไซโคลนตัวที่สอง ทำหน้าที่ในการขจัดแยกอนุภาคแบบละเอียดอีกครั้ง จึงสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการคัดแยกโดยรวมนั้นสูงกว่าการใช้อุปกรณ์ไซโคลนเพียงตัวเดียว



รูปที่ 4 การต่อไซโคลนแบบอนุกรม

2. การต่อไซโคลนแบบขนาน

การต่อไซโคลนแบบขนาน ของไหลและอนุภาคของแข็งจะถูกแบ่งออกไปป้อนเข้าสู่ไซโคลนทั้งสองตัวพร้อมกันในรูปแบบการต่อแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 5 การต่อแบบขนานนั้นให้ประสิทธิภาพในการแยกได้ดีเมื่อเทียบกับการใช้แบบตัวเดียวโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเร็วในการป้อนเข้าของของไหลสูง ดังนั้นการต่อแบบขนานจึงเหมาะกับการเพิ่มขีดจำกัดความสามารถในการรองรับอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (Liu, Chen, Zhang, Wang, & Dong, 2014) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการต่อไซโคลนแบบขนาน คือ การรักษากระแสสวนภายในไซโคลนทั้งสองตัว และการแบ่งอัตราการไหลป้อนเข้าให้เท่ากัน



รูปที่ 5 การต่อไซโคลนแบบขนาน

นอกจากรูปแบบการต่อไฮโคลนแบบอนุกรมและแบบขนานแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโคลนอีกมากมาย ตัวอย่างที่พบได้มากในการใช้งานไฮโคลนในกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณของแข็งในระบบ การแตกหักของอนุภาคของแข็ง และระบบลำเลียงของแข็ง เป็นต้น

ปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยก

1. ปริมาณของแข็งในระบบ

สำหรับระบบที่มีปริมาณของแข็งในตัวกลางมาก จะทำให้อนุภาคมีโอกาสสัมผัสกันและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้สามารถแยกได้ดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม การมีอนุภาคของแข็งมากเกินไป อาจจะทำให้ไฮโคลนอุดตัน ทำให้ความดันลด (pressure drop) ของไฮโคลนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงได้ อย่างไรก็ตาม การอุดตันของไฮโคลน อาจเกิดจากปัญหาทางการก่อสร้างของไฮโคลนอื่น เช่น รอยต่อรอยเชื่อมของตัวไฮโคลน หรือ ขนาดที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น

2. การแตกหักของอนุภาคของแข็ง

การแตกของอนุภาคของแข็งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยก การแตกของอนุภาคมักเกี่ยวข้องกับสมบัติของตัวอนุภาค พบได้มากในระบบที่มีการหมุนเวียนของของแข็งซึ่งมีการแยกอนุภาคที่บริเวณทางออกของระบบด้วยไฮโคลน เพื่อนำของแข็งกลับมาป้อนเข้าในเครื่องปฏิกรณ์อีกครั้ง เมื่อระบบดำเนินการไประยะเวลาหนึ่ง อนุภาคมีการชนกันเอง หรือชนกับผนัง จึงทำให้อนุภาคเกิดการแตกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกของไฮโคลนลดลง

3. ความชื้นในตัวกลาง

ความชื้นในตัวกลางส่งผลต่อการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ กลุ่มก้อนอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะทำให้สามารถแยกได้ดีขึ้น แต่ในการดำเนินการจริงนั้น ความชื้นอาจทำให้เกิดการสะสมและเกาะติดของอนุภาคบริเวณขอบผนังของไฮโคลน ส่งผลให้เกิดการอุดตัน และทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง

4. ระบบลำเลียงของแข็ง

ระบบลำเลียงของแข็งออกจากไฮโคลน ในการใช้งานภายใต้สภาวะปกติที่มีการใช้ความดันในระบบ หากเกิดการรั่วของระบบลำเลียงเพียงเล็กน้อยอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกมากนัก แต่อาจทำให้สูญเสียผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการและปลดปล่อยอนุภาคออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในกรณีที่ระบบดำเนินการภายใต้สภาวะสุญญากาศการที่ระบบลำเลียงมีรอยรั่วจะทำให้ความดันจากภายนอกไหลย้อนกลับเข้าสู่ภายในระบบส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

ไซโคลนในชีวิตประจำวัน

ในอดีตที่ผ่านมา ไซโคลนมักถูกใช้เป็นอุปกรณ์การแยกหลักในภาคอุตสาหกรรม แต่ในปัจจุบัน ได้มีการประยุกต์ใช้หลักการทำงานของไซโคลนในอุปกรณ์ในครัวเรือนมากยิ่งขึ้น เช่น เครื่องดูดฝุ่น (รูปที่ 6) โดยทั่วไปหากใช้เครื่องดูดฝุ่นไปสักระยะหนึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนหรือชำระล้างถุงเก็บฝุ่น (filter/bag) จึงทำให้เครื่องดูดฝุ่นแบบดั้งเดิมมีขนาดใหญ่ อีกทั้งความสามารถในการดูดฝุ่นจะลดลงเมื่อถุงกรองนั้นใกล้เต็มหรืออุดตัน ดังนั้นการใช้ไซโคลนในการคัดแยกอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กออกจากอากาศที่ดูดเข้าไปก่อนทำการกักเก็บในภาชนะที่ออกแบบมากับตัวเครื่อง ส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องใช้ถุงเก็บฝุ่นอีกต่อไป เครื่องดูดฝุ่นในปัจจุบันจึงมีขนาดเล็ก ทำให้สามารถใช้งานต่อครั้งได้นานขึ้น และยังรักษาแรงดูดให้คงที่ได้อย่างสม่ำเสมอตลอดการใช้งาน



รูปที่ 6 เครื่องดูดฝุ่นไร้สายที่ใช้หลักการไซโคลน

ที่มา: “Sir James Dyson: 15 Things You Probably Didn’t Know (Very Interesting Guy),” n.d.

ในงานด้านสิ่งแวดล้อม ระบบบำบัดน้ำเสียในชุมชน และระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการการบำบัดทางกายภาพและทางเคมีแล้ว จะต้องทำการแยกตะกอนชีวภาพ (sludge) ออกจากน้ำเสีย ก่อนปล่อยน้ำสะอาดออกสู่ธรรมชาติ โดยปกติแล้วมักนิยมใช้วิธีการตกตะกอนตามธรรมชาติด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนนาน ดังนั้น ในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ จึงมีการนำไซโคลนน้ำ หรือ ไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) (รูปที่ 7) มาใช้ในการแยกตะกอนชีวภาพออกจากน้ำ ซึ่งสามารถแยกได้ด้วยวิธีเชิงกลอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง รวมถึงใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อยกว่าการสร้างบ่อตกตะกอน



รูปที่ 7 ไฮโดรไซโคลนในงานบำบัดน้ำเสีย

ที่มา: “Water Treatment Hydrocyclones,” n.d.

นอกจากนี้ ก็ได้เริ่มมีการนำไซโคลนมาใช้ในเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่มากขึ้น ด้วยข้อดีของไซโคลนคือ ความไม่ซับซ้อนของตัวอุปกรณ์ รวมถึงไม่มีชิ้นส่วนเชิงกลจำนวนมาก จึงทำให้ค่าบำรุงรักษาต่ำ อีกทั้งพลังงานที่ใช้ในการดำเนินการต่ำ โดยหากประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนนั้นยังไม่เพียงพอ ก็สามารถนำไปคัดแยกต่ออีกครั้งด้วยเครื่องคัดแยกไฟฟ้าสถิตหรือเครื่องคัดแยกอนุภาคแบบเปียกเพื่อกำจัดอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กให้เหมาะสมก่อนการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ให้ได้รับผลกระทบน้อยที่สุดและสอดคล้องตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Chuersuwan, N., Nimrat, S., Lekphet, S., & Kerdkumrai, T. (2008). Levels and major sources of PM_{2.5} and PM₁₀ in Bangkok Metropolitan Region. *Environment International*.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.018>

Jan, R., Roy, R., Yadav, S., & Satsangi, P. G. (2017). Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. *Building and Environment*.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>

Juengcharoensukying, J., Poochinda, K., & Chalermisinsuwan, B. (2017). Effects of Cyclone Vortex Finder and Inlet Angle on Solid Separation Using CFD Simulation. *Energy Procedia*.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.194>

Leith, D., & Mehta, D. (1973). Cyclone performance and design. *Atmospheric Environment (1967)*.

[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90006-1)

- Liu, F., Chen, J., Zhang, A., Wang, X., & Dong, T. (2014). Performance and flow behavior of four identical parallel cyclones. *Separation and Purification Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.030>
- Piemjaiswang, R., Ratanathampan, K., Kunchonthara, P., Piumsomboon, P., & Chalermssinsuwan, B. (2016). CFD study of cyclone performance: Effect of inlet section angle and particle size distribution. *Jurnal Teknologi*, 78(6-4). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8981>
- Rhodes, M. (2008). Introduction to Particle Technology: Second Edition. In *Introduction to Particle Technology: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470727102>
- Sir James Dyson: 15 Things You Probably Didn't Know (Very Interesting Guy). (n.d.). Retrieved August 24, 2020, from <https://www.homestratosphere.com/dyson/>
- Water treatment hydrocyclones. (n.d.). Retrieved August 24, 2020, from https://prom-water.ru/en/catalog/industrial_water_treatment_systems/water_treatment_hydrocyclones/
- Whitelock, D. P., & Buser, M. D. (2007). Multiple series cyclones for high particulate matter concentrations. *Applied Engineering in Agriculture*.
- Wimolwattanapun, W., Hopke, P. K., & Pongkiatkul, P. (2011). Source apportionment and potential source locations of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} at residential sites in metropolitan Bangkok. *Atmospheric Pollution Research*. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.022>
- Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19>
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. ๒๕๔๘. (2006).