Environmental Journal

Volume 24 | Issue 4 Article 2

2020-10-01

ขทความ: "ไซโคลน" เครื่องมือคัดแยกฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม

รัชชานนท์ เอี่ยมใจสว่าง

Follow this and additional works at: https://digital.car.chula.ac.th/cuej

Part of the Environmental Sciences Commons

Recommended Citation

เอี่ยมใจสว่าง, รัชชานนท์ (2020) "ขทความ: "ไซโคลน" เครื่องมือคัดแยกฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม," *Environmental Journal*: Vol. 24: Iss. 4, Article 2.
Available at: https://digital.car.chula.ac.th/cuej/vol24/iss4/2

This Article is brought to you for free and open access by the Chulalongkorn Journal Online (CUJO) at Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Environmental Journal by an authorized editor of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

บทความ: “ไซโคลน” เครื่องมือคัดแยกฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม

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 PM2.5 เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากในประเทศไทยในช่วงปีที่ผ่านมา (รูปที่ 1 มลพิษทางอากาศในกรุงเทพมหานคร ปี 2562) ฝุ่นละอองเหล่านี้สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและส่งผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชาชน (Jan, Roy, Yadav, & Satsangi, 2017) โดยเฉพาะโรคเรื้อรังในระบบทางเดินหายใจ เช่น หอบหืด ถุงลมโป่งพอง และโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง เป็นต้น (Xing, Xu, Shi, & Lian, 2016) แหล่งกำเนิดฝุ่นที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทยแบ่งตามขนาดของละอองฝุ่น คือ ละอองฝุ่นขนาดเล็กที่พบได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลงในยานพาหนะ และการเผาไหม้ชีวมวล ส่วนละอองฝุ่นขนาดใหญ่มักพบได้จากการก่อสร้างอาคารและการพัดพาของดิน (Chuersuwan, Nimrat, Lekphet, & Kerdkumrai, 2008; Wimolwattanapun, Hopke, & Pongkiatkul, 2011)

นอกจากนี้ กิจกรรมในภาคอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงชีวภาพ ล้วนแล้วแต่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นด้วยกันทั้งสิ้น ดังนั้น กระทรวงอุตสาหกรรมจึงมีแนวทางและกฎหมายกำกับดูแลและควบคุม โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. ๒๕๔๙, 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) อุปกรณ์แต่ละชนิดมีช่วงการคัดแยกขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ตารางที่ 1 แสดงช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและประสิทธิภาพในการคัดแยกของอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ

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

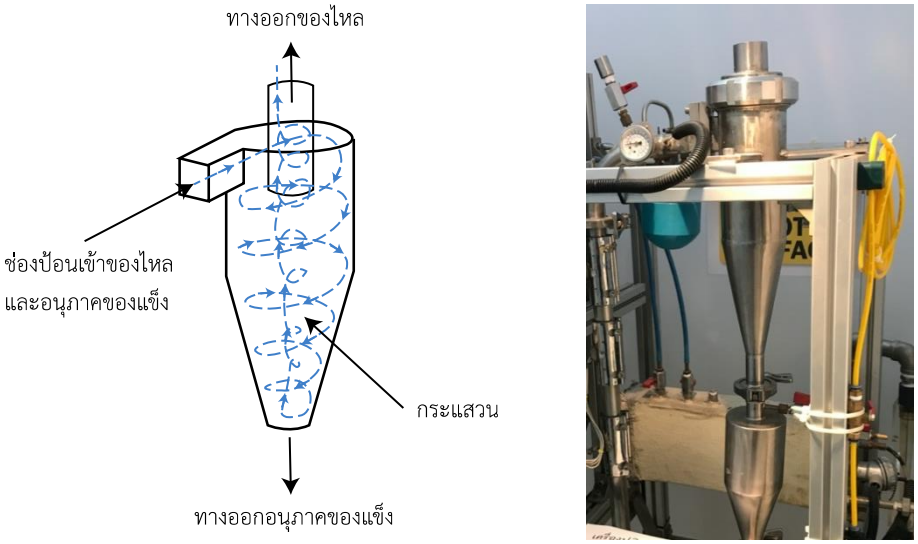
ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของอุปกรณ์ต่าง ๆ (Rhodes, 2008)

อุปกรณ์	ช่วงขนาดอนุภาคในการคัดแยกที่เหมาะสม (ไมครอน)	ประสิทธิภาพในการคัดแยก (%)
แผ่นกรอง	0.1-2.0	80-99
เครื่องคัดแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต	0.2-10.0	55-99
เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบเปียก	0.2-50.0	10-99
ไซโคลน	0.5-100.0	1-99

เนื่องจากไซโคลนมีการใช้พลังงานที่ต่ำ และเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน จึงทำให้ไซโคลนได้รับความนิยมในการติดตั้งเพื่อคัดแยกฝุ่น หากพิจารณาจากข้อมูลในตารางที่ 1 ไซโคลนสามารถใช้แยกฝุ่นได้ดีในช่วงกว้าง แต่ประสิทธิภาพในการแยกมีช่วงกว้างตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 99 ทั้งนี้ การเลือกใช้รูปแบบของไซโคลนรวมถึงภาวะดำเนินการของไซโคลนที่เหมาะสม จึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ต้องการ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของไซโคลน บทความนี้จึงได้นำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับไซโคลน ที่พบได้มากในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการเกษตร และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานไซโคลนที่เหมาะสม

ทำความรู้จักกับไซโคลน

ไซโคลนเป็นเครื่องมือคัดแยกอนุภาคของแข็ง (ละอองฝุ่น) ออกจากของไหล (ของเหลว หรือ ก๊าซ) โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rhodes, 2008) ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ตำแหน่งทางเข้าของไซโคลน อนุภาคของแข็งที่ผสมกับของไหลจะถูกป้อนเข้ามา โดยอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ไปตามผนังของไซโคลนที่เป็นรูปทรงกระบอก ทำให้เกิดไหลแบบหมุนวน และ ก่อตัวเป็นกระแสหมุนวน (vortex) ขณะที่อนุภาคของแข็งถูกเหวี่ยงอยู่ในกระแสหมุนวนจะเกิดแรงในแนวสัมผัส (tangential force) ที่จะผลักให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนตัวออกจากศูนย์กลางกระแสวนออกสู่ผนังไซโคลน ด้านล่างของไซโคลนที่ลักษณะเป็นทรงกรวยที่ปลายทางออกมีลักษณะบีบเข้า ทำให้กระแสวนมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลสวนทางย้อนกลับขึ้นด้านบน ด้วยความต่างของความหนาแน่นของของไหลและอนุภาคของแข็ง จึงทำให้อนุภาคของแข็งถูกผลักลงสู่ทางออกทางด้านล่าง และของไหลที่ปราศจากอนุภาคของแข็งจึงไหลออกที่ทางออกด้านบนของไซโคลน



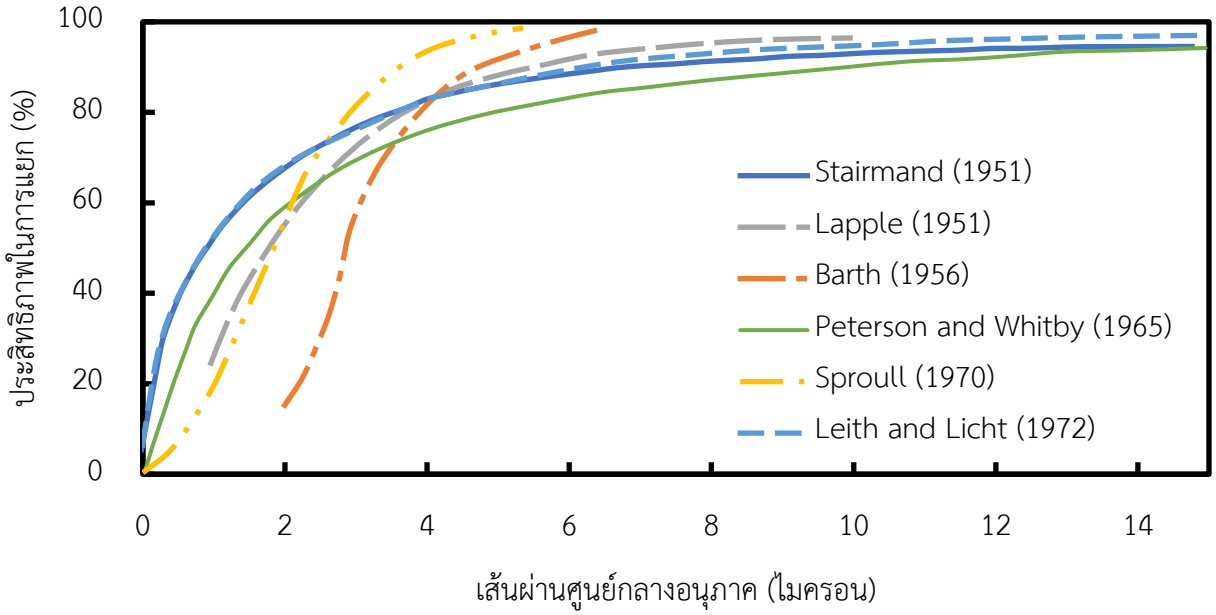
รูปที่ 2 (ซ้าย) รูปแบบการไหลภายในไซโคลน (ขวา) ไซโคลน Lapple

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 และไซโคลน 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, & Chalermsinsuwan, 2017; Piemjaiswang, Ratanathammapan, Kunchonthara, Piumsomboon, & Chalermsinsuwan, 2016) นอกจากนี้ยังมีวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกให้สูงขึ้น คือการต่อไซโคลนมากกว่า 1 ตัวเข้าด้วยกัน ในรูปแบบอนุกรมและแบบขนาน ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแล้วยังช่วยให้สามารถคัดแยกได้ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการแยกของไซโคลนประเภทต่างๆ

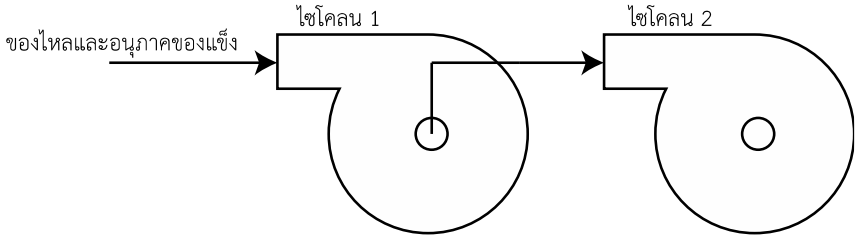
ที่มา: Leith & Mehta, 1973

ทำอย่างไรให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงขึ้นแต่ยังคงคัดแยกได้ในปริมาณที่สูง

1. การต่อไซโคลนแบบอนุกรม

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

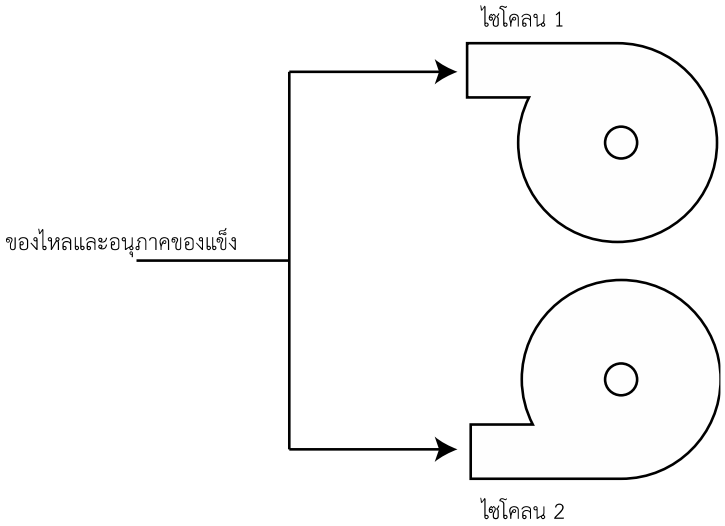
หยาบที่เน้นการดักจับอนุภาคของแข็งปริมาณมาก และไซโคลนตัวที่สอง ทำหน้าที่ในการขัดแยกอนุภาคแบบละเอียดอีกครั้ง จึงสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการคัดแยกโดยรวมนั้นสูงกว่าการใช้อุปกรณ์ไซโคลนเพียงตัวเดียว



รูปที่ 4 การต่อไซโคลนแบบอนุกรม

2. การต่อไซโคลนแบบขนาน

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



รูปที่ 5 การต่อไซโคลนแบบขนาน

นอกจากรูปแบบการต่อไซโคลนแบบอนุกรมและแบบขนานแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกของไซโคลนอีกมากมาย ตัวอย่างที่พบได้มากในการใช้งานไซโคลนในกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณของแข็งในระบบ การแตกหักของอนุภาคของแข็ง และระบบลำเลียงของแข็ง เป็นต้น

ปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยก

1. ปริมาณของแข็งในระบบ

   สำหรับระบบที่มีปริมาณของแข็งในตัวกลางมาก จะทำให้อนุภาคมีโอกาสสัมผัสกันและเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้สามารถแยกได้ดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม การมีอนุภาคของแข็งมากเกินไป อาจจะทำให้ไซโคลนอุดตัน ทำให้ความดันลด (pressure drop) ของไซโคลนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงได้ อย่างไรก็ตาม การอุดตันของไซโคลน อาจเกิดจากปัญหาทางการก่อสร้างของไซโคลนอื่น เช่น รอยต่อรอยเชื่อมของตัวไซโคลน หรือ ขนาดที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น
2. การแตกหักของอนุภาคของแข็ง

   การแตกของอนุภาคของแข็งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยก การแตกของอนุภาคมักเกี่ยวข้องกับสมบัติของตัวอนุภาค พบได้มากในระบบที่มีการหมุนเวียนของของแข็งซึ่งมีการแยกอนุภาคที่บริเวณทางออกของระบบด้วยไซโคลน เพื่อนำของแข็งกลับมาป้อนเข้าในเครื่องปฏิกรณ์อีกครั้ง เมื่อระบบดำเนินการไประยะเวลาหนึ่ง อนุภาคมีการชนกันเอง หรือชนกับผนัง จึงทำให้อนุภาคเกิดการแตกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนลดลง
3. ความชื้นในตัวกลาง

   ความชื้นในตัวกลางส่งผลต่อการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ กลุ่มก้อนอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะทำให้สามารถแยกได้ดีขึ้น แต่ในการดำเนินการจริงนั้น ความชื้นอาจทำให้เกิดการสะสมและเกาะติดของอนุภาคบริเวณขอบผนังของไซโคลน ส่งผลให้เกิดการอุดตัน และทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง
4. ระบบลำเลียงของแข็ง

   ระบบลำเลียงของของแข็งออกจากไซโคลน ในการใช้งานภายใต้สภาวะปกติที่มีการใช้ความดันในระบบ หากเกิดการรั่วของระบบลำเลียงเพียงเล็กน้อยอาจจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกมากนัก แต่อาจทำให้สูญเสียผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการและปลดปล่อยอนุภาคออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในกรณีที่ระบบดำเนินการภายใต้สภาวะสุญญากาศการที่ระบบลำเลียงมีรอยรั่วจะทำให้ความดันจากภายนอกระบบไหลย้อนกลับเข้าสู่ภายในระบบส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

ไซโคลนในชีวิตประจำวัน

ในอดีตที่ผ่านมา ไซโคลนมักถูกใช้เป็นอุปกรณ์การแยกหลักในภาคอุตสาหกรรม แต่ในปัจจุบัน ได้มีการประยุกต์ใช้หลักการทำงานของไซโคลนในอุปกรณ์ในครัวเรือนมากยิ่งขึ้น เช่น เครื่องดูดฝุ่น (รูปที่ 6) โดยทั่วไปหากใช้เครื่องดูดฝุ่นไปสักระยะหนึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนหรือชำระล้างถุงเก็บฝุ่น (filter/bag) จึงทำให้เครื่องดูดฝุ่นแบบดั้งเดิมมีขนาดใหญ่ อีกทั้งความสามารถในการดูดฝุ่นจะลดลงเมื่อถุงกรองนั้นใกล้เต็มหรืออุดตัน ดังนั้นการใช้ไซโคลนในการคัดแยกอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กออกจากอากาศที่ดูดเข้าไปก่อนทำการกักเก็บในภาชนะที่ออกแบบมากับตัวเครื่อง ส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องใช้ถุงเก็บฝุ่นอีกต่อไป เครื่องดูดฝุ่นในปัจจุบันจึงมีขนาดที่เล็ก 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 จึงมีการนำโซโคลนน้ำ หรือ ไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) (รูปที่ 7) มาใช้ในการแยกตะกอนชีวภาพออกจากน้ำ ซึ่งสามารถแยกได้ด้วยวิธีเชิงกลอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง รวมถึงใช้พื้นในการก่อสร้างน้อยกว่าการสร้างบ่อตกตะกอน

รูปที่ 7 ไฮโดรไซโคลนในงานบำบัดน้ำเสีย

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

นอกจากนี้ ก็ได้เริ่มมีการนำไซโคลนมาใช้ในเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่มากขึ้น ด้วยข้อดีของไซโคลนคือความไม่ซับซ้อนของตัวอุปกรณ์ รวมถึงไม่มีชิ้นส่วนเชิงกลจำนวนมาก จึงทำให้ค่าบำรุงรักษาต่ำ อีกทั้งพลังงานที่ใช้ในการดำเนินการต่ำ โดยหากประสิทธิภาพในการคัดแยกของไซโคลนนั้นยังไม่เพียงพอ ก็สามารถนำไปคัดแยกต่ออีกครั้งด้วยเครื่องคัดแยกไฟฟ้าสถิตหรือเครื่องคัดแยกอนุภาพแบบเปียกเพื่อกำจัดอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กให้เหมาะสมก่อนการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ให้ได้รับผลกระทบน้อยที่สุดและสอดคล้องตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Chuersuwan, N., Nimrat, S., Lekphet, S., & Kerdkumrai, T. (2008). Levels and major sources of PM2.5 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., & Chalermsinsuwan, 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

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., Ratanathammapan, K., Kunchonthara, P., Piumsomboon, P., & Chalermsinsuwan, 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 PM2.5 and PM2.5-10 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 PM2.5 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. ๒๕๔๙. (2006).