

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการแยกของแข็งออกจากของเหลว (Rushton and Holdich, 2000)

เทคนิคในการแยกของแข็งออกจากของเหลวมี 2 วิธี

2.1.1 การกรอง (Filtration)

คือการนำของผสมที่มีทั้งของแข็งและของเหลวมาผ่านตัวกลาง (เช่น ตะแกรง กระดาษ ทราย กรวด เป็นต้น) ของเหลวจะไหลผ่านตัวกลาง ในขณะที่ของแข็งจะถูกกรองอยู่ด้านบนผิวหน้าของตัวกลาง

2.1.2 การตกตะกอน (Sedimentation)

การแยกโดยการตกตะกอนนั้นอาศัยแรงมากระทำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงโน้มถ่วง (Gravity force) และแรงเหวี่ยง (Centrifugal force) ซึ่งทั้ง 2 แรงนี้อาศัยความแตกต่างกันของความหนาแน่นของของแข็งและของเหลว ซึ่งของแข็งจะจมอยู่ในของเหลว

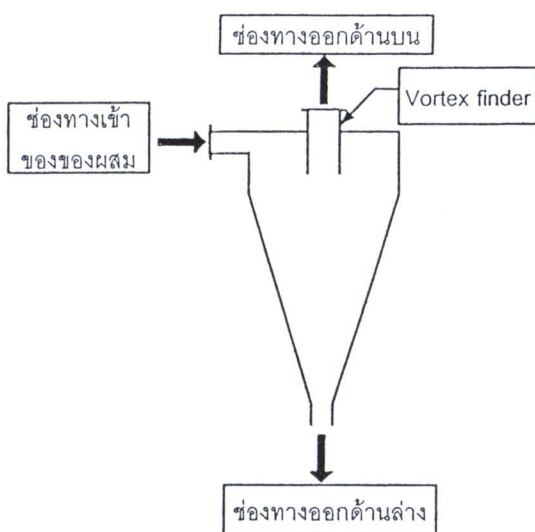
ในการตกตะกอนนั้น ผู้วิจัยสนใจในเรื่องของไฮโดรไซโคลน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเหลวโดยใช้แรงเหวี่ยง ซึ่งจะกล่าวในเรื่องของทฤษฎีต่อไป

2.2 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลน (วรศิริ เสียงสนัน, 2549)

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเหลว ซึ่งการไหลของของเหลวในไฮโดรไซโคลน จะประกอบด้วย 3 ช่องทาง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 คือ

1. ช่องทางเข้าของของผสม (Feed) จะอยู่ทางด้านข้างของไฮโดรไซโคลนเพื่อให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง เกิดการกระจายตัวของอนุภาค ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกตัวออกมาใกล้ผนังของไฮโดรไซโคลนและออกมาที่ช่องทางออกด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน
2. ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูง
3. ช่องทางออกด้านบน (Overflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 2.1 เส้นทางไหลทั้ง 3 ส่วนภายในไฮโดรไซโคลอน

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลอน เริ่มจากการจ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนด้วยแรงดันของน้ำ โดยที่ช่องท่อจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลอนส่วนใหญ่มีหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้นเมื่อมีการจ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนทางด้านข้าง จะทำให้เกิดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) เพื่อให้เกิดการหมุนเหวี่ยง แล้วยแยกการไหลของของผสมที่มีอนุภาคและความหนาแน่นที่แตกต่างกันออกจากกันเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ การไหลของอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงจะไหลออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) พร้อมกับน้ำด้วยบางส่วน ส่วนที่สองคือ การไหลของน้ำใสและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำจะไหลขึ้นออกสู่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) ผ่านท่อที่อยู่ภายใน ซึ่งทอดังกล่าว เรียกว่า Vortex finder

การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลอนจะมีลักษณะการไหลแบบหมุนวน สามารถแบ่งออกได้สองประเภท คือ การไหลแบบหมุนวนภายนอก (Outer vortex) เป็นการหมุนอยู่ด้านนอกติดกับผนังของไฮโดรไซโคลอนในทิศทางลง ทำหน้าที่นำอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงไหลออกทางช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน และการหมุนวนภายใน (Inner vortex) เป็นการหมุนทวนขึ้นด้านบนในทิศทางการหมุนเดียวกันที่บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลอน ทำหน้าที่นำอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำไหลออกทางช่องทางออกด้านบน และที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลอนจะเกิดแกนอากาศ (Air core) ขึ้น

ส่วนทางด้านบนของไฮโดรไซโคลอนจะพบว่าการไหลอีกแบบหนึ่ง ซึ่งของผสมจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนปิดบน Vortex finder และรอบๆ ผนังของไฮโดรไซโคลอนที่ของผสมนั้นจะไหลวนอยู่เฉพาะ

บริเวณในส่วนบนของไฮโดรไซโคลนและไหลออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) โดยไม่ผ่านการหมุนวนใน Outer และ Inner vortex ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นการไหลนี้ ของผสมที่ไหลออกทางช่องทางออกด้านบนจะไหลไปรวมกับของผสมที่ไม่ได้ไหลลงมาที่ตัวไฮโดรไซโคลน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ซึ่งทำให้ความเร็วของการหมุนวนในไฮโดรไซโคลนลดลง เนื่องจากการไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณภายในช่วงบนของไฮโดรไซโคลนแล้ว ไหลลัดออกทางช่องทางออกด้านบน

ไฮโดรไซโคลนสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งอุปกรณ์สำหรับทำใส (Clarifier) และอุปกรณ์สำหรับทำข้น (thickeners) นั่นคือ ส่วนการไหลที่ไหลออกทางด้านบน (Overflow) เป็นการเจือจางของของแข็งหรืออนุภาคนาละเอียด ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณอนุภาคของแข็งน้อยลง ส่วนการไหลที่แยกออกทางด้านล่าง (Underflow) จะมีอนุภาคนาขนาดใหญ่และมีความเข้มข้นของของแข็งมากกว่า

การใช้ไฮโดรไซโคลนในภาคอุตสาหกรรม ในกรณีที่ค่าความดันลดของไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงมาก หรืออัตราการไหลของของผสมมีค่ามาก อาจจำเป็นต้องใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อกันแบบขนานหรือแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากกัน

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบขนาน นิยมใช้เพื่อรับอัตราการไหลของของผสมได้สูงขึ้นตามต้องการ ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบขนานนี้อาจใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีรูปร่างและขนาดเดียวกันหลายๆ ตัว มาต่อแบบขนานโดยต้องออกแบบให้ของไหลผ่านเข้ามาในไฮโดรไซโคลนเท่าๆ กัน

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม หมายถึงการใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อกันแบบอนุกรม อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำในส่วนที่ออกทางช่องทางออกด้านบน จะไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวที่สองและต่อไป ค่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนตัวที่สองจะน้อยกว่าของไฮโดรไซโคลนตัวแรก ดังนั้นอาจออกแบบให้ไฮโดรไซโคลนตัวถัดมามีขนาดเล็กลงตามลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่หลุดรอดออกมาจากไฮโดรไซโคลนตัวต้นๆ อนุภาคที่ออกมาจากไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวมีการกระจายตัวของขนาดแตกต่างกัน ในการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบนี้อาจใช้สำหรับแยกอนุภาคของผสมออกเป็น 2-3 ขนาดก็ได้ นอกจากนี้ยังใช้ได้กับในกรณีของผสมมีการกระจายขนาดกว้าง ดังนั้นควรใช้ไฮโดรไซโคลนตัวแรกแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เพื่อป้องกันการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนตัวต่อไปซึ่งมีขนาดเล็กกว่า

โดยทั่วไปขนาดของไฮโดรไซโคลน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 มิลลิเมตรถึง 2.5 เมตร ขนาดของอนุภาคที่แยกได้อยู่ระหว่าง 2-250 ไมโครเมตร และอัตราการไหลที่ใช้จะมีปริมาตร

อยู่ระหว่าง 0.1-7200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าความดันลด (pressure drop) ระหว่างช่องทางที่จ่ายน้ำเข้ากับช่องทางที่น้ำไหลออก ซึ่งค่าที่ใช้ในการทำงานอยู่ระหว่างความดันขนาด 0.34-6 บาร์ ซึ่งไฮโดรไซโคลขนาดเล็กจะทำงานที่ความดันสูงกว่าไฮโดรไซโคลที่มีขนาดใหญ่ (Svarovsky, 1984)

ข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคล สามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อดีของไฮโดรไซโคล

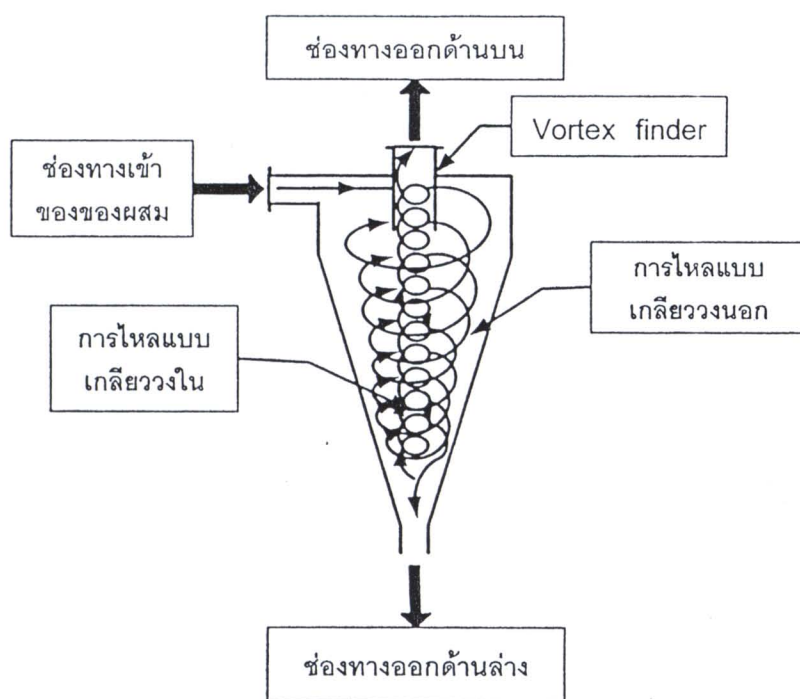
1. ไฮโดรไซโคลใช้เวลาในการแยกตะกอนน้อยกว่าในกระบวนการแยกวิธีอื่นๆ
2. ไฮโดรไซโคลมีราคาถูก ติดตั้งง่าย และมีความต้องการการบำรุงรักษาน้อย
3. ไฮโดรไซโคลมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การแยกชนิดอื่นๆ
4. ไฮโดรไซโคลสามารถประยุกต์ใช้กับการแยกของแข็งออกจากของเหลว แยกของเหลวสองชนิดที่อยู่ร่วมกัน แยกก๊าซออกจากของเหลว หรือแยกของแข็งออกจากของแข็งด้วยกันในภาวะที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

ข้อเสียของไฮโดรไซโคล

1. ไฮโดรไซโคลไม่สามารถแยกขนาดของอนุภาคออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีการปะปนของอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีการปะปนของอนุภาคขนาดเล็กในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดใหญ่
2. ตัวเรือนไฮโดรไซโคลเกิดการกัดกร่อนและสึกหรอได้ เนื่องจากการกระทบกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังภายในไฮโดรไซโคล อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันได้โดยการเคลือบผิวภายในไฮโดรไซโคลหรือเลือกวัสดุของตัวเรือนไฮโดรไซโคลที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน
3. แรงเฉือน (Shear force) ที่มีมากในไฮโดรไซโคล ทำให้อนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อนจากกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) เกิดการแตกตัวออกจากกันได้
4. ใช้พลังงานสูงในการสร้างความเร็วในการไหลเข้า โดยนิยมควบคุมความดันจ่ายเข้าเพื่อปรับอัตราไหลเข้าไฮโดรไซโคล

2.2.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน (Fluid Flow and Particle Motion in Hydrocyclone)

การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน อาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน แรงดังกล่าวเกิดจากการหมุนวน ซึ่งเกิดจากการจ่ายของผสมเข้าไปในลักษณะสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน ดังรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นรูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่ใช้กันอยู่ แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนที่เป็นทรงกระบอกจะถูกปิดที่ส่วนบนด้วยตัวครอบและมีท่อทะลุสำหรับให้ของไหลออกทางด้านบน เรียกว่า Vortex finder มีระยะยื่นออกมาจากตัวไฮโดรไซโคลน และส่วนล่างที่เป็นกรวยจะมีลักษณะเป็นช่องเปิดปลายกรวยเพื่อให้อนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลนออกมาทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) ของผสมจะถูกจ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลนตามแนวสัมผัสผิวเส้นรอบวง ในทางปฏิบัติช่องทางเข้าของของผสมจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลที่จะเข้ามาในไฮโดรไซโคลน

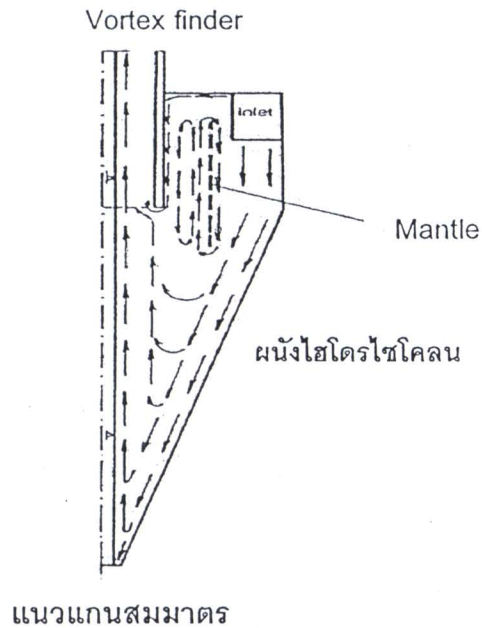


รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลน

บริเวณด้านในและบริเวณรอบๆของช่องทางเข้า การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนเป็นลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ของไหลที่ไหลเข้ามาส่วนใหญ่มักจะเคลื่อนที่ในลักษณะการไหลแบบเกลียววงนอก (Outer vortex) ไปสู่ด้านล่างของกรวยและทำให้ของไหลและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ไหลออกทางช่องเปิดด้านล่าง (Underflow) ที่ปลายแหลมของกรวย

จากนั้นน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กบางส่วนจะไหลกลับขึ้นมาในแนวแกนกลางของไฮโดรไซโคลน (Inner vortex) เคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นมาและไหลออกทาง Vortex finder

นอกจากนี้ยังมีการไหลวนที่เรียกว่า Mantle ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางการไหลที่แบ่งออกจากกันระหว่างการไหลลงที่บริเวณผนังของกรวยและการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณด้านในใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

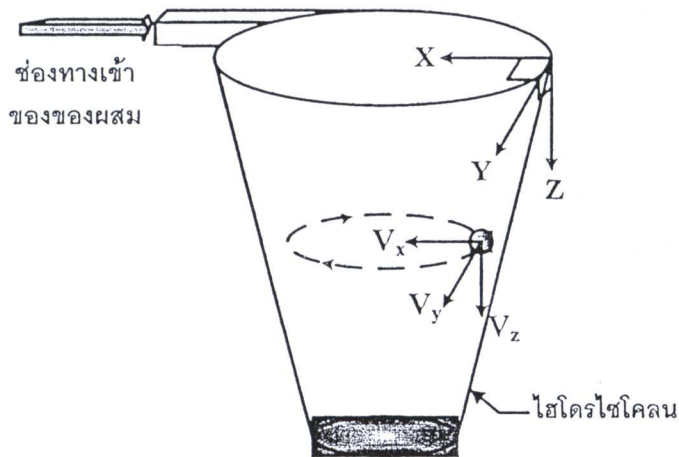


รูปที่ 2.3 เส้นทางการไหลของของไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน
(Svarovsky, 1984)

2.2.3 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน (velocity in hydrocyclone)

(Puprasert, 2004)

ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลนเกิดจากการจ่ายของผสมระหว่างของไหลกับของแข็งเข้าไปในไฮโดรไซโคลนตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ส่งผลให้ของผสมในไฮโดรไซโคลนมีความเร็วของของไหลซึ่งสามารถแบ่งออกตามทิศทางของความเร็วนั้นๆ ได้ 3 ชนิด คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, V_z) และความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, V_x) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน (Puprasert, 2004)

2.2.3.1 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y)

ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของผสมที่จ่ายไปที่บริเวณทางเข้าโดยมีทิศทางสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน และมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของผสมที่จ่ายเข้าที่บริเวณทางเข้ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลน ดังสมการที่ 2.1

$$V_i = \frac{Q}{A_i} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_i คือ ความเร็วของของผสมที่จ่ายไปที่ช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลน

Q คือ อัตราการไหลเข้าของของผสมที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลน

โดยที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ในไฮโดรไซโคลน สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \alpha = \frac{V_y}{V_i} \quad (2.2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_y = \alpha \cdot V_i \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ} \quad V_y = \alpha \frac{Q}{A_i} \quad (2.4)$$

เมื่อ α คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วภายในไฮโดรไซโคลน (V_y) กับความเร็วที่ช่องทางเข้า (V_i) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.8 (Bradley, 1965)

จากสมการที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลนลดลง เมื่อมีอัตราการไหล (Q) คงที่

การจ่ายของผสมตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน จะทำให้เกิดลักษณะการหมุนวน 2 ประเภท คือ Free vortex หรือ Outer vortex ซึ่งจะหมุนวนอยู่ภายนอกในทิศทางลงตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง และ Force vortex หรือ Inner vortex ซึ่งจะหมุนขึ้นในทิศทางเดียวกันกับบริเวณใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

จาก Helmholtz's law แสดงถึงการหมุนวนของของไหลแบบอุดมคติ โดยอาศัยหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) โดยไม่พิจารณาแรงต้านทาน จะได้ว่า

$$V_y \times R = \text{constant} \quad (2.5)$$

เมื่อ V_y คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ซึ่งเปรียบเสมือนความเร็วลัมพ์ที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน

R คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลน

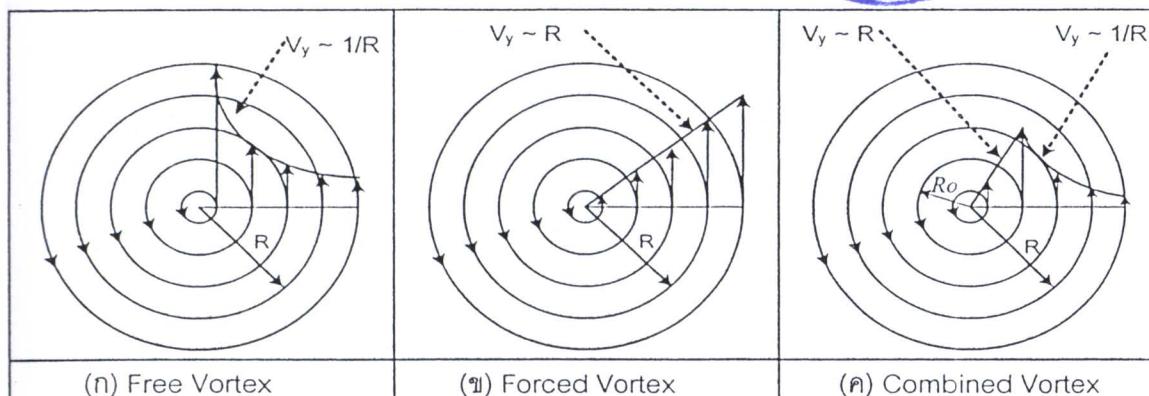
แต่ในทางปฏิบัติจริงจะมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) จะทำให้ได้ค่าน้อยกว่าสมการข้างต้น ดังนั้น

$$V_y \times R^n = \text{constant} \quad (2.6)$$

โดยที่ n มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.9 และเมื่อคิดว่าการไหลไม่มีแรงเสียดทาน ค่า n จะมีค่าเท่ากับ 1 (Kelsall, 1952 อ้างถึงใน Svarovsky, 1984)

สมการที่ 2.5 และ 2.6 ใช้ได้กับการหมุนวนภายนอก (Outer vortex) นั่นคือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลง ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การหมุนวนภายใน (Inner vortex) ในทิศทางขึ้นใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงก็จะเพิ่มขึ้น ดังสมการ

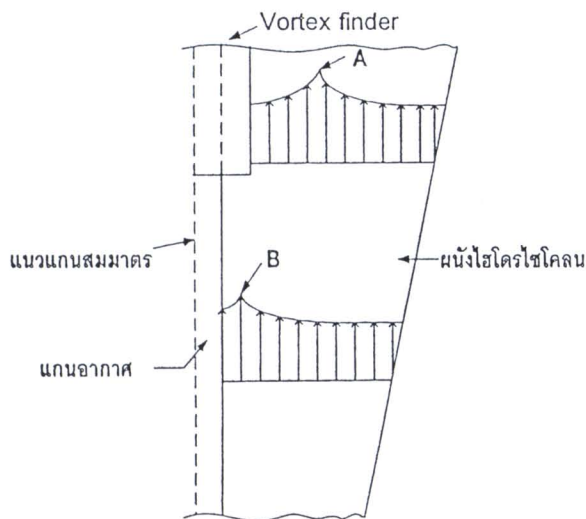
$$\frac{V_y}{R} = \text{constant} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท
(Puprasert, 2004)

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่า การหมุนวนแบบ (ค) Combined vortex คือ สภาพจริงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะดีที่สุด เมื่ออนุภาคอยู่ในบริเวณใกล้กับตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมากที่สุด ดังนั้นจึงควรออกแบบไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยแหลมและยาว เพื่อเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเข้าสู่ตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมากขึ้น

Kelsall, 1952 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ทดลองพบว่าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีการหมุนลดลงเข้าใกล้แกนอากาศ ซึ่ง Kelsall ทำการทดลองวัดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y) โดยทดลองกับน้ำสะอาดที่มีการผสมอนุภาคอลูมิเนียม (Aluminium) แล้วใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) วัดตำแหน่งที่มีการโปร่งใสในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.5 ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นค่าความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนเฉพาะในส่วนที่เป็นทรงกรวย ไม่รวมส่วนที่เป็นทรงกระบอก



รูปที่ 2.6 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ภายในไฮโดรไซโคลอน

(Svarovsky, 1984)

จากรูปที่ 2.6 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน จะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของไฮโดรไซโคลอนลดลง ตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 แต่บริเวณรอบๆ Vortex finder ไม่สามารถใช้สมการนี้อธิบายได้ เนื่องจากที่บริเวณเหนือขอบ Vortex finder ขนาดรัศมีที่ให้ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดใหญ่กว่าขนาดรัศมีของ Vortex finder ที่ตำแหน่ง A และ ตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงส้นน้อยกว่ารัศมีของ Vortex finder ที่ตำแหน่ง B

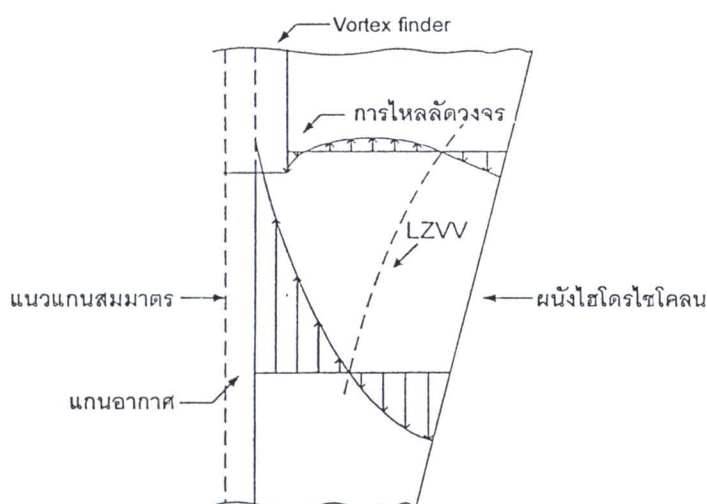
ตำแหน่ง A และ B ต่างเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอนสูงสุด ซึ่งรัศมีจากขอบผนังไฮโดรไซโคลอนไปถึงขอบ Vortex finder จะมีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง A และในทำนองเดียวกัน รัศมีจากขอบผนังไฮโดรไซโคลอนไปถึงขอบของแกนอากาศ (Air core) จะมีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง B จากปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอนไม่ขึ้นกับตำแหน่งใดๆ ตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลอน

อย่างไรก็ตาม ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ก็ยังเป็นความเร็วของของไหลที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลอน เนื่องจากมีค่ามากที่สุดจากความเร็วของไหลทั้งหมด

2.2.3.2 ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, V_z)

ความเร็วตามแนวแกน คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลอนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง นั่นคือ การหมุนวนภายนอก (Outer vortex) ที่มีทิศทางลงสู่ทางออกด้านล่าง ในขณะที่เดียวกันการหมุนวนภายใน (Inner vortex) มีทิศทางขึ้นไปสู่ทางออกด้านบน จากทิศทางการ

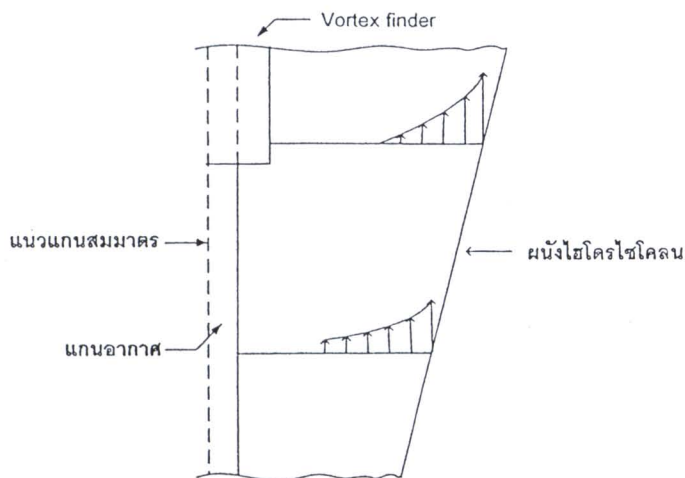
ไหลในส่วนการหมุนวนภายนอกและการหมุนวนภายในที่มีทิศทางไหลสวนทางกัน จะทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity หรือ LZV) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่ระหว่างการหมุนวนภายนอก (Outer vortex) และการหมุนวนภายใน (Inner vortex) และเป็นตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และบริเวณด้านบนของไฮโดรไซโคลนตรงขอบด้านนอกของ Vortex finder จะเกิดการไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.7 การกระจายความเร็วตามแนวแกน (V_z) ภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

2.2.3.3 ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, V_r)

ความเร็วตามแนวรัศมี คือ ความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลน และเป็นความเร็วที่มีค่าน้อยที่สุดจากความเร็วของของไหลทั้ง 3 ชนิดภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งความเร็วในแนวแกนรัศมีจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณเหนือขอบของ Vortex finder ใกล้กับผนังของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสรัศมี (V_x) ภายในไฮโดรไซโคลน
(Svarovsky, 1984)

2.2.4 กฎของสโตค (Stokes's law)

กฎของสโตคเป็นกฎพื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการแยกของแข็งโดยใช้ไฮโดรไซโคลน โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคนั้นมีรูปร่างเป็นทรงกลม และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา อนุภาคจะตกตะกอนลงเนื่องจากความเร่งโน้มถ่วงของโลก ซึ่งการเคลื่อนที่ลงของอนุภาคจะมีแรงต้านที่เรียกว่า แรงลาก (Drag force) และความหนืดของของเหลว (Viscosity) ที่มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค

แรงสำคัญที่ทำให้เกิดการแยกของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน คือ แรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการหมุนของกระแสนั้น แรงหนีศูนย์กลางจะมีค่าเท่ากับผลคูณของมวลกับความเร่งหนีศูนย์กลาง

$$F = \frac{m \cdot V_y^2}{R} \quad (2.8)$$

ประสิทธิภาพการแยกในไฮโดรไซโคลน ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน การเพิ่มความเร็วของการไหลเข้าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ปรัชญาการแยกกระหว่างของแข็งในไฮโดรไซโคลนสามารถอธิบายได้จากกฎของสโตค (Stokes's law) (Metcalf และ Eddy, 2003)

$$V_p = \frac{\Delta \rho \cdot d_p^2 \cdot g}{18\mu} \quad (2.9)$$

เมื่อ	V_p	คือ ความเร็วในการตกตะกอน (Terminal velocity) หน่วย เมตรต่อวินาที
	$\Delta\rho$	คือ ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	d_p	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) หน่วย เมตร
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที ²
	μ	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) หน่วยนิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร

โดยทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำ นิยมใช้การแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก สำหรับเครื่องมือการแยกอื่นๆ สามารถทำการเพิ่มความเร่งนี้เพื่อให้ความเร็วในการตกตะกอน (V_p) เพิ่มขึ้นได้ และในกรณีของไฮโดรไซโคลนความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนจะมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก สามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert, 2004)

$$\zeta = \frac{V_y^2}{R \cdot g} \quad (2.10)$$

เมื่อ	ζ	คือ ความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone) หน่วย เมตรต่อวินาที ²
	V_y	คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลน หน่วย เมตรต่อวินาที
	R	คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลน (บริเวณส่วนที่เป็นทรงกระบอก) หน่วย เมตร
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที ²

ดังนั้น Stokes's law ในกรณีของไฮโดรไซโคลน เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 \cdot \zeta}{18\mu} \quad (2.11)$$

จากสมการกฎของสโตคส์จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อความเร็วในการแยกอนุภาคมีต่างๆ ดังนี้

1. ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส, $\Delta\rho$

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว เมื่อของผสมนั้นมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส ($\Delta\rho$) นั้นหมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (ρ_p) และความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w), ($\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$) นั้นเอง ในการแยกของแข็งออกจากน้ำด้วยไฮโดรไซโคลอนจะไม่เกิดขึ้น หากความหนาแน่นของทั้งสองเฟสไม่มีความแตกต่างกัน ($\Delta\rho = 0$) ซึ่งจะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาค (V_p) ดังสมการที่ 2.9 มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย เป็นผลทำให้ไฮโดรไซโคลอนไม่สามารถแยกอนุภาคทั้งสองเฟสออกจากกันได้

2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง, d_p

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งก็คือ ขนาดอนุภาคของของแข็ง ซึ่งมาจากสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) จะเห็นได้ว่า d_p อยู่ในรูปของกำลังสอง (d_p^2) นั้นหมายถึง ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ ความเร็วในการแยกอนุภาค (V_p) ก็จะมีเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย กล่าวคือ ขนาดอนุภาคของของแข็งจะมีผลสำคัญต่อการเกิดความเร็วในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนมากกว่าตัวแปรอื่นๆ ดังนั้น หากสามารถทำการเพิ่มขนาดอนุภาคของแข็งได้ จะทำให้มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลอนเกิดขึ้นได้ดี

3. ความหนืดของของไหล, μ

ความหนืดของของไหลส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค (V_p) เมื่อค่าความหนืดของของไหลสูงจะส่งผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความหนืดของของไหลมีค่าต่ำจะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง และความหนืดยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหลอีกด้วย โดยถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของของไหลต่ำ ดังนั้น เพื่อให้ค่าความเร็วในการแยกอนุภาคสูงและส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น ควรให้ของไหลมีความหนืดต่ำหรือควรมีอุณหภูมิสูงนั่นเอง

2.2.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน, D_c

เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน วัดที่ฐานของส่วนที่เป็นกรวยหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (Cut size, x_{50}) โดยที่อัตราการไหล (Q) คงที่ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (x_{50}) และความดันลด (Pressure drop, Δp) ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน (D_c) แสดงได้ดังนี้

$$x_{50} \propto D_C^x \quad (2.12)$$

$$\Delta p \propto D_C^y \quad (2.13)$$

โดยที่ x มีค่าอยู่ระหว่าง 1.36 ถึง 1.52 และ y มีค่าอยู่ระหว่าง -3.6 ถึง -4.1 (Bradley, 1965) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเล็กๆ จะทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่แยกออกมาได้เล็กลงตามไปด้วย และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนใหญ่ขึ้น ค่าความดันลดก็จะลดลงด้วยเช่นกัน

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลคงที่ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_C) ที่ความดันลด (Δp) คงที่ เป็นดังนี้

$$Q \propto D_C^z \quad (2.14)$$

โดยที่ z มีค่าอยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 2.0 (Bradley, 1965)

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (x_{50}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_C) ที่ความดันลด (Δp) คงที่ เป็นดังนี้

$$x_{50} \propto D_C^x \quad (2.15)$$

โดยที่ x มีค่าอยู่ระหว่าง 0.41 ถึง 0.5 (Bradley, 1965)

แสดงให้เห็นว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็กลง จะทำให้ขนาดตัด (x_{50}) ลดลงด้วยเช่นกัน นั่นหมายถึง ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงไปได้อีก

2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล (Aperture diameter)

ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของไฮโดรไซโคลนนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลในไฮโดรไซโคลนจะประกอบไปด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (Feed in) เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Overflow) และเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) ซึ่งผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลทั้ง 3 ทางแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (Feed-in diameter, D_i)

ขนาดของช่องจ่ายเข้า (D_i) ควรจะให้ค่าโมเมนต์ (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงสุด เพื่อให้ความเร็วเฉลี่ยที่ทางเข้าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่รัศมีเฉลี่ยทางเข้า (mean radius of entry) การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า จะทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง ดังนั้นในการออกแบบขนาดของช่องจ่ายเข้าจึงควรเลือกช่วงที่มีค่าโมเมนต์สูงสุด (Bradley, 1965)

Chaston, 1965 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ศึกษาถึงขนาดที่เหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า โดยค่าที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับและใช้กันอยู่ทั่วไป คือ $\frac{D_c}{6}$ ถึง $\frac{D_c}{7}$ เมื่อ D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน

การออกแบบขนาดของช่องจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลอนมีความสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลต่อปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ (Capacity) ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค (Separation efficiency) และความดันลด (Pressure drop) ของไฮโดรไซโคลอน การออกแบบทางเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อ Vortex finder เนื่องจากอาจเกิดการปั่นป่วนของของไหลและทำให้เกิดการสึกกร่อน

2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Overflow diameter, D_o)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนใน 2 ลักษณะ คือ

1. การไหลลัดวงจร (Short circuit flow) คือ การไหลผ่านช่วงบนของไฮโดรไซโคลอน และไหลลงที่ผนังด้านนอกของช่องทางออกด้านบน หรือ Vortex finder โดยที่ไม่ผ่านเข้าสู่การหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอน

การไหลลัดวงจรเป็นลักษณะการไหลที่นำอนุภาคน้ำหนักเบาไหลออกด้านบน (Overflow) ซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องทางออกด้านบนมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด อนุภาคที่อยู่ในเส้นทางการไหลลัดวงจร จะไหลกลับเข้ามาในบริเวณของการเพิ่มความเร็วตามแนวสัมผัสภายในไฮโดรไซโคลอน และเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ไปตามขอบด้านล่างของ Vortex finder และมีโอกาสที่จะไหลเข้ามาสู่กระบวนการแยกอนุภาคอีกครั้ง ในทางตรงกันข้าม ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องทางออกด้านบนมีขนาดเล็กกว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด โอกาสที่อนุภาคจะไหลย้อนกลับไปยังการหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอนก็จะน้อยลงไปด้วย

ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนลดลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนมีค่าลดลงด้วย

2. ในกรณีถ้าขนาดของช่องทางออกด้านบน (D_o) มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZVV (Locus of zero vertical velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วตามแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลอนเท่ากับศูนย์ โดย LZVV จะมีขนาดประมาณ 0.43 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ($0.43 D_c$) เป็นเหตุให้การไหลตามแนวรัศมีลดลง ทำให้อนุภาคไหลแยกออกไปทางด้านบนโดยไม่เข้าสู่กระบวนการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอน เกิดการไหลลดลงจริงขึ้น

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) พบว่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบจะลดลง เมื่อ $D_o = \frac{D_c}{12}$ หรือเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก Vortex finder มีค่าเท่ากับ $\frac{D_c}{6}$

Bradley, 1965 แนะนำว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการไหล โดยค่ามากที่สุดเท่ากับ $\frac{D_c}{2.3}$ ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ $\frac{D_c}{8}$ ค่าที่ทำให้ปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ออกที่ช่องทางออกด้านบนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ $\frac{D_c}{7}$ และขนาดช่องทางออกด้านบน (D_o) ควรจะใหญ่กว่าช่องทางจ่ายเข้า (D_i) โดยอาจมีค่า $D_o = D_i$ ไปจนถึง $D_o = 1.6 D_i$ เพื่อป้องกันการกัดเซาะผนังของไฮโดรไซโคลอนจากการจ่ายของผสมเข้าไป นอกจากนี้ค่า $2D_i + D_o$ ควรมีค่าน้อยกว่า D_c

ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสาม สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.16

$$2D_i + D_o = 0.4 - 0.6D_c \quad (2.16)$$

และความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามสำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็ก คือ

$$2D_i + D_o = 0.35 - 0.7D_c \quad (2.17)$$

Rietema, 1961 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) เสนอให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ควรมีค่าประมาณ $0.16D_c$ ถึง $0.5D_c$ และค่าที่เหมาะสมที่ Rietema เสนอเท่ากับ $0.34D_c$

2.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Underflow diameter, D_u)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นขนาดที่แปรผันได้หรือเป็นลักษณะที่ปรับเปลี่ยนได้ เพื่อควบคุมอัตราการไหลออกทางด้านล่าง ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างจึงขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานมากกว่าที่จะกำหนดเป็นค่าคงที่

ปริมาณอัตราการไหลออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (Q_u) ที่น้อยที่สุดจะเท่ากับปริมาณของอนุภาคของแข็งที่แยกออกมารวมกับปริมาณของไหลที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็ง นั่นคือ นอกจากจะขึ้นกับการใช้งานแล้วยังขึ้นกับการกระจายขนาดอนุภาค (Size distribution) ในเส้นการไหลลงสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (D_u) โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วง $\frac{D_c}{10}$ ถึง $\frac{D_c}{5}$ และควรมีค่า $D_u = \frac{D_o}{3}$ เมื่อ $D_o = \frac{D_c}{5}$ ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเข้า (Feed flowrate) กับอัตราการไหลออกที่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow flowrate) หรือ $\frac{Q_f}{Q_u}$ มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) อาจถือได้ว่าไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนหรืออาจมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) พบว่าประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนจะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) ลดลง อีกทั้งยังส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อความดันลด สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลต่างๆใหญ่ตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกันไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็ก ก็จะได้รับผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) ให้มีค่าประมาณ $\frac{D_c}{7}$

ดังนั้น สามารถสรุปผลของช่องทางออกทั้งสามทาง ในรูปคณิตศาสตร์ที่มีต่อไฮโดรไซโคลอน

$$D_c > 2D_i + D_o + 2t \quad (2.18)$$

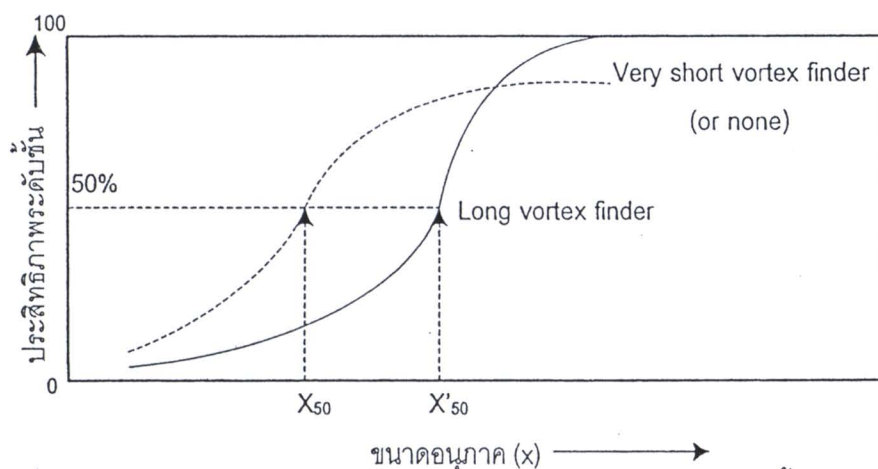
เมื่อ	D_c	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน
	D_i	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า
	D_o	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน

คือ ความหนาของผนัง Vortex finder

3. ความยาว ขนาด และรูปร่างของ Vortex finder (Vortex finder dimensions)

Vortex finder คือ ช่องทางที่น้ำไหลออกทางด้านบน (Overflow) และมีไว้เพื่อป้องกันการไหลล้นด้วย โดยอนุภาคน้ำที่จ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนจะเคลื่อนที่ลงตามผนังด้านนอกของ Vortex finder เข้าสู่ตัวเรือนของไฮโดรไซโคลอน ความยาวของ Vortex finder จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (x_{50}) โดยที่การเพิ่มความยาวของ Vortex finder จะทำให้อนุภาคมีเวลาการแยกออกจากน้ำภายในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบ ในขณะเดียวกันก็จะเป็นการลดประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดละเอียด ซึ่งควรที่จะไหลออกไปที่ทางออกด้านบน (Overflow) พร้อมกับน้ำใสแต่ย้อนกลับมาไหลออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน ดังนั้น ความยาวของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของกลุ่มที่จ่ายเข้าไปและจุดตัด (Cut point) ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายของขนาดนั้นๆ

เนื่องจากความยาวของ Vortex finder ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (x_{50}) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวของ Vortex finder ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อไม่มี Vortex finder ในกรณีนี้จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดใหญ่ลดลง กล่าวคือ อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวจะไหลออกสู่ทางออกด้านบน (Overflow) โดยเส้นทางการไหลล้นด้วย



รูปที่ 2.9 ผลของความยาวของ Vortex finder ต่อประสิทธิภาพระดับขั้นและขนาดตัด (Svarovsky, 1984)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้มีการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ที่ใช้ในโรงงาน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว ทำการแยกของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีความดันต่ำ จากผลการทดลอง พบว่า ความยาวของ Vortex finder ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการ

แยกอนุภาคของไฮโดรไฮโคลน อาจอธิบายได้ว่า เกิดจากการที่อนุภาคตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นเหตุให้อนุภาคไหลออกจากเส้นการไหลลัดวงจรเข้าสู่การไหลแบบปกติภายในไฮโดรไฮโคลนได้

Bradley, 1965 ได้ศึกษาถึงรูปร่างที่ต่างกันของ Vortex finder พบว่า ค่าที่เหมาะสมของความยาวของ Vortex finder โดยทั่วไปแล้วจะให้มีระยะตามแนวแกนของไฮโดรไฮโคลนให้เพียงพอระหว่างระดับท้องของช่องจ่ายเข้า (Feed-in) กับส่วนปลายของ Vortex finder โดยที่ส่วนปลายของ Vortex finder ไม่ควรอยู่ในระดับเดียวกันกับท้องท่อจ่ายเข้าและไม่ควรอยู่ใกล้กับบริเวณหน้าตัดที่เป็นรอยต่อระหว่างส่วนทรงกระบอกและทรงกรวย เนื่องจากบริเวณนี้มีการกระจายอนุภาคแบบปั่นป่วน อาจทำให้มีอนุภาคขนาดใหญ่ปนออกไปพร้อมกับน้ำใสที่ออกทางออกด้านบน (Overflow) ได้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผนังด้านนอกของ Vortex finder ก็มีความสำคัญอีกเช่นกัน จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องออกทางออกด้านบน (D_o) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไฮโคลนลดลง เนื่องจากการไหลลัดวงจรกับตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไฮโคลน ในขณะเดียวกันก็พบข้อดีของการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องออกทางออกด้านบน เมื่อควบคุมให้ผนังด้านนอกของ Vortex finder มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุด โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงไม่ควรมีค่าเกิน $D_C - 2D_i$ และความยาวของ Vortex finder ควรมีค่าเท่ากับ $\frac{D_C}{3}$

4. ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไฮโคลน (Body dimensions)

ไฮโดรไฮโคลนจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่เป็นทรงกระบอกและส่วนที่เป็นทรงกรวย การเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของไฮโดรไฮโคลนนั้นมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย ดังนั้น จึงเกิดการทำให้ไฮโดรไฮโคลนแบบไม่มีส่วนทรงกระบอก หรือการทำไฮโดรไฮโคลนขนาดเล็กโดยไม่มีส่วนกรวยเช่นกัน อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดต่อไฮโดรไฮโคลนที่มีมุมกรวยเล็กๆ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังคงมีการทำส่วนกรวยเอาไว้เพื่อช่วยในแง่เชิงการผลิตไฮโดรไฮโคลน ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบความยาวของไฮโดรไฮโคลน คือ $2.7D_C$ ถึง $7.7D_C$ (Bradley, 1965)

Rietema, 1961 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า สัดส่วนระหว่างส่วนทรงกรวยกับส่วนทรงกรวยไม่ควรมีค่ามากเกินไป โดยแนะนำว่า ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไฮโคลนควรมีค่าประมาณ $5D_C$ และควรมีมุมกรวยเล็กกว่า 30 องศา

Dahlstrom, 1949 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า การเพิ่มความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน คือ การเพิ่มความยาวของส่วนกรวยหรือการลดมุมกรวยของไฮโดรไซโคลนอย่างใดอย่างหนึ่งนั้น ทำให้ปริมาณน้ำที่บำบัดได้และประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ได้มีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวย 9 องศา และ 20 องศา ความยาวไฮโดรไซโคลน $9\frac{9}{16}$ นิ้ว กับ $19\frac{3}{8}$ นิ้ว และ $9\frac{5}{16}$ นิ้ว พบว่าที่ความจุเดียวกัน ไฮโดรไซโคลนที่ยาวกว่าจะลดค่าความดันลด (Pressure drop) ลงครึ่งหนึ่ง ในขณะที่เมื่อเพิ่มมุมกรวยจาก 9 องศา เป็น 20 องศา โดยมีความยาวทั้งหมดเท่าเดิม พบว่ามุมไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความดันลด (Pressure drop) ต่อความจุ (Capacity) แต่อย่างใด นั่นคือ ณ ความดันลดใดๆ เมื่อความยาวของไฮโดรไซโคลนมากขึ้น ความจุก็จะสูงขึ้น จึงสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดน้ำของไฮโดรไซโคลนได้

Dahlstrom, 1949 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคโดยการเพิ่มความยาวที่อัตราการไหลเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมกรวยลดจาก 45 องศา เป็น 15 องศา

Bradley, 1960 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ทำการเปรียบเทียบขนาดมุมของไฮโดรไซโคลน ระหว่างไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา และ 20 องศา พบว่าไฮโดรไซโคลนมุม 20 องศา ให้ขนาดตัด (x_{50}) เล็กกว่าที่อัตราไหลเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหล และจากการสังเกตค่าของขนาดตัดที่เปลี่ยนไป พบว่า ที่ความดันลดที่กำหนดไว้นั้น ไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา จะให้ปริมาณอัตราการจ่ายเข้าสูงกว่าโดยมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเท่ากัน สามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนมุมในช่วง 9 องศา ถึง 20 องศา ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่ความดันลดเดียวกัน

Svarovsky, 1984 กล่าวว่าในการออกแบบไฮโดรไซโคลน ขนาดมุมกรวยมีความสำคัญเช่นกัน คือ เมื่อลดมุมกรวยลงจะส่งผลทำให้ขนาดตัดลดลงด้วย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนก็มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ข้อดีของมุมกรวยที่กว้าง คือ จะทำให้เกิดการอุดตันที่ปลายกรวยน้อยลง นอกจากนี้ ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ (Air core) เพิ่มขึ้นด้วย โดยทั่วไปมุมของไฮโดรไซโคลนควรมีค่าประมาณ 6 องศา ถึง 25 องศา

ขนาดมุมกรวยและความยาวของไฮโดรไซโคลนเป็นตัวแปรที่คำนึงถึงน้อยที่สุดในการออกแบบไฮโดรไซโคลน เนื่องจากไม่มีผลสรุปแน่นอนของผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจากการเปลี่ยนความยาวและมุมกรวยของไฮโดรไซโคลน ผลจาก

งานวิจัยได้สนับสนุนว่า มุมกรวยที่แหลมจะให้ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ (Capacity) สูงและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนอีกด้วย

กรณีที่ใช้มุมกรวยที่กว้าง คือ ไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับการทำใส (Clarifier) หรือการทำความสะอาด (Washer) มีสองสาเหตุที่ต้องใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยกว้าง ประเภทแรกคือ ไฮโดรไซโคลนมุมกรวยกว้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันที่ปลายกรวยน้อยกว่า ประการที่สองคือ ความดันลดที่ใช้กับไฮโดรไซโคลนมุมกรวยกว้างที่อัตราการไหลเดียวกัน จะให้ขนาดตัด (x_{50}) เล็กกว่าไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยแหลม และมีการทดลองในแง่การใช้ไฮโดรไซโคลนเล็กๆ โดยมีช่องทางจ่ายเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential inlet) ปรากฏว่าใช้ในการคัดแยก (Classification) ตามขนาดที่ต้องการได้ดี

5. ขนาดและลักษณะของช่องทางจ่ายของผสมเข้าในไฮโดรไซโคลน

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า ช่องทางจ่ายเข้าสามารถมีรูปร่างได้หลายแบบและหลายตำแหน่ง ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนไม่มากนัก โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไฮโดรไซโคลนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อมีพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากันและความยาวต่อความกว้างควรเป็น 2:1

มีการทดลองที่ทำให้สังเกตได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดของช่องทางจ่ายเข้าโดยยังคงพื้นที่เอาไว้ นั่น ช่องทางเข้าที่ยาวกว่าและเป็นสี่เหลี่ยมยุ่งยากในด้านการผลิต ดังนั้นโดยส่วนใหญ่ไฮโดรไซโคลนจึงยังคงรูปร่างของช่องทางจ่ายเข้าเป็นวงกลมเอาไว้

ชนิดของช่องทางจ่ายเข้า ส่วนใหญ่จะพิจารณาในไฮโดรไซโคลนสำหรับแยกก๊าซมากกว่าไฮโดรไซโคลนของของไหล ซึ่งมีผลการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลนขนาด 3 นิ้ว พบว่าลักษณะของช่องทางจ่ายเข้าไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคและความดันลด

ตำแหน่งของช่องทางจ่ายเข้าควรจะได้ระดับกับแผ่นปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลนซึ่งมีที่จำกัด ในบริเวณที่มีปัญหาหรือเรียกว่า Dead space เป็นบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจร ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติอยู่เสมอ แต่ไม่ควรมีมากเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลทั้งหมด

มุมของช่องทางจ่ายเข้าไม่มีความสำคัญกับไฮโดรไซโคลนที่มีมุมระหว่าง 0 องศา ถึง 10 องศา จากแนวราบ แต่ส่งผลกับอัตราการจ่ายของผสมที่มีอนุภาคขนาดหยาบ ซึ่งส่งผลในเรื่องบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจรที่เกิดขึ้นเหนือช่องทางจ่ายเข้าภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้นการทำมุมของทางจ่ายเข้าก็เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการจ่ายของผสมเข้าไปในเส้นทางการไหลลัดวงจร แต่สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องสนใจมุมของทางจ่ายเข้าแต่อย่างใด

6. แกนอากาศ (Air core)

ลักษณะการไหลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในไฮโดรไซโคลน คือ แกนอากาศ (Air core) ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางด้านในของไฮโดรไซโคลน ซึ่งมีสาเหตุจากการไหลแบบหมุนวน เมื่อความเร็วของของไหลสูงจะทำให้บริเวณแกนกลางมีความดันต่ำ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างเป็นปกติเมื่อมีพื้นผิวของไหลที่หมุนวนอย่างอิสระภายในทรงกระบอกและเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของไซโคลน ถ้าทางออกทั้งสองทางหรือทางใดทางหนึ่งต่อออกสู่อากาศโดยตรง แกนกลางของไฮโดรไซโคลนจะดูดอากาศเข้าไป ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแกนอากาศด้านในแกนของไฮโดรไซโคลน นอกจากนี้แกนอากาศดังกล่าวยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของการไหลแบบหมุนวน (Vortex) ซึ่งควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงและเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ตลอดความยาวของไฮโดรไซโคลน

จากผลงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ (D_a) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_c) แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{D_a}{D_c} = \frac{D^*}{D_c} \sqrt[3]{\frac{\rho v_i^2}{3\Delta\rho}} \quad (2.19)$$

- เมื่อ D_a คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ
 D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน
 D^* คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนของไฮโดรไซโคลน
 เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้ามีค่าเท่ากับ $D - D_i$
 v_i คือ ความเร็วของการไหลเข้าในไฮโดรไซโคลน

2.2.6 สรุปผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลน

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากถ้าไฮโดรไซโคลนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ขนาดตัด (x_{50}) ของอนุภาคจะมีขนาดเล็กตามไปด้วย นั่นหมายถึง ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคดียิ่งขึ้นในแง่ของขนาด และเมื่อขนาดตัดของอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง ไฮโดรไซโคลนจะสามารถแยกมวลได้ปริมาณมากขึ้น

2. การลดอัตราการจ่ายเข้าและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (Overflow) จะทำให้ขนาดตัด (x_{50}) เล็กลงแต่ความดันลด (Δp) เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องท่อจ่ายเข้าที่เหมาะสมโดยที่ขนาดตัดและความดันลดน้อยที่สุด ควรมีค่า $D_i = \frac{D_c}{3.5}$ และ $D_o = \frac{D_c}{3}$

3. การเพิ่มความยาวของท่อขึ้นสำหรับช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กจะลดลง ความยาวที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน แต่ควรมีช่วงระหว่าง $\frac{D_c}{2.5}$ ถึง $\frac{D_c}{3}$ ความหนาของผนังด้านนอกที่ฐานของ Vortex finder ควรหนากว่าส่วนปลายเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

4. ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดยาว ทำให้มีอัตราการจ่ายเข้าสูง โดยไม่คำนึงถึงสัดส่วนความยาวของส่วนทรงกรวยและทรงกระบอก อีกทั้งยังไม่ส่งผลต่อขนาดตัดเมื่อความดันคงที่ แต่มุมกรวยที่เล็กอาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายกรวยได้

5. ช่องท่อจ่ายเข้าควรมีผนังเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลน

6. เมื่อมีของแข็งที่จะสามารถกักร่อนได้อยู่ภายในของผสมที่จะจ่ายเข้า ควรมีการป้องกันการกักร่อนที่บริเวณฐานของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และส่วนปลาย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon)

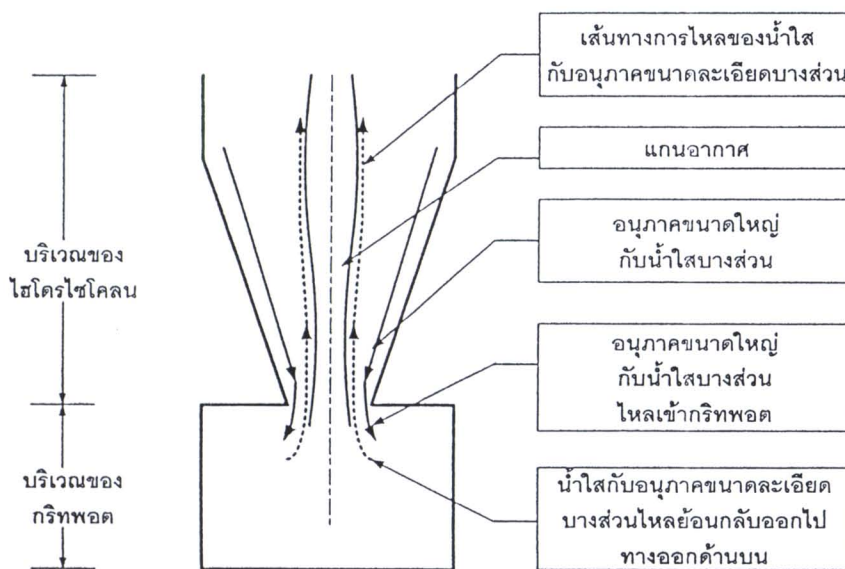
2.3 ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอต (Hydrocyclone equipped with Grit pot)

กริทพอตทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็กโดยจะติดตั้งอยู่ที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลน ซึ่งอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลนจะไหลออกทางด้านล่างและเข้าสู่กริทพอตและจะตกตะกอนอยู่ภายในจนกระทั่งเวลาผ่านไประยะหนึ่งอนุภาคของแข็งจะสะสมอยู่ภายในจนถึงระดับสูงสุดที่กริทพอตจะรับได้จึงปล่อยออก (Drain off) แล้วนำไปบำบัดต่อไป แต่ในกรณีถ้าอนุภาคของแข็งที่สะสมอยู่ภายในกริทพอตมีความเข้มข้นมากจะทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ๆ ที่ไหลผ่านช่องทางออกด้านล่างมา จึงทำให้อนุภาคของแข็งไหลออกไปยังทางออกด้านบน เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนลดต่ำลง ดังนั้นเวลาที่ใช้กักเก็บตะกอนของกริทพอตจึงขึ้นอยู่กับเวลาที่ต้องปล่อยตะกอนเข้มข้นของอนุภาคของแข็งต่อไป ความเข้มข้นที่จ่ายเข้า ลักษณะสมบัติในการตกตะกอนของอนุภาคของแข็งและตัวแปรทางกายภาพอื่นๆ

Puprasert และคณะ, 2004 ได้ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนที่ทำการติดตั้งกริทพอตบำบัดน้ำฝนไหลนอง (Run off water) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจะต่ำกว่า

ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่ไหลออกทางด้านล่างเพิ่มมากขึ้น

การไหลภายในกริฟฟอตสามารถอธิบายได้โดย Hass และ Bradley, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) บริเวณส่วนบนของกริฟฟอตนั้นการไหลเข้ากริฟฟอตจะเท่ากับการไหลย้อนกลับจากกริฟฟอตเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน การไหลย้อนกลับจะไหลผ่านช่องแคบรอบแกนอากาศ ทำให้อนุภาคนาเล็กไหลย้อนกลับไปในไฮโดรไซโคลน และอนุภาคที่เหลือยู่ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนอยู่ภายในกริฟฟอตดังแสดงในรูปที่ 2.10

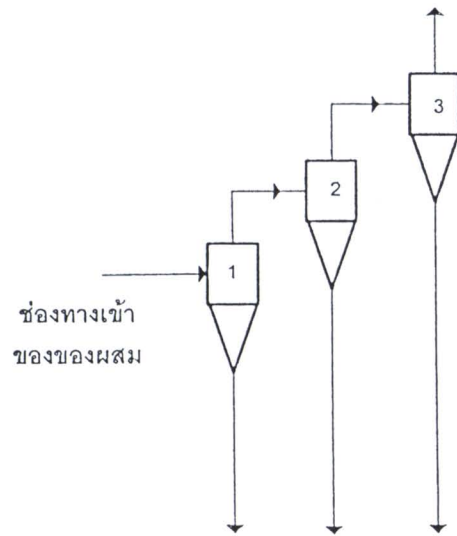


รูปที่ 2.10 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริฟฟอต

Hass และคณะ, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) ยังกล่าวอีกว่า อัตราส่วนความเข้มข้นสามารถตรวจสอบได้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นภายในกริฟฟอต และความเข้มข้นของของไหลที่จ่ายเข้า มีค่าสูงถึง 4500 เท่า สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 เมตร และมีขนาดของอนุภาคที่สะสมในกริฟฟอตเฉลี่ย 1 ไมโครเมตร

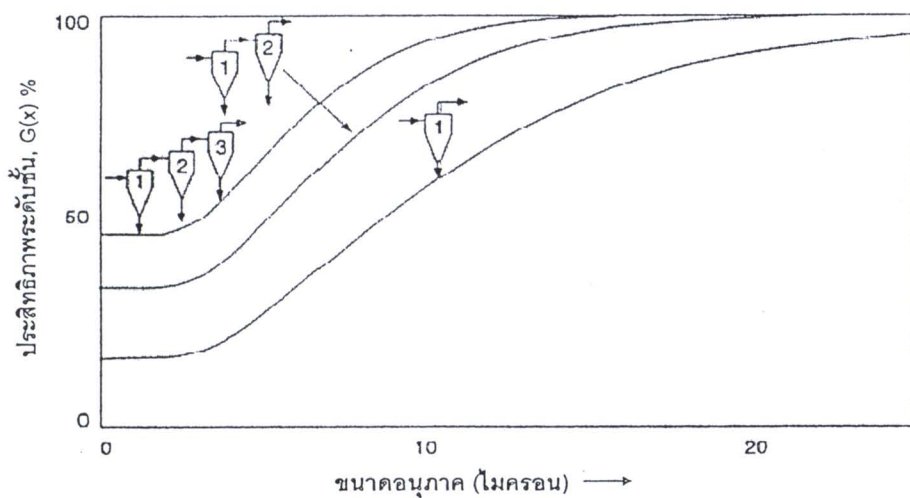
2.4 ไฮโดรไซโคลนที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม (Svarovsky, 2000)

ไฮโดรไซโคลนที่ทำการจัดเรียงแบบอนุกรมนั้น สามารถทำการจัดเรียงอนุกรมได้ทั้งที่ช่องทางออกด้านบน (overflow) ที่ช่องทางออกด้านล่าง (underflow) โดยลักษณะการจัดเรียงนั้นจะขึ้นอยู่กับงานนำไปใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการแยกของแข็งแขวนลอยออกเพื่อให้ได้น้ำใส เพื่อนำไปผลิตน้ำประปา ผู้ทำการวิจัยจึงได้เลือกการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบน ดังรูปที่ 2.11 มาใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลน 3 ตัวแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนแบบทั่วไป
(Svarovsky, 2000)

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนนั้นทำให้ขนาดตัดเล็กลงได้ ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนไฮโดรไซโคลนในการจัดเรียงแบบอนุกรมก็จะสามารถแยกอนุภาคเพิ่มขึ้นได้อีก ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพระดับชั้นของไฮโดรไซโคลน 1 ตัว 2 ตัว และ 3 ตัว ที่จัดเรียงแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบน (Svarovsky, 2000)

2.5 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน (Separation Efficiency)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวในไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอาจมีอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำหลุดออกไปกับน้ำใสที่ทางออกด้านบนและมีของเหลวหลุดออกไปพร้อมกับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงที่ทางออกด้านล่างเสมอ การศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนสามารถทำในสองแนวทาง โดยแนวทางแรกจะทำในกรณีของการแยกมวลของของแข็ง ซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) แนวทางที่สองจะกล่าวในกรณีของขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลน

2.5.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพรวม คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว โดยพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow) กับปริมาณของอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed in) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.20)$$

โดยที่ $M_u = Q_u \cdot C_u$ (2.21)

$$M = Q_f \cdot C_f \quad (2.22)$$

เมื่อ	E_T	คือ ประสิทธิภาพรวม
	M_u	คือ มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านล่าง (มวลต่อเวลา)
	M	คือ มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (มวลต่อเวลา)
	Q_u	คือ อัตราการไหลที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (ปริมาตรต่อเวลา)
	Q_f	คือ อัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (ปริมาตรต่อเวลา)
	C_u	คือ ความเข้มข้นของผลที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)
	C_f	คือ ความเข้มข้นของผลที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของผลที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow) เท่ากับความเข้มข้นของผลที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed in) แสดงว่าไม่เกิด

การแยกอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน เพียงแต่เกิดการแบ่งการไหล (Flow split) ออกเป็นสองทางเท่านั้น ดังนั้น ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลนควรมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$C_u = C_f \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.20)

$$E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_u \cdot C_u}{Q_f \cdot C_f} \quad (2.24)$$

แทน $C_u = C_f$ ในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$E_T = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.25)$$

เมื่อทำการแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Q_u) หารด้วยอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Q_f) พบว่ามีค่ามากกว่าศูนย์ ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน (E_T) จึงไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนอย่างแท้จริงได้ ดังนั้นจึงมีการนิยามประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ซึ่งเรียกว่า ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

2.5.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

ประสิทธิภาพลด คือ ประสิทธิภาพที่ใช้ในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากจุดประสงค์ของการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลนนั้นต้องการให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดไหลออกไปยังทางออกด้านล่าง (Underflow) และมีเพียงน้ำใสไหลออกไปยังทางออกด้านบน (Overflow) แต่ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ เพราะจะมีส่วนของของเหลวไหลออกมายังช่องทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้นจึงต้องนำสัดส่วนของของเหลวมาคำนวณประสิทธิภาพด้วย ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) น้อยลงและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เป็น ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ในการบ่งบอกประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนมากกว่าประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สามารถแสดงได้จากสมการ

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2.26)$$

เมื่อ E'_T คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลน

E_T คือ ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน

R_f คือ อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ระหว่างอัตราการไหลที่ไหลออกทางด้านล่างและอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (R_f) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.27)$$

ในกรณีที่ $C_u = C_f$ ดังที่กล่าวไปแล้วในสมการที่ (2.23) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$

แทน $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$ ในสมการที่ (2.26) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{E_T - E_T}{1 - E_T} = 0 \quad (2.28)$$

ดังนั้นในการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน ควรใช้การคำนวณหาประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แทนการใช้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) เพื่อการคำนวณที่ถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า

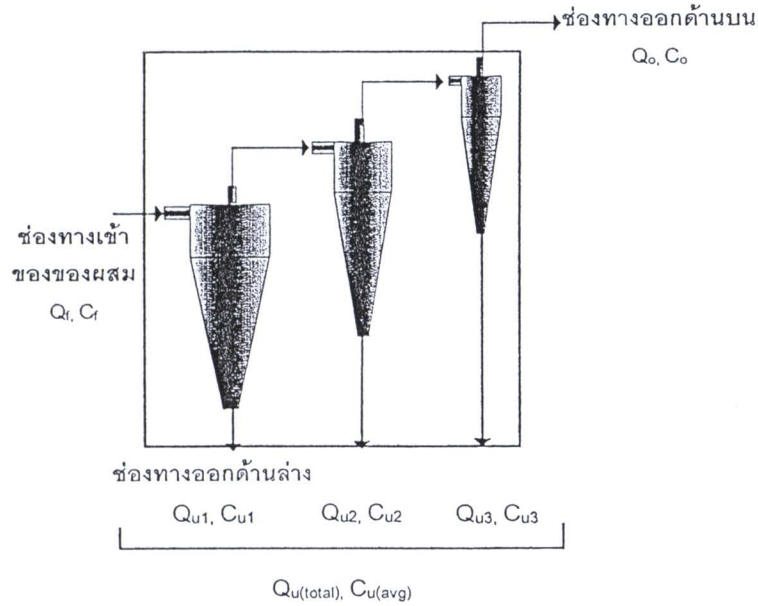
2.5.3 การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน

2.5.3.1 ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด

ในการหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด สามารถคำนวณได้จากสมดุลมวล (Mass balance) โดยในการคำนวณจะมองไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเป็นเสมือนมีไฮโดรไซโคลนตัวเดียว กล่าวคือ มีทางเข้า 1 ช่องทาง ทางออกด้านล่างรวม 1 ช่องทาง และทางออกด้านบน 1 ช่องทาง

จากสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดดังรูปที่ 2.13 จะได้ว่า

$$Q_f Q_f = Q_o C_o + Q_{u(total)} C_{u(avg)} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.13 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

จากสมการที่ (2.26) ประสิทธิภาพผล $E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$

เมื่อ $E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_{u(total)} C_{u(avg)}}{Q_f C_f}$ และ $R_f = \frac{Q_{u(total)}}{Q_f}$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (2.26) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{Q_{u(total)} (C_{u(avg)} - C_f)}{C_f (Q_f - Q_{u(total)})} \quad (2.30)$$

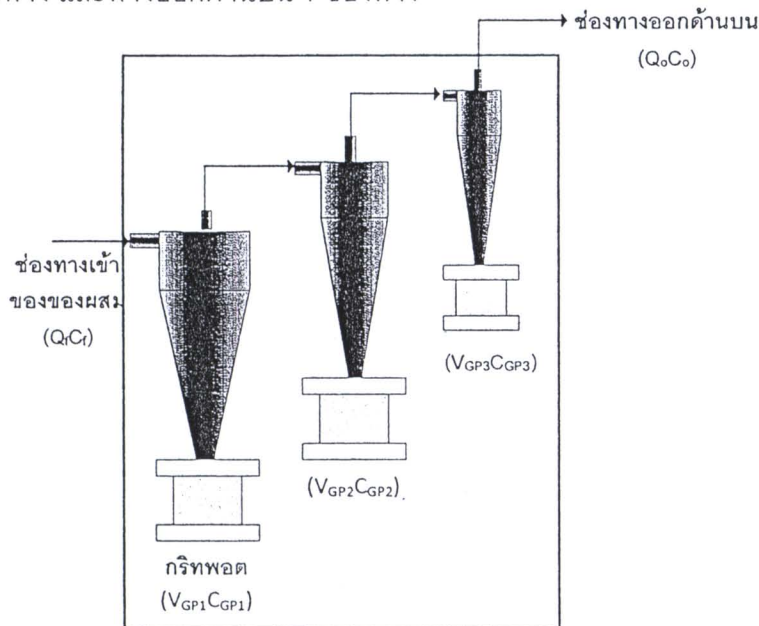
เมื่อ $Q_f - Q_{u(total)} = Q_o$

ดังนั้น ประสิทธิภาพในการแยกของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด (E'_T) แสดงได้ดังสมการ

$$E'_T = \frac{Q_{u(total)} (C_{u(avg)} - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (2.31)$$

2.5.3.2 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอด

ในการหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริพอด สามารถได้จากสมดุลมวล (Mass balance) เช่นกัน โดยในการคำนวณจะมองไฮโดรไซโคลแบบอนุกรมเป็นเสมือนมีไฮโดรไซโคลตัวเดียว กล่าวคือ มีทางเข้า 1 ช่องทาง ทางออกด้านล่าง รวม 1 ช่องทาง และทางออกด้านบน 1 ช่องทาง



รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอด

จากสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริพอด ดังรูปที่ 2.14 จะได้ว่า

$$Q_f C_f T = Q_o C_o T + (V_{GP1} C_{GP1} + V_{GP2} C_{GP2} + V_{GP3} C_{GP3}) \quad (2.32)$$

$$(V_{GP1} C_{GP1} + V_{GP2} C_{GP2} + V_{GP3} C_{GP3}) = Q_f C_f T - Q_o C_o T \quad (2.33)$$

เมื่อ T คือ เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่างจากกริพอด

V_{GP} คือ ปริมาตรของกริพอด

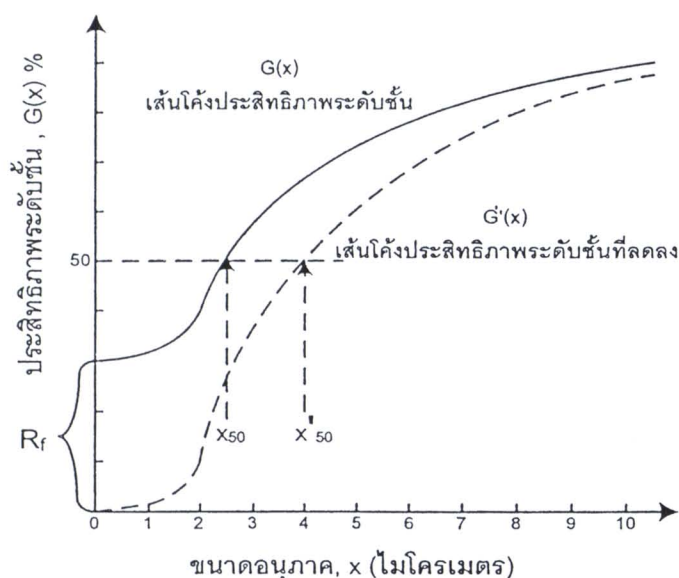
C_{GP} คือ ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งในกริพอด

ดังนั้นประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริพอด หรือประสิทธิภาพรวม (E_T) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \quad (2.34)$$

2.5.4 ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency)

ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency) มีความหมายคล้ายคลึงกับประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) เพียงแต่ประสิทธิภาพรวมหรือประสิทธิภาพผลจะหมายถึงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเพียงขนาดเดียว ส่วนประสิทธิภาพระดับชั้นเป็นการนำค่าประสิทธิภาพของทุกขนาดมาทำเป็นกราฟ ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Svarovsky, 1984)

การสร้างเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) สามารถสร้างได้จากการทดลอง 2 วิธี ดังนี้ วิธีแรกคือ การจ่ายของแข็งที่มีชนิดและขนาดอนุภาคขนาดเดียว (Monosized solids) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนหลายๆ ครั้ง หรือ วิธีที่สองซึ่งประหยัดและเร็วกว่าการทดลองวิธีแรก คือการจ่ายของแข็งที่มีการกระจายของอนุภาคหลายขนาดตามต้องการ โดยทั้งสองวิธีทดลองต้องมีการวัดเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของอนุภาคแต่ละขนาด ในกรณีที่สองจะต้องมีการนำการกระจายของอนุภาคของการไหลออกสู่ด้านบนและทางออกด้านล่างไปทำการวิเคราะห์ด้วย ดังนั้นการทำสมดุลมวล (Mass balance) ของการไหลทั้ง 3 ทิศทาง สามารถนำไปคำนวณสมการพื้นฐานของประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency, $G(x)$) ได้ดังนี้

$$G(x) = E'_T \cdot \frac{dF_u(x)}{dF_f(x)} \quad (2.35)$$

$$G(x) = 1 - (1 - E_T) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_f(x)} \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{G(x)} = 1 + \left(\frac{1}{E_T} - 1 \right) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_u(x)} \quad (2.37)$$

- เมื่อ $G(x)$ คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve)
 E'_T คือ ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)
 $F_f(x)$ คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของของที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (%)
 $F_u(x)$ คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของของที่ทางออกด้านล่าง (%)
 $F_o(x)$ คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของของที่ทางออกด้านบน (%)

จากสมการข้างต้นทั้ง 3 สมการ สามารถคำนวณหรือแสดงผลของประสิทธิภาพระดับชั้น (ในแต่ละขนาดอนุภาค) ออกมาได้ในรูปแบบของกราฟ ซึ่งการแสดงผลในรูปแบบของกราฟจะมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณ

ในการหาประสิทธิภาพระดับชั้น ของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนจะต้องเป็นชนิดเดียวกันเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น และควรเลือกใช้วัสดุที่ไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Non-flocculating) และมีการกระจายตัวออกจากกันได้ง่าย (Easily dispersed)

2.5.5 ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency)

ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency) จะคำนึงถึงผลที่ได้จากการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) เช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4.2 นั่นคือ มีการนำอัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล ($R_f = \frac{Q_u}{Q_f}$) มาคำนวณด้วย ดังรูปที่ 2.15

ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency) ในแต่ละขนาดอนุภาค หาได้จาก

$$G'(x) = \frac{G(x) - R_f}{1 - R_f} \quad (2.38)$$

- เมื่อ $G'(x)$ คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง
 $G(x)$ คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น
 R_f คือ อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล

2.5.6 ขนาดตัด (cut size)

ขนาดตัดของไฮโดรไซโคลอน คือ ขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดตัดสามารถหาได้จากขนาดของอนุภาคที่อยู่บนตำแหน่งของเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) บนแกน x เรียกว่า x_{50} ดังนั้นขนาดตัดจึงเป็นตัววัดประสิทธิภาพในแง่ของขนาดอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้ มีบางไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ขนาดถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นขนาดตัดเมื่อต้องการให้อนุภาคที่แยกได้มีขนาดเล็กๆ แต่โดยทั่วไปที่ยอมรับกันจะอยู่ที่ขนาด 50 เปอร์เซ็นต์ ที่จะถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลอน ซึ่งอนุภาคที่ถูกแยกออกจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และ/หรือหยาบ ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กและ/หรือละเอียด ที่มีขนาดเล็กกว่า Equiprobable size x_{50} จะไหลออกไปยังทางออกด้านบน

จากรูปที่ 2.15 ตำแหน่ง x_{50} (ขนาดอนุภาคที่ให้ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นตำแหน่งที่ได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) และตำแหน่ง x'_{50} (ขนาดอนุภาคที่ให้ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นตำแหน่งที่ได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency)

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในแง่ของขนาดของอนุภาคของแข็ง (D_{50}) ที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลอนที่ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้กับอนุภาคที่จ่ายเข้า (Feed in) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วย %GE (Granulometric separation efficiency) ในส่วนของการไหลออกทางด้านบน สามารถแสดงได้ดังสมการ (Puprasert, 2004)

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Feed} - D_{50} \text{Overflow}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.39)$$

และในส่วนของการไหลออกทางด้านล่าง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Underflow} - D_{50} \text{Feed}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.40)$$

เมื่อ D_{50} คือ ขนาดของอนุภาคที่อยู่ในส่วนการไหลใดๆ ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. วิธีการผลิตน้ำประปา (การประปาส่วนภูมิภาค, <http://www.pwa.co.th>)

ขั้นตอนในการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปจะประกอบเป็นขั้นตอนต่อไปนี้

1. การสูบน้ำจากแหล่งน้ำดิบ การผลิตน้ำประปาเริ่มจากการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องผ่านการตรวจสอบ วิเคราะห์ และควบคุมคุณภาพของน้ำดิบ

2. ถังกวน ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำดิบ โดยจะผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาว ซึ่งสารละลายสารส้มจะช่วยให้การตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ หรือบางครั้งจะมีการเติมคลอรีน เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นตอนนี้ก่อน

3. ถังตกตะกอน ใช้ในการตกตะกอน ในขั้นตอนนี้จะปล่อยน้ำที่ผสมสารส้มและปูนขาวแล้ว ทำให้เกิดการหมุนวนเวียนเพื่อให้น้ำกับสารเคมีรวมตัวกันจะช่วยให้มีการจับตัวของตะกอนได้ดีขึ้น และจะนำน้ำเหล่านั้นเข้าสู่ถังตกตะกอนขนาดใหญ่ เพื่อทำให้เกิดน้ำนิ่ง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นถัง และถูกดูดทิ้ง น้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4. ถังกรอง สำหรับกรองเพื่อกำจัดตะกอน หรือสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กมากอีกครั้ง และให้มีความใสสะอาดมากขึ้น โดยในการกรองจะใช้ทรายหยาบและทรายละเอียด ซึ่งในขั้นตอนนี้น้ำที่ผ่านการกรองมีความใสมากแต่จะมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ประมาณ 0.2 ถึง 2.0 หน่วยความขุ่น และทรายกรองจะมีการล้างทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพ

5. การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วจะมีความใส แต่อาจจะมีเชื้อโรคเจือปนมากับน้ำ ฉะนั้นจึงต้องทำการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน โดยใช้คลอรีนในอัตราส่วนที่พอเหมาะ เพื่อฆ่าเชื้อโรคแต่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย แล้วนำไปเก็บในถังน้ำใส เพื่อรอการสูบจ่ายต่อไป

6. การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เป็นขั้นตอนที่ต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้ง และการตรวจสอบนี้จะดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับอุปโภคบริโภค

7. การสูบจ่ายน้ำประปา น้ำประปาที่ผลิตมาแล้วนั้น จะต้องให้บริการถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำโดยส่งผ่านไปตามเส้นท่อ ดังนั้นการสูบจ่ายจึงมีความจำเป็น ด้วยการส่งจากหอถังสูงที่สามารถบริการได้ในพื้นที่ใกล้เคียง และในพื้นที่ที่ไกลออกไปหรือมีความสูงมากจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงดันน้ำ เพื่อให้ น้ำประปาสามารถบริการได้อย่างทั่วถึง

2. ลักษณะน้ำดิบ (การประปานครหลวง, www.mwa.co.th)

น้ำดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งแม่น้ำเจ้าพระยาเกิดจากน้ำจากแม่น้ำปิงและแม่น้ำน่านไหลมาบรรจบกัน ที่บริเวณตำบลปากน้ำโพและตำบลแควใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ โดยมีเส้นทางที่ไหลผ่าน ได้แก่ พื้นที่จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานคร และไหลลงสู่ปากอ่าวไทย ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ มีความยาวประมาณ 372 กิโลเมตร น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา จะไหลเข้าสู่สถานีสูบน้ำดิบสำแลซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยามายัง คลองประปาตะวันออก ซึ่งมีลักษณะเป็นคลองดิน เส้นทางของคลองประปาจะผ่านชุมชนและ สิ่งก่อสร้างมากมาย เพื่อส่งน้ำต่อไปยังโรงงานผลิตน้ำ 3 แห่ง โดยให้บริการแก่พื้นที่ทางฝั่ง ตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก ได้แก่ โรงงานผลิตน้ำบางเขน โรงงานผลิตน้ำสามเสน และโรงงานผลิตน้ำธนบุรี

สถานีสูบน้ำดิบสำแลเป็นจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าสู่คลอง ประปาตะวันออก ที่ตำบลสำแล จังหวัดปทุมธานี ห่างจากกรุงเทพ 41 กิโลเมตร ไกลจากปากอ่าว ไทย 90 กิโลเมตร มีปริมาณการสูบน้ำดิบประมาณวันละ 3.8 ล้านลูกบาศก์เมตร และจากการ สอบถามข้อมูลลักษณะน้ำดิบตลอดช่วงปี 2552 พบว่า มีค่าความขุ่นเฉลี่ย 47 เอ็นทียู โดยจาก ข้อมูลช่วงที่มีความขุ่นโดยเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือนกันยายน – ตุลาคม มีค่าประมาณ 88 – 107 เอ็นทียู

3. การศึกษาการแยกอนุภาคของแข็ง – ของเหลว ออกจากกันด้วยไฮโดรไซโคลอน

Pasquier และคณะ (2000) ศึกษาการใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ในการรีดน้ำ (Dewatering) ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Sub-micron)

การทดลองทำโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2.0 และ 3.2 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทาง ออกด้านล่าง (Spigot) 1.0 และ 2.0 มิลลิเมตร ใช้ผงซิลิกา (Silica flour) เป็นของผสม มีขนาด อนุภาคเฉลี่ย 8.5 ไมโครเมตร ความเข้มข้นเฉลี่ยที่จ่ายเข้าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าน้อย เพียงพอที่จะไม่มีผลกระทบต่อความหนืดหรือปริมาตรย้อนกลับ (Volumetric recovery) อย่างมี นัยสำคัญ ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ทางเข้า ที่ช่องทางออกด้านบน และที่ช่องทางออกด้านล่าง จากนั้นนำไปทำให้แห้งเพื่อหาค่าความเข้มข้นของของแข็งต่อไป

จากการทดลอง พบว่า การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder จาก 2 มิลลิเมตร เป็น 3.2 มิลลิเมตร ทำให้สัดส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 12.2 ในขณะที่ค่าของแข็งและปริมาตรย้อนกลับมีค่าลดลงจาก 80.1 เป็น 64.8 เปอร์เซ็นต์ และจาก 15.9 เป็น 5.4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง พบว่า ของแข็งและปริมาตรย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนความเข้มข้นมีค่าลดลง

จากการศึกษาถึงผลกระทบของความดัน พบว่า เมื่อลดความดันเข้า (Inlet pressure) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง 1 มิลลิเมตร จาก 4 บาร์ เป็น 2 บาร์ ทำให้ของแข็งย้อนกลับลดลงเพียง 6.5 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรย้อนกลับเพิ่มขึ้น 9.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนความดันมีผลกระทบต่อของแข็งและปริมาตรย้อนกลับน้อยกว่าการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกอย่างมีนัยสำคัญ

Puprasert. และคณะ (2004) เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและแบบที่ติดตั้งกริพพอด เพื่อใช้ในการบำบัดชั้นต้นของน้ำไหลนอง (run-off water) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการที่ผสมผสานระหว่างไฮโดรไซโคลนและถังตกตะกอนขนาดเล็กเข้าด้วยกัน โดยใช้ กริพพอดทำน้ำที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด

งานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาตามรูปแบบของ Rietema วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 75 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าและทางออกด้านบนขนาด 32 มิลลิเมตร โดยแปลผันเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างขนาด 8 10 และ 12 มิลลิเมตร และแปรผันความดันเข้าตั้งแต่ 1 - 4 บาร์ ส่วนกริพพอดที่นำมาใช้เป็นพลาสติกโปร่งใสทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ปริมาตร 1.2 ลิตร ติดตั้งวาล์วที่ด้านล่างของกริพพอดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 มิลลิเมตร สำหรับปล่อยตะกอนออกมา งานวิจัยนี้ใช้น้ำดิบสังเคราะห์โดยใช้น้ำประปาผสมกับอนุภาคของแข็ง 2 ชนิด คือ microsand และ glass power ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 และ 1.2 ตามลำดับ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 และ 25 ไมโครเมตร ตามลำดับ ใช้ความเข้มข้นของน้ำดิบเท่ากับ 1 และ 3 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการควบคุมกริพพอด คือ 0.5 1 และ 2 นาที

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน 3 แบบ คือ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในแง่ของขนาดอนุภาค (Granulometry separation efficiency) และขนาดตัด, d_c (Cutting diameter)

พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดค่อนข้างสูงประมาณ 70 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา แต่จะมีความเข้มข้นของตะกอนที่ทางออกด้านล่างมากกว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนคือ ขนาดของอนุภาค โดยต่ำถึง 24 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบนี้สามารถแยกอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ได้จำนวนหนึ่ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นของน้ำไหลนอง

นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดกับถังตกตะกอน ที่ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็งเดียวกัน จากการคำนวณโดยใช้สมการกฎของสโตค พบว่าไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด ต้องการพื้นที่น้อยกว่า ซึ่งเหมาะสำหรับในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มความดันจ่ายเข้า

ดังนั้นไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำไหลนอง ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา แต่ให้ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนที่ทางออกด้านล่างมากกว่า และใช้พื้นที่น้อยกว่าถังตกตะกอนอีกด้วย

อัททิพย์ จีรพรชัย (2551) เป็นงานวิจัยระดับการทดลอง โดยใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร และใช้น้ำดิบจริงที่โรงกรองน้ำสามเสน 2 และสถานีสูบน้ำดิบสำแล โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด มาลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา และศึกษาประสิทธิภาพในการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำดิบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนทั้งสองชนิด คือ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการเก็บกักตะกอนในกริพพอด เป็นต้น โดยตัวแปรที่มีผลสำคัญที่สุด คือ ความดันจ่ายเข้า ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ มีผลน้อยอย่างมาก เมื่อนำไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบไปใช้ในการแยกสารแขวนลอยในน้ำดิบ พบว่า ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดมีประสิทธิภาพในการแยกสารแขวนลอยระหว่างร้อยละ 20 ถึง 34 และร้อยละ 8 ถึง 70 ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ เช่น ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน :

1. เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้สามารถแยกของแข็งออกจากของเหลวได้มากขึ้น
2. เมื่อไฮโดรไซโคลนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเล็กกลง จะทำให้สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีขึ้น
3. เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนเล็กกลง ทำให้มวลที่ออกทางด้านล่างมีค่าลดลง

นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ได้มีการนำกริพพอดมาติดตั้งที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ซึ่งกริพพอดจะทำหน้าที่คล้ายดังตะกอนขนาดเล็ก สามารถรวบรวมตะกอนไว้ในกริพพอด ทำให้มีความเข้มข้นของตะกอนที่ช่องทางออกด้านล่างมากกว่าไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

สนธิลักษณ์ สุขะสุคนธ์ (2552) เป็นงานวิจัยระดับการทดลอง โดยใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร แทนที่ถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนดินแดง โดยศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบ ได้แก่ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริพพอด อีกทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลน ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด และถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง โดยประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายในรูปของของแข็งคงตัวของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด มีค่าสูงสุดเท่ากับ 86 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดมีความเข้มข้นของกรวดทรายที่สะสมในกริพพอดโดยเฉลี่ย 6,272 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 200 เท่า ส่วนความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศ มีค่าเท่ากับ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลนมากที่สุด คือ ความดันจ่ายเข้า ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ มีผลน้อยอย่างมาก

4. การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน

Cilliers. และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบต่อการแยกอนุภาคและการรีดน้ำออก (Dewatering) ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในการทดลองใช้ไฮโดรไซโคลนเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2.6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (Spigot) 1.5 มิลลิเมตร และให้ความดันคงที่ที่ 3.5 บาร์ ทำการทดลองโดยใช้ผงซิลิกา (Silica flour) ที่มีขนาดอนุภาค 0.8 6 และ 11 ไมโครเมตร ผสมกับน้ำที่มีอุณหภูมิระหว่าง 10 ถึง 60 องศาเซลเซียส จ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ก็จะเพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การที่ของแข็งกลับคืน (Solid recovery) มีค่ามากขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนการไหลอ้อม (By pass) และการลดลงของขนาดตัด (Cut size)
2. สัดส่วนความเข้มข้น ($\frac{Q_u}{Q_f}$) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของน้ำกลับคืน (Water Recovery) และการเพิ่มขึ้นของของแข็งกลับคืน (Solid recovery)
3. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคขนาดเล็กเฉียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรวบรวมอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร
4. อุณหภูมิไม่มีผลต่อความคมชัดในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน

5. การศึกษาการทำงานของไฮโดรไซโคลนในลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลน

Chu. และคณะ (2002) ศึกษาผลกระทบของรูปทรง พารามิเตอร์ในการดำเนินการ และลักษณะการจ่ายเข้าของการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลน

ในการทดลองนี้ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ของผสมมีสองเฟส คือ น้ำและอนุภาคของแข็งซึ่งประกอบด้วย Polystyrene Polyvinyl chloride และ Quartz มีความหนาแน่น 1.05 1.40 และ 2.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยขนาดอนุภาค ความเข้มข้นของอนุภาคในของผสมที่จ่ายเข้า และความดันเข้าจะแปรผันตามการทดลอง แล้ววิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของอนุภาค (Particle dynamic analyzer, PDA) ในการหาความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวแกนรัศมีของไฮโดรไซโคลน สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

1. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งจะลดลง เมื่อตำแหน่งรัศมีเพิ่มขึ้นและกราฟการกระจายตามแนวแกนจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา
2. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งจะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้นหรือเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ช่องทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น
3. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งลดลง เมื่อความหนาแน่นหรือขนาดของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น
4. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งที่จ่ายเข้าเพิ่มขึ้น
5. ความเร็วตามแนวแกนของอนุภาคของแข็งในการไหลวนภายใน (Inner helical flow) จะมีค่ามากกว่าความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายนอก (Outer helical flow)
6. ความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายในของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของช่องทางออกด้านบนเพิ่มขึ้น และความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายนอกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของช่องทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น

Shah. และคณะ (2006) ศึกษาการทำแบบจำลองการแยกน้ำ (Water split) ในไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำแบบจำลองเพื่อทำนายการแยกน้ำในไฮโดรไซโคล ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) เป็นตัวแปรควบคุม และใช้ความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลเป็นตัวแปรตามที่จะสามารถควบคุมลักษณะการแยกน้ำในไฮโดรไซโคลได้

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน หรือที่เรียกว่า อัตราส่วนกรวย (Cone ratio) ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร อัตราส่วนกรวยมีค่า 0.5 โดยในการทดลองแรกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน คือ 11 และ 22 มิลลิเมตร ตามลำดับ และในการทดลองที่สองใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน คือ 13 และ 26 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่ให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่ พบว่า ถึงแม้ว่าอัตราส่วนกรวยจะเท่ากัน แต่การแยกน้ำในไฮโดรไซโคลนั้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน การแยกน้ำจะลดลง และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง จะทำให้เกิดการแยกน้ำเพิ่มขึ้น

Yang. และคณะ (2004) ศึกษาการทำแบบจำลองสามมิติของไฮโดรไซโคลน เพื่อทำนายการไหลและประสิทธิภาพในการแยกของอนุภาค สำหรับใช้แยกสลัดจ์ในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้ก็เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของไฮโดรไซโคลน ในการทำชั้นสลัดจ์ในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากกระบวนการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันต้องการพื้นที่มากและใช้เวลานานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสลัดจ์มาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำแบบจำลองสามมิติเพื่อทำนายการไหลและประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลนในแง่ของขนาดอนุภาค และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองด้วยของผสมระหว่างน้ำและอนุภาคของแข็ง ที่นำมาจากสลัดจ์ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์ของ Seong-Hwan water purifying plant โดยที่สลัดจ์มีส่วนประกอบของแร่ต่างๆ เช่น หินเขี้ยวหนุมาน (quartz) แร่ไฮดรอลูมิเนียมซิลิเกต (Kaolinite) และหินอัลไบต์ (Albite) อนุภาคของของแข็งมีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาดอนุภาคของของแข็งมีการกระจายตัวตั้งแต่ขนาดเล็กกว่าไมครอน (Sub-micron) จนถึง 100 ไมครอน โดยมีความเข้มข้นของของแข็งที่จ่ายเข้าเท่ากับ 7.46 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของช่องทางเข้า (Feed) อัตราการไหลออกด้านบน (Overflow) อัตราการไหลออกด้านล่าง (Underflow) มีค่าเท่ากับ 49.9 35.0 และ 14.9 กิโลกรัมต่อนาที ตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างในเวลาเดียวกันที่บริเวณทางน้ำเข้า ทางออกด้านบน และทางออกด้านล่าง จากนั้นนำปหาค่าความเข้มข้นของของแข็งและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคทั้ง 3 ตัวอย่าง

จากผลการวิจัยโดยใช้การคำนวณพลังงานจลน์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อเข้าใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน ส่วนค่าความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนทรงกระบอกใกล้กับช่องทางเข้า (Feed inlet) และมีค่าน้อยสุดที่บริเวณใกล้กับช่องทางออกด้านล่าง จากนั้นได้มีการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่ไหลออกด้านล่าง (Underflow) ของแบบจำลองสามมิติและจากการทดลอง โดยผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาดอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่างประมาณ 5 ถึง 45 ไมครอน

สรุปได้ว่าวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถทำนายประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองสามมิติ พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน

แม้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ซึ่งจากการศึกษาตามทฤษฎีแล้วสามารถทำได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของแข็งออกจากของเหลว จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำไฮโดรไซโคลนมาจัดเรียงกันแบบอนุกรม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำไฮโดรไซโคลนมาจัดเรียงแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กออกจากน้ำดิบได้มากขึ้น