

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการไฮบริดของงานวิจัยนี้ ใช้หลักการของกระบวนการต่างๆ ได้แก่ ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอคกูเลชันและการลอยตะกอนมาผสมผสานกัน ดังนั้นจึงต้องศึกษารายละเอียดของทุกกระบวนการดังต่อไปนี้

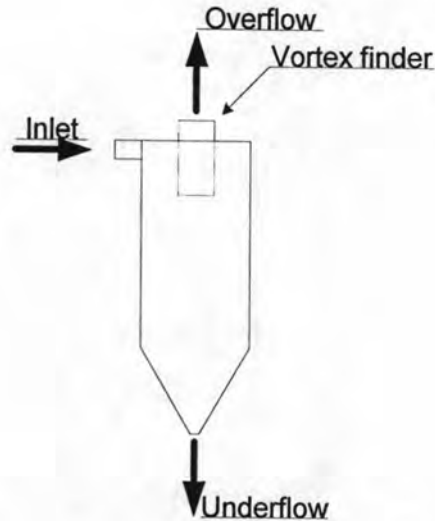
2.1 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมออกจากกันด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เช่น แยกของแข็งออกจากของแข็ง หรือของแข็งออกจากของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว ในการทำงานจะไม่มีส่วนของไฮโดรไซโคลนเคลื่อนไหว ซึ่งแตกต่างจากเครื่องแยกที่เรียกว่า Centrifuge ที่ต้องหมุนเพื่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง อย่างไรก็ตามเครื่องแยกทั้งสองชนิดนี้ใช้หลักการแยกอนุภาคแบบเดียวกันคือการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยที่ของผสมทั้งสองนั้นต้องมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนที่ใช้โดยทั่วไปจะมีเส้นทางการไหลทั้งหมดสามส่วน ดังนี้ (Rushton และคณะ, 2000)

1. น้ำและอนุภาคแขวนลอยที่จ่ายเข้าไป (Feed in)
2. น้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยต่ำจะถูกแยกออกด้านบน (Overflow)
3. น้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยสูงจะถูกแยกออกด้านล่าง (Underflow)

เส้นการไหลทั้งสามส่วน สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทางการไหลทั้งสามส่วนของไฮโดรไซโคลน

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนคือ จ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลน ตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential feed) เพื่อให้เกิดการหมุนเหวี่ยงแล้วแยกการไหลออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนที่ไหลลงด้านล่าง (Underflow) ซึ่งจะนำเอาของแข็งแขวนลอยหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่และ/หรือมีน้ำหนักมากกว่าออกมา พร้อมกับมีน้ำด้วยบางส่วน และส่วนที่แยกไหลขึ้นด้านบน (Overflow) ซึ่งจะนำน้ำที่ใส และอนุภาคที่มีขนาดเล็กและ/หรือมีน้ำหนักเบาออกมา

ภายในไฮโดรไซโคลน การไหลของน้ำมีลักษณะหมุนวน โดยสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ การไหลแบบหมุนวนภายนอก (Primary vortex) และการไหลแบบหมุนวนภายใน (Secondary vortex) ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายนอกดังกล่าว จะหมุนวนอยู่ด้านนอกติดกับผิวของไซโคลนทิศทางลง ซึ่งทำหน้าที่พาอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่และ/หรือมีน้ำหนักมากกว่าไหลออกทางส่วนล่างของไซโคลน ในทางกลับกันการไหลแบบหมุนวนภายใน จะหมุนขึ้นด้านบนโดยมีทิศทางการหมุนเดียวกันที่บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน ทำหน้าที่พาน้ำและอนุภาคแขวนลอยที่เล็กและ/หรือมีน้ำหนักเบากว่าขึ้น และไหลออกช่องทางด้านบนซึ่งเรียกว่า Overflow vortex finder และที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนจะเกิดแกนอากาศ (Air core) ขึ้น

ไฮโดรไซโคลนสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งอุปกรณ์ทำใส (Clarifier) และ/หรืออุปกรณ์ทำข้น (thickeners) นั่นคือส่วนการไหลที่แยกออกทางด้านบน (Overflow) เป็นการเจือจางของของแข็งหรืออนุภาคขนาดเล็กละเอียด คือมีปริมาณอนุภาคแขวนลอยน้อยลง ส่วนการไหลที่แยกออกด้านล่างมีความเข้มข้นของของแข็งหรืออนุภาคขนาดหยาบกว่า

ขนาดของไฮโดรไซโคลน โดยทั่วไปมีเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วง 10 มิลลิเมตรถึง 2.5 เมตร ขนาดของอนุภาคที่แยกได้อยู่ในช่วง 2-250 ไมโครเมตร และ อัตราการไหลที่ให้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง

7200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าความดันลด (Pressure drop) ระหว่างช่องทางที่จ่ายน้ำเข้ากับช่องทางที่น้ำไหลออก ซึ่งค่าที่ใช้ในการทำงานอยู่ในช่วง 0.34- 6 บาร์ (Svarovsky, 1984)

การออกแบบท่อที่ให้ของผสมไหลออกทางด้านบน (Vortex finder) มีความสำคัญต่อการไหลลัดวงจรของอนุภาคแขวนลอยภายในไซโคลน (Short-circuit flow) นั่นคือเกิดการไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณภายในช่วงบนของไฮโดรไซโคลน แล้วไหลลัดออกทางออกด้านบน (Overflow) โดยไม่ผ่านการหมุนวนใน Primary และ Secondary vortex ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นการไหลลัดวงจร

ข้อดีของไฮโดรไซโคลนสามารถสรุปได้ดังนี้

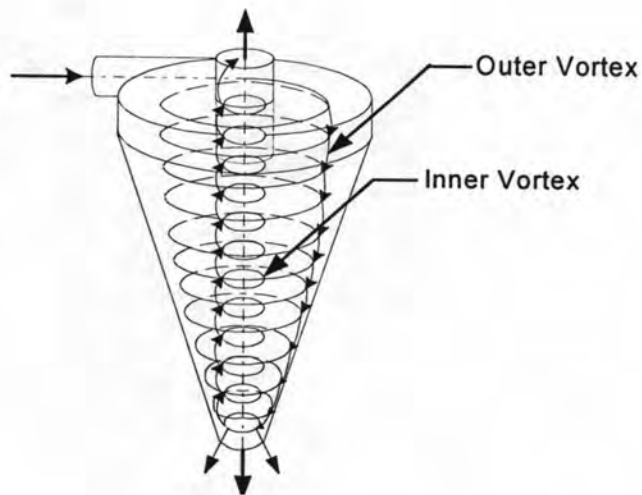
1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายกรณีเช่น ใช้ในการแยกของเหลวออกจากสิ่งเจือปนที่เข้มข้น แยกของเหลวสองชนิดที่ไม่ผสมกัน อีกทั้งยังสามารถแยกก๊าซออกจากของเหลวได้
2. ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ดำเนินการและติดตั้งได้ง่าย ราคาถูก มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง และไม่ต้องการเครื่องมืออื่นๆในการประกอบการทำงานมาก
3. มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกชนิดอื่นๆ จึงประหยัดพื้นที่และใช้เวลากักน้ำน้อย

ข้อเสียของไฮโดรไซโคลนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกขนาดของอนุภาคให้สมบูรณ์ชัดเจนมากได้ มักมีการปะปนของอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคละเอียด หรือมีการปะปนของอนุภาคขนาดเล็กในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดหยาบอยู่เสมอ
2. มีการฟุ้งร่อนของผิวด้านในเนื่องจากแรงกระแทกจากของผสมที่จ่ายเข้าไป อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันได้จากการเคลือบผิวภายใน หรือเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการผลิตตัวเรือนไฮโดรไซโคลน
3. แรงเฉือน (Shear force) ที่มีมากภายในไฮโดรไซโคลน บางครั้งอาจส่งผลเสียโดยการทำให้กลุ่มอนุภาค (Floc) ที่ผ่านจากขั้นตอนฟลอคคูเลชัน (Flocculation) แตกตัวออกจากกัน

2.1.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน (Fluid Flow and Particle Motion in Hydrocyclone)

การบำบัดหรือการแยกสารแขวนลอยด้วยไฮโดรไซโคลน อาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในตัวไซโคลน เส้นการไหลแบบหมุนวนภายในไซโคลน เกิดมาจากการจ่ายของไหลเข้าไปในลักษณะสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไซโคลน



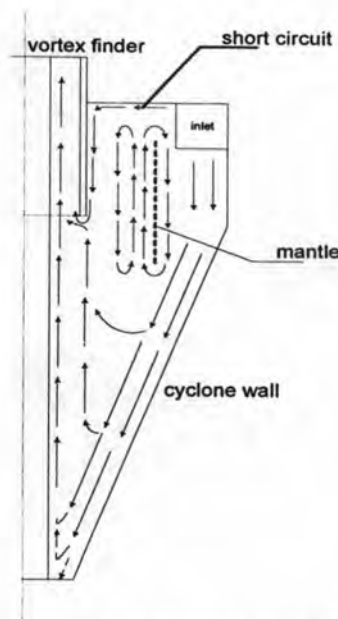
รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไฮโดรไซโคลน

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นรูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่ใช้กันทั่วไป ในส่วนที่เป็นทรงกระบอก จะถูกปิดที่ส่วนบนด้วยตัวครอบ และมีท่อทะลุสำหรับให้ของไหลออกทางด้านบน (Liquid overflow) เรียกว่า Vortex finder มีระยะยื่นออกมาจากตัวไซโคลน สำหรับในส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow) มีลักษณะเป็นช่องเปิดเพื่อให้อนุภาคที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลนไหลออกของไหลจะถูกจ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลน ในลักษณะสัมผัสผิวเส้นรอบวงของไซโคลน ในทางปฏิบัติช่องสำหรับจ่ายของไหลเข้าไปจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลที่จะเข้ามาในไฮโดรไซโคลน

ยกเว้นบริเวณด้านในและบริเวณรอบๆของช่องทางเข้าแบบสัมผัส การเคลื่อนที่ของของไหลภายในตัวไซโคลน เป็นลักษณะสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.2 ของไหลที่ไหลเข้ามาส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในการไหลแบบเกลียววนนอก (Outer vortex หรือ Primary Vortex) ไปสู่ด้านล่างของกรวยและทำให้ของไหล และของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ไหลออกทางช่องเปิดด้านล่าง (underflow) ที่ปลายแหลมของกรวย จากนั้นน้ำใสและของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กบางส่วนไหล

กลับขึ้นมาในแกนกลางของไซโคลน (Inner Vortex หรือ Secondary Vortex) เคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นมาและไหลออกทาง Vortex finder

รูปแบบการเคลื่อนที่ตัดผ่านส่วนบนที่ปิดอยู่ไปที่ฐานของ Vortex finder และเรื่อยไปที่ผนังด้านนอกของท่อ Vortex finder จนไปรวมกับของไหลที่ออกทางออกทางด้านบน (Overflow) โดยไม่ไหลลงมาถึงตัวไซโคลน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ดังรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นรูปของทางออกและการไหลแบบแนวรัศมีในไฮโดรไซโคลนที่ใช้กันทั่วไป ทางส่วนบนของไซโคลนแสดงให้เห็นการไหลแบบลัดวงจร (Short circuit flow) อย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีการไหลวนที่เรียกว่า Mantle ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งทำให้เกิดการแบ่งระหว่างการไหลลงที่บริเวณผิวของกรวยและการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณด้านในใกล้แกนกลางของไซโคลน



รูปที่ 2.3 ภาพการไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน

ลักษณะการไหลที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในไฮโดรไซโคลน ก็คือแกนอากาศ (Air core) ที่อยู่แกนกลางด้านใน แกนอากาศดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการไหลแบบหมุนวน ที่ความเร็วของของไหลสูงทำให้บริเวณแกนกลางมีความดันต่ำ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดเป็นปกติเมื่อมีพื้นผิวของไหลที่หมุนอย่างอิสระภายในทรงกระบอกและวิ่งไปตลอดความยาวของไซโคลน ถ้าทางออกทั้งสองทางหรือทางใดทางหนึ่งต่อออกสู่อากาศโดยตรง แกนกลางของไซโคลนจะดูดอากาศเข้าไปและเกิดเป็นแกนอากาศด้านในแกนของไฮโดรไซโคลน นอกจากนี้แกนอากาศดังกล่าวยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของการไหลแบบหมุนวน (Vortex) หากการไหลแบบหมุนวนดีและทำให้การแยกเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แกนอากาศควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ตลอดความยาวของไซโคลน

2.1.3 ความเร็วของการไหลในไฮโดรไซโคลน (Velocity in hydrocyclone)

เมื่อทำการจ่ายของผสมระหว่างของไหลกับของแข็งเข้าไปภายในไฮโดรไซโคลนในทิศสัมผัสเส้นรอบวง จะส่งผลให้ของผสมในไฮโดรไซโคลนมีความเร็วของของไหล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไซโคลน (Tangential velocity) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity)

2.1.3.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity), V_t

ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของไหลที่จ่ายเข้าไปที่บริเวณทางเข้า มีทิศทางสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน และมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลเข้าและพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้า ดังแสดงในสมการ

$$V_t = \frac{Q}{A_t} \quad (2.1)$$

V_t คือความเร็วที่ออกจากท่อ ณ จุดจ่ายน้ำเข้า
ถ้าคำนวณความเร็วสัมผัสได้ด้วยหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) โดยไม่พิจารณาแรงต้านทาน จะได้

$$V_t R = \text{constant} \quad (2.2)$$

เมื่อ V_t คือความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่รัศมีการหมุนใดๆ

R คือรัศมีการหมุนใดๆ

แต่ในทางปฏิบัติจริง จะมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) จะทำให้ได้ค่าน้อยกว่าสมการข้างต้น ดังนั้น

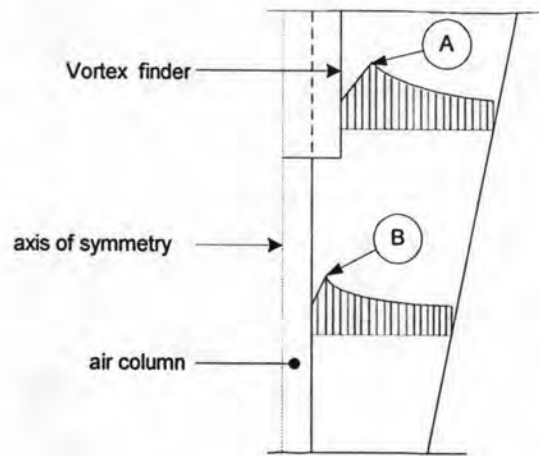
$$V_t R^n = \text{Constant} \quad (2.3)$$

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

องค์ประกอบความเร็วภายในไฮโดรไซโคลนที่สำคัญที่สุดคือ ความเร็วสัมผัสแนวเส้นรอบ

วงไซโคลน และสมการที่ 2.3 ถือเป็นสมการพื้นฐานที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการคำนวณ

จากการทดลองพบว่า ความเร็วสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีการหมุนลดลงเข้าใกล้แกนอากาศ โดย Kesall (1952) ทำการทดลองวัดความเร็วสัมผัส โดยทดลองกับน้ำสะอาดที่มีอุณหภูมิเป็นอะลูมิเนียม (Aluminium) แล้วใช้กล้องไมโครสโคป วัดตำแหน่งที่มีการโปร่งใส ในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ผลดังกล่าวเป็นค่าความเร็วสัมผัสของไฮโดรไซโคลน เฉพาะในส่วนที่เป็นกรวย ไม่รวมในส่วนที่เป็นทรงกระบอก



รูปที่ 2.4 การกระจายความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงภายในไฮโดรไซโคลน (V_y)

จากรูปที่ 2.4 ความเร็วสัมผัสในแนวเส้นรอบวงของไซโคลน (Tangential velocity) จะสูงขึ้นเมื่อรัศมีของไซโคลนลดลง ตามสมการที่ 2.3 แต่บริเวณรอบๆ Vortex finder ไม่สามารถใช้สมการนี้อธิบายได้ โดยที่ระดับเหนือขอบ Vortex finder ขนาดรัศมีที่ทำให้ความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุด มีค่าใหญ่กว่ารัศมีของ Vortex finder ที่จุด A ตามรูปที่ 2.4 และตำแหน่งที่ความเร็วสัมผัสสูงสุดน้อยกว่ารัศมีของ Vortex finder ที่จุด B ตามรูปที่ 2.4 จากปรากฏการณ์นี้ แสดงให้เห็นว่าความเร็วสัมผัสไม่ขึ้นกับตำแหน่งในแนวแกนของไซโคลน

2.1.3.2 ความเร็วในแนวแกน (Axial velocity)

ความเร็วในแนวแกน คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การไหลในส่วนที่หมุนวนด้านนอก (Outer vortex) ที่ลดลงและการไหลหมุนวนภายใน (Inner vortex) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วในแนวแกนกับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity) หรือ LZVV ตำแหน่งดังกล่าวอยู่ระหว่างการไหลแบบ

2.1.4 กฎของสโตค (Stoke's law)

กฎของสโตค เป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการหาความเร็วในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการและอุปกรณ์การแยกต่างๆ เช่น ถังตกตะกอน กฎของสโตคมีสมมติฐานว่าอนุภาคที่แขวนลอยมีรูปร่างเป็นทรงกลม และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา เช่นถังตกตะกอน ความเร่งโน้มถ่วงของโลกจะทำให้อนุภาคตกตะกอนลง ซึ่งการเคลื่อนที่ลงของอนุภาคจะมีแรงต้านในทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่าแรงลาก (Drag force) และแรงต้านจากความหนืดของของเหลว (Viscosity) สำหรับแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่ออนุภาคนั้น สามารถหาได้จากความหนาแน่นของอนุภาค เนื่องจากหากมีความหนาแน่นมาก ก็ทำให้แรงกระทำต่ออนุภาคมากตามไปด้วย

ซึ่งการหาความเร็วการแยกอนุภาคออกนั้นเพื่อ สามารถใช้ในการทำความเข้าใจกระบวนการแยก และบอกถึงความเป็นไปได้ในการแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากน้ำ

สมการกฎของสโตค (Stoke's law equation)(Metcralf และ Eddy, 2003)

$$v_p = \frac{g(\Delta\rho)d_p^2}{18\mu} \quad (2.4)$$

v_p คือความเร็วการตกตะกอน (Terminal velocity) เมตรต่อวินาที

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ

9.81 เมตรต่อวินาที²

$\Delta\rho$ คือความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density)

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) เมตร

μ คือความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity)

นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร

จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อความเร็วในการแยกอนุภาค มีต่างๆดังนี้

1. ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โดยทั่วไปแล้วการแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกจะใช้กันมากในถังตกตะกอนในขั้นตอนการบำบัดน้ำ สำหรับเครื่องมือการแยกอื่นๆ สามารถทำการเพิ่มความเร่งนี้เพื่อให้ค่าความเร็วการตกตะกอน (v_p) เพิ่มขึ้นได้ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของความเร่งภายในไฮโดรไซโคลอนกับความเร่งโน้มถ่วงสามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert, 2004; McCabe, Smith และ Harroitt, 1993)

$$\zeta = \frac{v_y^2}{R \cdot g} \quad (2.5)$$

V_y คือ ความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน

R คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลอน (บริเวณที่เป็นทรงกระบอก)

2. ความแตกต่างความหนาแน่นของเฟสทั้งสอง ($\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญสำหรับกฎของสโตคที่ทำการแยกเฟสทั้งสองออกจากกัน ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอน หากเฟสทั้งสองไม่มีความแตกต่างความหนาแน่น ($\Delta\rho = 0$) ทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาค (v_p) มีค่าเป็นศูนย์ด้วย แสดงว่าไม่สามารถทำการแยกเฟสทั้งสองออกจากกันได้ ดังนั้นการแยกด้วยไฮโดรไซโคลอนจะเกิดขึ้นได้ต้องมีความแตกต่างความหนาแน่นของเฟสทั้งสอง

3. ความหนืดของของไหล (μ) ส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค (v_p) หากค่าความหนืดของของไหลสูง จะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความหนืดของของไหลมีค่าต่ำ ส่งผลให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง และความหนืดยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหลอีกด้วย โดยถ้าหากอุณหภูมิสูงทำให้ความหนืดของของไหลต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ค่าความเร็วในการแยกอนุภาคสูงควรให้ของไหลมีความหนืดต่ำและอุณหภูมิสูง

4. ขนาดของอนุภาคของแข็ง (d_p) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ตัวแปรนี้อยู่ในรูปยกกำลังสอง แสดงให้เห็นว่าถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ ทำให้ความเร็วในการแยก (v_p) เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถทำการเพิ่มขนาดของอนุภาคของแข็งได้ จะทำให้การแยกด้วยไฮโดรไซโคลอนเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น

2.1.5 ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลอน (Svarovsky, 1984)

2.1.5.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน

เส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลอน วัดที่ฐานของส่วนที่เป็นกรวยหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (Cut size) โดยให้อัตราการไหลคงที่ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) และความดันลด (Δp) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลอน (D_c) เป็นดังนี้

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2.6)$$

$$\Delta p \propto D_c^y \quad (2.7)$$

โดยที่ x มีค่าอยู่ในช่วง 1.36-1.52 และ y มีค่าอยู่ในช่วง -3.6 ถึง -4.1 จะเห็นว่า ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนเล็กๆ จะทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่แยกออกมาได้เล็กตามไปด้วย และเมื่อไซโคลนขนาดใหญ่ขึ้น ค่าความดันลดมากขึ้นเช่นกัน

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 นั้น เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลคงที่ ตามปกติแล้วสามารถใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวต่อกันโดยที่ให้อัตราการไหลเท่ากันภายใต้สภาวะที่ความดันลดคงที่ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน ที่ความดันลด (Pressure drop) คงที่เป็นดังนี้

$$Q \propto D_c^2 \quad (2.8)$$

โดยที่ z มีค่าอยู่ในช่วง 1.8 ถึง 2.0 และความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) กับเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนที่ความดันลดคงที่ เป็นดังนี้

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2.9)$$

โดยที่ x คราวนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.41 ถึง 0.5

แสดงให้เห็นว่า เมื่อลดเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลนลง ขนาด d_{50} ลดลงเช่นกัน หมายถึงไฮโดรไซโคลนสามารถคัดแยกอนุภาคขนาดเล็กลงไปได้อีก

2.1.5.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล (Aperture diameters)

ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของไฮโดรไซโคลนนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องการไหลมีความสำคัญมากสำหรับไฮโดรไซโคลน โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลต่างๆประกอบไปด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายเข้า (Feed: D_f) ช่องทางออกด้านบน (Overflow : D_o) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow : D_u) โดยที่ขนาดของ D_f และ D_u จะใช้ควบคุมขนาดอนุภาคในการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน และใช้ควบคุมความดันลด ส่วนขนาด D_o ใช้ควบคุมสัดส่วนอัตราการไหล (Flow split ratio)

ขนาดของช่องจ่ายเข้า (D_f) ควรจะทำให้อัตราโมเมนต์ (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงที่สุด การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้า ทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงจะลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงที่สุดนี้เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับไซโคลน

ขนาดของช่องจ่ายเข้า (D_i) ควรจะทำให้อัตราโมเมนต์ (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงที่สุด การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้า ทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงจะลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดนี้เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับไซโคลนนั้นๆ และจะทำให้ความเร็วเฉลี่ยที่ช่องทางเข้าเท่ากับความเร็วสัมผัส (Tangential velocity) ที่รัศมีเฉลี่ยของทางเข้า (Mean radius of entry) (Bradley, 1965)

มีงานวิจัยมากมาย ที่รายงานขนาดที่เหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้า (D_i) แต่ค่าที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับและใช้กันทั่วไปแสดงโดย Chaston คือ $D_c/6$ ถึง $D_c/7$ (Chaston, 1958 อ้างถึงใน Bradley, 1965) โดยที่ D_c คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางจ่ายเข้า (D_i) สาเหตุที่สำคัญมี 2 กรณี คือ การไหลลัดวงจร (Short-circuit flow) ซึ่งไหลผ่านวงบนของไซโคลนและไหลลงที่ผนังด้านนอกของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และผลกระทบที่ตำแหน่งเส้นความเร็วเป็นศูนย์ (Locus of zero vertical velocity) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การไหลลัดวงจร ซึ่งคือลักษณะการไหลที่นำอนุภาคหยาบไหลออกจากทางออกด้านบน (Overflow) เกิดจากผลการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องด้านบนมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วสัมผัสสูงสุด อนุภาคที่อยู่ในเส้นการไหลลัดวงจร จะไหลกลับเข้ามาในบริเวณของการเพิ่มความเร็วสัมผัสภายในไซโคลน และเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้เกิดการไหลไปตามขอบด้านล่างของ Vortex finder ซึ่งจะให้มีโอกาสที่จะเข้ามาแยกออกจากของไหลในไซโคลนได้อีก ในทางตรงกันข้ามถ้ารัศมีด้านนอกของ Vortex finder หรือช่องทางออกด้านบนมีขนาดเล็กกว่าตำแหน่งที่ความเร็วสัมผัสสูงสุด โอกาสที่อนุภาคจะถูกหมุนเหวี่ยงแยกในไซโคลนก็น้อยลงไปด้วย ดังนั้นหากเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Overflow หรือ vortex finder) ลดลง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลงด้วย

ในกรณีขนาดของช่องทางออกด้านบน (D_o) ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZVV (Locus of Zero Vertical Velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วภายในไฮโดรไซโคลนเป็นศูนย์ โดยมีขนาดประมาณ 4.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน ($4.3 D_c$) เป็นเหตุให้ลักษณะการไหลที่ควรเป็นตามปกติลดลงในการไหลตามแนวรัศมี ทำให้อนุภาคไหลแยกออกไปทางด้านบนโดยไม่ผ่านลงมาที่ตัวไซโคลนเกิดเป็นการไหลลัดวงจร

Bradley (1965) แนะนำว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุด สามารถพิจารณาจากลักษณะการไหล โดยค่ามากที่สุดเท่ากับ $D_c/2.3$ ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ $D_c/8$ สำหรับค่าที่ทำให้มีปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ออกที่ช่องทางด้านบนน้อย

ที่สุดมีค่าเท่ากับ $D_c/7$ และขนาดช่องทางออกด้านบน (D_o) ควรจะใหญ่กว่าช่องทางจ่ายเข้า (D_i) อาจะอยู่ในช่วง $D_o = D_i$ ถึง $1.6D_i$ และเพื่อป้องกันการเซาะผนังไซโคลนจากการจ่ายเข้าไป นอกจากนี้ ค่า $2D_i + D_o$ ควรน้อยกว่า D_c สำหรับความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามแสดงดังสมการที่ 2.10

$$2D_i + D_o = 0.4 - 0.6D_c \quad (2.10)$$

สมการความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามสำหรับไซโคลนขนาดเล็กคือ

$$2D_i + D_o = 0.35 - 0.7D_c \quad (2.11)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) โดยมากจะเป็นขนาดที่แปรผันได้ หรือเป็นลักษณะที่ปรับเปลี่ยนได้ ใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลออกด้านล่าง ดังนั้นค่า D_u จึงขึ้นกับลักษณะการใช้งานมากกว่าที่จะกำหนดเป็นค่าตายตัว

ปริมาณอัตราการไหลทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนที่น้อยที่สุด จะเท่ากับปริมาณของแข็งที่แยกออกมารวมกับปริมาณของไหลที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างระหว่างของแข็ง นั่นคือ นอกจากจะขึ้นกับการใช้งานแล้ว ยังขึ้นกับการกระจายขนาดของอนุภาคในเส้นการไหลด้านล่าง (Underflow)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (D_u) ปกติแล้วจะอยู่ในช่วง $D_c/10$ ถึง $D_c/5$ และควรมีค่า $D_u = D_o/3$ เมื่อ $D_o = D_c/5$ ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ซึ่งจะให้ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเข้า (Feed flowrate) กับอัตราการไหลออกที่ช่องทางด้านล่าง (Underflow flowrate) มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง (D_u) อาจถือได้ว่าไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของไซโคลนหรืออาจมีน้อย (Kelsall, 1960 อ้างถึงใน Bradley 1965) ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลงเล็กน้อยเมื่อ D_u ลดลง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความดันลดสำหรับไซโคลนขนาดใหญ่ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางต่างๆ ใหญ่ตามไปด้วย ส่วนไซโคลนขนาดเล็ก จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาด D_u เมื่อ D_u มีค่าประมาณ $D_c/7$

2.1.5.3 ความยาว ขนาดและรูปร่างของช่องน้ำออกด้านบน (Vortex finder dimensions)

Vortex finder เป็นช่องทางที่ให้น้ำไหลออกทางด้านบน (Overflow) และป้องกันการไหลล้นด้วย โดยอนุภาคจะไหลลงที่ผิวด้านบนของ Vortex finder และไหลลงไปในส่วนของตัวเรือนไซโคลน ความยาวของ Vortex finder นี้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลนในแง่ของขนาดตัด (d_{50}) โดยการเพิ่มความยาว Vortex finder จะทำให้อนุภาคมีโอกาส (เวลา) อยู่ในไฮโดรไซโคลนมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการคัดแยกอนุภาคขนาดหยาบ ในทางตรงกันข้าม ในส่วนของอนุภาคขนาดเล็กซึ่งควรจะไหลไปออกที่ทางออกด้านบน (Overflow) กับน้ำใส กลับย้อนมาออกที่ส่วนปลายของไซโคลน และการเพิ่มความยาว Vortex finder ทำให้อนุภาคมีเวลาในการแยกภายในตัวไซโคลนน้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพลดลง

ดังนั้น ความยาว Vortex finder ที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของกลุ่มอนุภาคที่จ่ายเข้าไปและจุดตัด (Cut-point) ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายขนาดนั้นๆ

เนื่องจากความยาวของ Vortex finder ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ในแง่ของขนาดตัด (d_{50}) ซึ่งจะลดลงเมื่อความยาว Vortex finder ลดลง และจะต่ำที่สุดเมื่อไม่มี Vortex finder ภายใต้สภาวะนี้ทำให้การแยกอนุภาคขนาดใหญ่ได้ไม่ดี กล่าวคืออนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวจะออกไปที่ทางออกด้านบน (Overflow) โดยทางเส้นการไหลล้นด้วย แต่มีผลการทดลองที่ให้ผลตรงกันข้ามจากไซโคลนที่ใช้ในโรงงาน โดยใช้ไซโคลนขนาดใหญ่ (24 นิ้ว) ทำการแยกกับของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ด้วยความดันต่ำ พบว่าความยาว Vortex finder ไม่มีผลกระทบต่ออาจอธิบายได้ว่าเกิดจากการที่อนุภาคตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้อนุภาคไหลออกจากเส้นการไหลล้นด้วยจนมาเข้าสู่การไหลแบบปกติภายในไฮโดรไซโคลนได้

ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะนิยามค่าที่เหมาะสมของความยาว Vortex finder โดยปกติจะให้ มีระยะตามแนวแกนของไซโคลนให้พอเพียงระหว่างระดับท้องของช่องทางจ่ายเข้ากับส่วนปลายของ Vortex finder และโดยทั่วไปไม่ควรให้ส่วนปลาย Vortex finder อยู่ที่ระดับเดียวกับท้องท่อจ่ายเข้า อีกทั้งไม่ควรให้มีระดับอยู่ใกล้กับบริเวณหน้าตัดที่ต่อระหว่างส่วนทรงกระบอกและส่วนกรวย เนื่องจากทั้งสองบริเวณนี้มีการกระจายปั่นป่วน อาจทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ปั่นไปที่ทางออกด้านบน (Overflow) ได้

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผนังด้านบนของ Vortex finder มีความสำคัญเช่นกัน จากที่กล่าวไปแล้วว่า สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลงเมื่อมีการลดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (D_o) เนื่องมาจากการไหลล้นด้วย กับตำแหน่งที่มีความเร็วสัมผัสแนวเส้นรอบวงของไซโคลนสูงสุดในตัวไซโคลนนั้น ยังปรากฏพบข้อดีของการลดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (D_o) เมื่อควบคุมให้ผนังด้านบนของ Vortex finder ใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วสัมผัสสูงสุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงไม่ควรเกิน $D_c - 2D_i$ โดย Rietema แนะนำว่าค่าความหนาของผนังไม่ควรเกิน

1/10 ของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของช่องทางออกด้านบน หรือ Vortex finder (Rietema, 1961 อ้างถึงใน Bradley, 1965)

2.1.5.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน (Body dimension)

ไซโคลนจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆคือส่วนที่เป็นทรงกระบอกและส่วนที่เป็นกรวย และอาจมีส่วนประกอบอื่นๆเพิ่มเข้ามา การเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของไซโคลนนั้นมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเกิดการทำให้ไซโคลนแบบไม่มีส่วนทรงกระบอก หรือการทำไซโคลนขนาดเล็กโดยไม่มีส่วนกรวยเช่นกัน อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการเปลี่ยนหน้าตัดต่อไซโคลนที่มีมุมกรวยเล็กๆ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังคงมีการทำส่วนกรวยเอาไว้เพื่อช่วยในแง่เชิงการผลิตไซโคลน ซึ่งความยาวของส่วนกรวยโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง $2/3D_c$ ถึง D_c

การเพิ่มความยาวทั้งหมดของไซโคลน คือการเพิ่มความยาวของส่วนกรวยหรือการลดมุมกรวยของไซโคลนอย่างใดอย่างหนึ่งนั้น ทำให้ความจุ (Capacity) และประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น (Dahlstrom, 1949 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 116) มีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไซโคลนที่มีมุมกรวย 9 องศาและ 20 องศา ความยาวไซโคลน $9^{9/16}$ นิ้ว กับ $19^{3/8}$ นิ้ว และ $19^{5/6}$ นิ้ว พบว่าที่ความจุเดียวกัน ไซโคลนที่ยาวกว่าจะลดค่าความดันลด (Pressure drop) ลงครึ่งหนึ่ง ในขณะที่เมื่อเพิ่มมุมกรวยจาก 9 องศาเป็น 20 องศา โดยมีความยาวทั้งหมดเท่าเดิม พบว่ามุมไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันลด (Pressure drop) ต่อความจุ (Capacity) แต่อย่างใด นั่นคือ ณ ความดันลดใดๆ เมื่อความยาวมากขึ้นความจุสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของมุมไซโคลน โดยดูที่ค่าประสิทธิภาพระหว่างไซโคลน 9 องศาและ 20 องศา พบว่าไซโคลน 20 องศา ให้ขนาดตัด (d_{50}) เล็กกว่าที่อัตราการไหลเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหล และจากการสังเกตค่า d_{50} ที่เปลี่ยนไป พบว่าที่ค่าความดันลดที่กำหนดไว้ นั้น ไซโคลนมุม 9 องศา จะให้ปริมาณอัตราการจ่ายเข้าสูงกว่าโดยมีประสิทธิภาพการแยกเท่ากัน ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนมุมในช่วง 9 องศา ถึง 20 องศาไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ที่ความดันลดเดียวกัน (Bradley, 1960 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 117)

Dahlstrom (1949 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 118) แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยการเพิ่มความยาวที่อัตราการไหลเดียวกัน ประสิทธิภาพจะเพิ่มโดยการลดมุมกรวย จาก 45 องศา ถึง 15 องศา Rietema (1961 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 118) กล่าวว่า สัดส่วนระหว่างส่วนทรงกระบอกกับส่วนกรวยไม่ควรมากเกินไป โดยแนะนำว่าความยาวทั้งหมด

ของไซโคลนที่เป็นไปได้ควรมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน $(L/D_c) = 5$ และมีมุมกรวยเล็กกว่า 30 องศา

Fontein (1962 อ้างถึงใน Bradley, 1965) แนะนำว่าส่วนกรวยนั้นควรจะสั้นเท่าที่เป็นไปได้ แต่ก็ต้องคงไว้เพื่อสะดวกในการจ่ายของผสมเข้าไป เมื่อคำนึงถึงความยาวของตัวไซโคลน มุมกรวยที่ถือว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 15 องศา แต่ถ้าไซโคลนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 และ 15 มิลลิเมตร) ควรจะมีมุมแหลมประมาณ 9 องศาถึง 10 องศา

ขนาดมุมกรวยและความยาวของไซโคลนเป็นตัวแปรที่คำนึงถึงน้อยที่สุดในการออกแบบ เนื่องจากไม่มีผลสรุปแน่นอนของผลกระทบต่อประสิทธิภาพจากการเปลี่ยนความยาวและมุมกรวยของไฮโดรไซโคลน อย่างไรก็ตามไซโคลนที่มีส่วนที่เป็นทรงกระบอกยาว มุมกรวย 20 องศา โดยมีส่วนกรวยยาวเท่ากับไซโคลน 9 องศา ไม่ได้ส่งผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากงานวิจัยสนับสนุนว่า มุมกรวยที่แหลมจะให้ความจุสูงและเพิ่มประสิทธิภาพ

กรณีที่ใช้กรวยมุมกว้างก็คือไซโคลนที่ใช้สำหรับการทำใส (Classifier) หรือทำความสะอาด (Washer) มีสองสาเหตุที่ต้องใช้ไซโคลนที่มีมุมกรวยใหญ่ ประการแรกคือไซโคลนมุมกว้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันที่ปลายกรวยน้อยกว่า ประการที่สองคือ ความดันลดที่ใช้กับไซโคลนมุมกว้างที่อัตราการไหลเดียวกัน จะให้ขนาดตัด (d_{50}) เล็กกว่าไซโคลนที่มีมุมแหลม และมีการทดลองในแง่การใช้ไซโคลนเล็กๆ โดยมีช่องทางจ่ายเข้าเป็นแบบสัมผัส (tangential inlet) ปรากฏว่าใช้ในการคัด (Classification) ตามขนาดที่ต้องการได้ดี

2.1.5.5 ขนาดและลักษณะของช่องท่อจ่ายของผสมเข้าไฮโดรไซโคลน

ช่องท่อจ่ายเข้า (Feed inlet) สามารถมีรูปร่างได้หลายแบบและหลายตำแหน่ง ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลนไม่มากนัก โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไซโคลนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อมีพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากัน ความยาวต่อความกว้างควรเป็น 2:1 (Kesall, 1953 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 119) มีการทดลองที่ทำให้สังเกตได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดของช่องทางเข้าโดยยังคงพื้นที่เอาไว้ นั่น ช่องทางเข้าที่ยาวกว่าและเป็นเหลี่ยมยุ่งยากในด้านการผลิต ดังนั้นโดยส่วนใหญ่ไซโคลนจึงยังคงรูปร่างทางเข้าเป็นวงกลมเอาไว้

ชนิดของช่องท่อจ่ายเข้าส่วนใหญ่จะได้รับความสนใจในไซโคลนสำหรับแยกก๊าซมากกว่าไซโคลนของของไหล ซึ่งมีผลการศึกษาเกี่ยวกับไซโคลนขนาด 3 นิ้ว พบว่าลักษณะต่างๆกันไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความดันลด

ตำแหน่งของท่อจ่ายเข้าควรจะได้ระดับกับแผ่นปิดด้านบนของไซโคลนซึ่งมีที่จำกัด บริเวณที่มีปัญหาหรือเรียกว่า Dead space เป็นบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจร โดยปกติจะต้องเกิดการไหลลัดวงจรอยู่เสมอ แต่ไม่ควรมีมากเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราการไหลทั้งหมด

มุมของช่องท่อจ่ายเข้า ไม่มีความสำคัญกับไซโคลนที่มีมุมระหว่าง 0 องศา ถึง 10 องศา จากแนวราบ แต่ส่งผลกับอัตราการจ่ายของผลสมที่มีอนุภาคขนาดหยาบ ซึ่งส่งผลในเรื่องบริเวณที่เกิดการลัดวงจร (Dead space) ที่เกิดขึ้นเหนือช่องทางจ่ายภายในไฮดรไซโคลน ดังนั้นการทำมุมของการจ่ายเข้าเพื่อหลีกเลี่ยงการจ่ายของผลสมไหลเข้าไปในเส้นการไหลลัดวงจร แต่สำหรับในไซโคลนขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องสนใจมุมของทางจ่ายเข้าแต่อย่างใด

2.1.5.6 สรุปผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อไฮดรไซโคลน

1. เส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนส่งผลต่อประสิทธิภาพกับอัตราการจ่ายที่สามารถทำการแยกในไฮดรไซโคลน ถ้าไซโคลนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ขนาดตัดของอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กตามไปด้วย

2. การลดอัตราการจ่ายและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (Overflow) จะทำให้ขนาดตัดเล็กลงแต่ความดันลด (Pressure drop) เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องท่อจ่ายเข้าที่เหมาะสมโดยที่ขนาดตัดและความดันลดน้อยที่สุด ควรมีค่า $D_i = D_c / 3.5$ และ $D_o = D_c / 3$

3. การเพิ่มความยาวของท่อยื่นสำหรับช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในการแยกอนุภาคขนาดหยาบแต่จะลดประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็ก ความยาวที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานแต่ควรมีช่วงระหว่าง $D_c / 2.5$ ถึง $D_c / 3$ ความหนาของผนังด้านนอก ที่ฐานของช่องทางออกด้านบนหนากว่าส่วนปลาย เนื่องจากกรรมวิธีการผลิต และเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

4. ไซโคลนยาวทำให้มีอัตราการจ่ายผ่านไซโคลนสูง โดยไม่คำนึงถึงสัดส่วนความยาวของส่วนกรวยและทรงกระบอก อีกทั้งไม่ส่งผลต่อขนาดตัดเมื่อความดันคงที่ มุมของกรวยไม่ควรมีขนาดใหญ่กว่า 20 องศา ยกเว้นในกรณีที่เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายกรวย

5. ช่องทางจ่ายเข้าที่เป็นสี่เหลี่ยม และมีด้านยาวขนานกับแกนไซโคลน ความยาวที่เหมาะสมควรมีขนาดเป็นสองเท่าของด้านกว้าง

6. ช่องท่อจ่ายเข้าควรมีผนังเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนปิดด้านบนของไซโคลน

7. การป้องกันการสึกกร่อนที่จะเกิดขึ้นภายในไซโคลนเมื่อมีของแข็งที่สามารถกัดกร่อนได้อยู่ภายในของผลสมที่จ่ายเข้า ควรมีการป้องกันการกัดกร่อนที่บริเวณฐานของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และส่วนปลาย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบ หรือมีการสวมปลายของกรวย

2.1.6 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยไฮโดรไซโคลน ไม่สามารถแยกได้อย่างสมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น ในส่วนของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลนแล้ว ยังมีอนุภาคของของแข็งแขวนลอยปะปนอยู่ด้วยเสมอ การกล่าวถึงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนจะมีสองแนวทาง โดยแนวทางแรกกล่าวในแง่การแยกของแข็งแขวนลอยซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) ประสิทธิภาพลด (Reduced efficiency) และ Grade efficiency แนวทางที่สองนั้นจะกล่าวในแง่ของขนาดของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลนหรือเรียกว่าขนาดตัด (Cut size) ซึ่งจะกล่าวต่อไปดังนี้

2.1.6.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency, Mass recovery, Retention)

ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) นี้ จะพิจารณาสัดส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคของแข็งที่แยกออกไปสู่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) หารด้วยปริมาณอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่จ่ายเข้าไป (Inlet) สามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.12)$$

$$M = Q \cdot c \quad (2.13)$$

$$M_u = U \cdot c_u \quad (2.14)$$

E_T คือ ประสิทธิภาพรวม

M_u คือ มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow)

M คือ มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed inlet)

U คือ อัตราการไหลที่ออกทางด้านล่างของไซโคลน (Underflow)

c_u คือ ความเข้มข้นของของผสมที่ออกทางด้านล่างของไซโคลน

ในกรณีที่ความเข้มข้นของน้ำที่ออกทางส่วนล่างของไซโคลน (Underflow) เท่ากับความเข้มข้นของน้ำที่จ่ายเข้า แสดงว่าไม่เกิดการแยกอนุภาคเกิดขึ้น ไฮโดรไซโคลนจึงทำหน้าที่เพียงแบ่งการไหล (Flow split) เท่านั้น ซึ่งควรจะทำให้ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลนมีค่าเป็นศูนย์

นั่นคือ

$$c_u = c$$

จาก

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.12)$$

ทำให้

$$E_T = \frac{U \cdot c_u}{Q \cdot c} = \frac{U}{Q}$$

แต่เมื่อทำการแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Underflow) ทหารด้วยอัตราการจ่ายน้ำเข้า (Flowrate) หรือเทอม U/Q แล้วจะพบว่ามีความมากกว่าศูนย์เสมอ ด้วยเหตุนี้ E_T จึงไม่สามารถใช้แสดงประสิทธิภาพที่แท้จริงของไฮโดรไซโคลนได้ ดังนั้นจึงมีการนิยามประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนที่คำนึงถึงผลในการแบ่งอัตราการไหลด้วย เรียกว่าประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

2.1.6.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced efficiency)

คือประสิทธิภาพในการแยกของแข็งออกจากของเหลวภายในไฮโดรไซโคลน โดยที่คำนึงถึงผลในการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากจุดประสงค์การแยกในไฮโดรไซโคลนนั้น ต้องการให้ในส่วนของออกด้านล่าง มีปริมาณของของแข็งหรืออนุภาคทั้งหมด และมีเพียงน้ำใสในส่วนของออกด้านบน แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ เพราะจะต้องมีส่วนของของเหลวออกมาที่ ทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้น จึงต้องนำสัดส่วนของของเหลวมาคำนวณประสิทธิภาพด้วย ซึ่งทำให้ค่าประสิทธิภาพรวม (total efficiency) น้อยลงและสะท้อนความเป็นจริงยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนิยามเป็นประสิทธิภาพลด หรือ Reduced total efficiency ดังนี้

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2.15)$$

E'_T คือ Reduced total efficiency

E_T คือ ประสิทธิภาพรวม

R_f คือ สัดส่วนระหว่าง Underflow กับปริมาณที่จ่ายเข้าไป: Q ซึ่งนิยามว่า

$$R_f = \frac{U}{Q} \quad (2.16)$$

ในกรณีนี้หากไม่มีการแยกอนุภาคเกิดขึ้น หรือ $c_u = c$ ซึ่งควรจะทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนมีค่าเป็นศูนย์และสามารถแสดงได้ด้วยสมการของประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ดังนี้

จากสมการ 2.12 จะได้

$$E_T = \frac{U \cdot c_u}{Q \cdot c} = \frac{U}{Q}$$

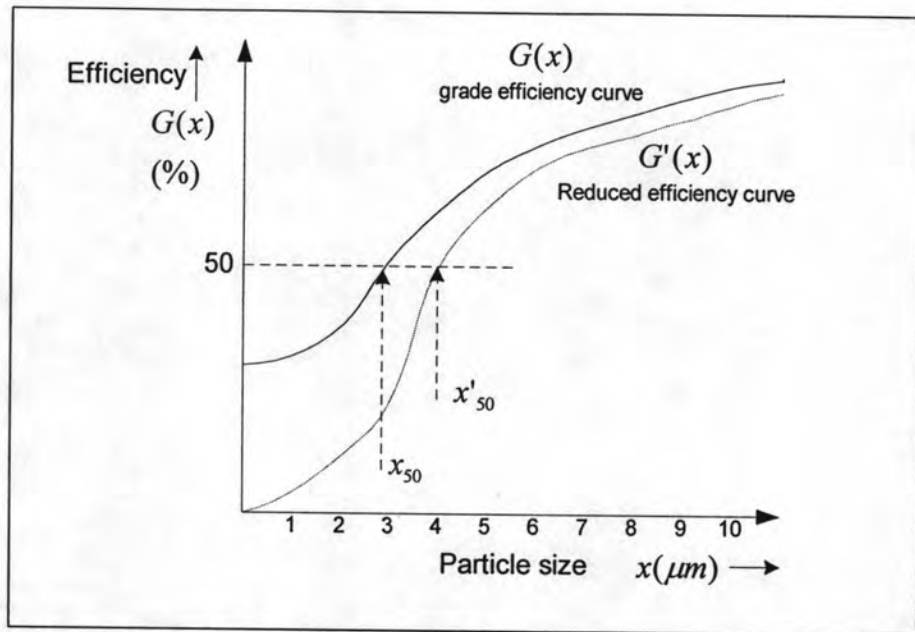
แทนค่า $E_T = \frac{U}{Q}$ ในสมการที่ 2.15 จะได้

$$E_T' = \frac{E_T - E_T}{1 - E_T} = 0$$

ด้วยเหตุนี้ในทางปฏิบัติแล้ว ควรคำนวณประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนโดยใช้ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แทนการใช้ประสิทธิภาพรวม (total efficiency)

2.1.6.3 Grade efficiency

เป็นการให้คำจำกัดความของประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) และประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) อย่างหนึ่ง ซึ่งเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพรวมและ/หรือประสิทธิภาพลด จะหมายถึงประสิทธิภาพการแยกสำหรับอนุภาคขนาดเดียว ในขณะที่ Grade Efficiency เป็นการนำค่าประสิทธิภาพของทุกขนาดอนุภาคมาทำเป็นกราฟแสดง เรียกว่า Grade Efficiency curve โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส ดังแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 Grade efficiency curve และ Reduced efficiency curve

2.1.7 ขนาดตัด (Cut size)

ขนาดตัดคือขนาดของอนุภาคที่มีลักษณะอยู่บนตำแหน่งของเส้น Grade efficiency บนแกน x ใช้เป็นตัวแทนของขนาดอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนนั้นๆสามารถทำการแยกได้ การนิยามที่ดีที่สุดของขนาดตัดพิสูจน์มาจาก เส้น Grade efficiency นั้นเอง มีบางไฮโดรไซโคลอน ที่ใช้ขนาดถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นขนาดตัด(เมื่อต้องการได้ขนาดเล็กๆ) แต่โดยทั่วไปที่ยอมรับกันจะอยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของขนาด (50% size) หรือเรียกว่า Equiprobable size คือ ขนาดของอนุภาคซึ่งมีโอกาส 50 เปอร์เซ็นต์ ที่จะถูกแยก หรือผ่านเข้าไปเมื่ออยู่ในเครื่องแยกขนาดอนุภาคส่วนใหญ่น้อยกว่า Equiprobable size x_{50} ที่จ่ายเข้าไปจะไหลออก ในขณะที่ขนาดที่ใหญ่กว่าจะถูกแยก

Analytical cut size (x_a) คือขนาดที่ถูกแยกอย่างอุดมคติ ตามที่ขนาดอนุภาคที่เป็นสัดส่วนกับประสิทธิภาพรวม (Total efficiency หรือ E_T) ดังนั้นจึงเหมือนกับขนาดของช่องตะแกรงในอุดมคติที่จะสามารถแยก สัดส่วน E_T ของการจ่ายของแข็งเข้าไปให้ได้อนุภาคขนาดใหญ่ (Coarse product) เป็นต้น

$$F(x_a) = E_T \quad (2.17)$$

โดย F คือ เปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ใหญ่กว่า (% oversize)

การนิยามเช่นนี้จึงเหมือนกับว่า x_0 เป็นปริมาณของอนุภาคขนาดหยาบในส่วนของอนุภาคขนาดละเอียด และอนุภาคขนาดละเอียดในส่วนของอนุภาคหยาบนั้น มีปริมาณเท่ากัน อีกทั้งภายใต้ขนาดตัดในสภาวะเชิงวิเคราะห์ (Analytical cut size) แบบเชิงเลข จะเท่ากับ Equiprobable size x_{50} ในทางปฏิบัติการที่ขนาดตัดสองค่าจะมาเท่ากันโดยบังเอิญนั้น สามารถเกิดขึ้นได้ยาก (ยกเว้น Total efficiency มีค่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์)

2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคกูเลชัน (Coagulation and Flocculation processes)

2.2.1 หน้าที่ของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชัน คือการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ให้สามารถจับตัวเป็นกลุ่มก้อนหรือฟลอคขนาดเล็ก (Microfloc) ได้ ซึ่งคอลลอยด์มีขนาดอยู่ในช่วง 10^{-6} มิลลิเมตร ถึง 10^{-3} มิลลิเมตร หรือ 1 ไมโครเมตร ถือว่ามีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด จึงจำเป็นในการทำให้เกิดกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์จนเป็นก้อนฟลอคขนาดเล็ก ส่วนกระบวนการฟลอคกูเลชันเป็นการรวมฟลอคขนาดเล็กดังกล่าวที่สร้างมาจากกระบวนการโคแอกกูเลชันให้เป็นกลุ่มก้อน เพื่อง่ายต่อการแยกออกจากน้ำใส ส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในของเหลวที่เกี่ยวข้อง

2.2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process)

2.2.2.1 เสถียรภาพของคอลลอยด์

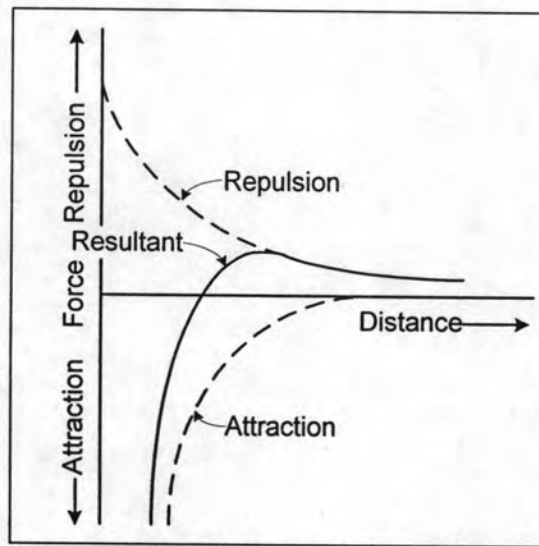
คอลลอยด์ คืออนุภาคที่ไม่สามารถตกตะกอนได้เองในธรรมชาติด้วยเวลาที่จำกัด เสถียรภาพของคอลลอยด์เกี่ยวข้องกับปัจจัยในทางพื้นผิวของคอลลอยด์อย่างมาก โดยปกติคอลลอยด์จะมีแรงกระทำต่อกันดังนี้

- แรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals force) เป็นแรงดูดระหว่างอนุภาค ที่สัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้าง (E_A)
- แรงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsive force) เป็นแรงผลักรที่สัมพันธ์กับประจุพื้นผิวของคอลลอยด์ (E)

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับสมดุลของแรงดูดและแรงผลักรทั้งสองนี้

$$E = E_A + E_B \quad (2.18)$$

ซึ่งในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จะต้องเอาชนะพลังงานสุทธิตั้งเป็นผลรวมของแรงทั้งสองต่อคอลลอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่แรง E จะเป็นผลลัพธ์ระหว่างแรงผลักและแรงดูด วิธีการทำลายผลของแรงดังกล่าวเรียกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันนั่นเอง



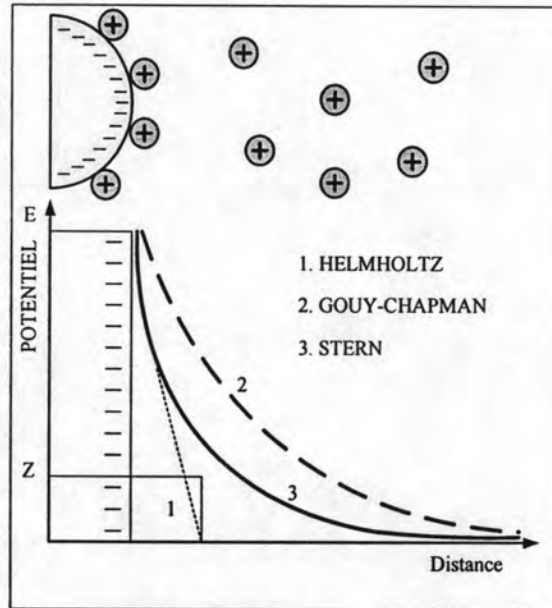
รูปที่ 2.8 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ

2.2.2.2 ทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (The double layer theory)

ปกติคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำดิบจะมีประจุลบอยู่ที่ผิว ทำให้ไอออนประจุบวกที่อยู่ในน้ำจะหนาแน่นบริเวณผิวคอลลอยด์ เกิดเป็นชั้นของประจุบวกรอบๆ ทฤษฎีต่างๆที่กล่าวถึงชั้นประจุมี่ ดังนี้ (Monod, 1991)

- ทฤษฎีของ Helmholtz : ชั้นของไอออนประจุบวกจะปกคลุมผิวของคอลลอยด์และลดลงแบบเชิงเส้นจนเป็นกลางเมื่อระยะห่างออกไป เรียกความหนาบริเวณนี้ว่า Boundary layer
- ทฤษฎีของ Gouy-Chapman : ชั้นของไอออนประจุบวกจะปกคลุมผิวของคอลลอยด์และค่อยๆลดลงจนเป็นกลางเมื่อระยะห่างออกไป เรียกความหนาบริเวณนี้ว่า Diffuse layer ซึ่งจะหนามากกว่าชั้น Boundary layer จากทฤษฎีของ Helmholtz

- ทฤษฎีของ Stern เป็นการนำทฤษฎีทั้งสองข้างต้นมารวมกัน และเรียกใหม่ว่าเป็นทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (Double layer theory) โดยชั้นแรกคักย์ของประจุที่ผิวคอลลอยด์ลดลงรวดเร็ว ส่วนในชั้นที่สองคักย์ของประจุที่ผิวคอลลอยด์ลดลงอย่างช้าๆ เมื่อระยะห่างออกไป ดังแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 คักย์ของประจุรอบๆผิวคอลลอยด์

2.2.2.3 ซีตาโพเทนเชียล

คักย์ไฟฟ้า Z เรียกว่าซีตาโพเทนเชียล ใช้วัดการเคลื่อนที่ของคอลลอยด์และน้ำที่อยู่รอบๆ เมื่อคอลลอยด์เข้าไปในสนามไฟฟ้า ทำให้คอลลอยด์มีความเร็วซึ่งเกิดจากความสมดุลระหว่างแรงดึงดูดไฟฟ้าและแรงต้านจากความหนืดของตัวกลาง (น้ำ) โดยปกติคอลลอยด์เคลื่อนที่โดยที่มีประจุไฟฟ้าแบบดับเบิลเลเยอร์คลุมรอบผิวไปด้วย เป็นผลทำให้คอลลอยด์มีคักย์ไฟฟ้าสองชนิดคือ

- คักย์ไฟฟ้าที่ผิว (E) หรือเรียกว่าคักย์ทางเทอร์โมไดนามิกส์
 - คักย์ไฟฟ้าแรงเฉือนที่ผิว (Z) หรือเรียกว่าคักย์ทางอิเล็กโทรไคเนติกส์
- โดย จากความสัมพันธ์นี้สามารถหาค่าซีตาโพเทนเชียลได้ดังนี้

$$me = \frac{\epsilon Z}{k\eta} \quad (2.19)$$

m_e คือแรงการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (Electrophoretic mobility)

ϵ คือค่าคงที่ความเฉื่อยของตัวกลาง

η คือความหนืดของตัวกลาง

k คือค่าคงที่ ซึ่งปกติมีค่าเท่ากับ 4 หรือ 6 (มันสัน, 2542)

อนุภาคต่างๆชนิดกันจะมีค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นค่าเฉพาะ เช่นเดียวกันกับค่าแรงการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเฉพาะต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลลอยด์ สำหรับการทำโคแอกกูเลชัน จุดมุ่งหมายหลักคือต้องการลดให้ค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นศูนย์ เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์นั่นเอง

2.2.2.4 ทฤษฎีทางเคมี

เนื่องจากแรงทางประจุมีค่ามากกว่าแรงทางไฟฟ้าถึง 20 ถึง 50 เท่า กลไกหลักที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จึงเป็นกลไกทางเคมี โดยการใช้สารเคมีทำลายประจุบนผิวของอนุภาคและทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันได้ กระบวนการทางเคมีที่ใช้จะทำลายประจุที่อยู่รอบๆผิวของคอลลอยด์มาจากกลุ่มประจุบนผิวของสารเคมีเช่น หมูไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล ฟอสเฟต ซัลเฟต เป็นต้น การทำลายเสถียรภาพระหว่างหมู่ประจุเหล่านี้กับกลุ่มของโลหะไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) การทำโคแอกกูเลชันจะทำการตกผลึกพวกสารโลหะออกไซด์และทำการรวมกลุ่มคอลลอยด์ไปพร้อมๆกัน ในทางปฏิบัติจะต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่าโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรือสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีหน้าที่ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

2.2.3 กระบวนการฟลอคกูเลชัน (Flocculation process)

กระบวนการฟลอคกูเลชัน คือกระบวนการที่ทำให้กลุ่มอนุภาคหรือฟลอคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน ให้มีโอกาสมาสัมผัสและรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การแยกออกจากน้ำเป็นไปได้ง่ายขึ้น สิ่งที่จะต้องพิจารณาในการสร้างโอกาสในการสัมผัสระหว่างกลุ่มอนุภาคเล็กๆ (Microfloc) ก็คือ ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยในตัวกลาง และขนาดของกลุ่มอนุภาคเล็กๆดังกล่าว

กระบวนการฟลอคกูเลชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.2.3.1 Perikinetic flocculation

คือการสัมผัสระหว่างฟลอกขนาดเล็กต่างๆ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน หรืออาศัยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำ ฟลอกขนาดเล็กจะกระทบกันเอง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ วิธีนี้ใช้เวลานานมาก จึงไม่นิยมใช้ในการผลิตน้ำประปา นอกจากนี้วิธีนี้สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1 ไมครอนเท่านั้น

2.2.3.2 Orthokinetic Flocculation

คือการสร้างโอกาสสัมผัสให้กับฟลอกขนาดเล็กโดยใช้อุปกรณ์ทำลายเสถียรภาพ หรือเรียกว่าถังกวนช้า ทำให้แต่ละอนุภาคมีความเร็วไม่เท่ากันและเกิดการชนหรือสัมผัสกัน ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป อนุภาคควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน และความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งวิธีนี้จะต้องทำให้น้ำมีความปั่นป่วนโดยสามารถวัดได้ด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่า **ความเร็วแกรเดียนท์ (Velocity Gradient): G**

สำหรับระบบคอลลอยด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาก (เท่ากับหรือน้อยกว่า 1 ไมครอน) ฟลอกกุเลชันแบบเพอร์โคเนติกจะมีความสำคัญมากกว่า และไม่จำเป็นต้องสร้างฟลอกกุเลชันแบบออร์โธโคเนติกให้กับระบบคอลลอยด์ อย่างไรก็ตาม ถ้าอนุภาคมีขนาด 1 ไมครอน จะมีอัตราการรวมกลุ่มเป็นฟลอกขนาดเล็กเท่ากับหรือสูงกว่าในฟลอกกุเลชันแบบออร์โธโคเนติก เมื่อค่าความเร็วแกรเดียนท์เท่ากับหรือมากกว่า 10 ต่อวินาที ดังนั้นในกรณีนี้ฟลอกกุเลชันควรเป็นแบบออร์โธโคเนติกมากกว่าแบบเพอร์โคเนติก จึงอาจสรุปได้ว่า อนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กต้องทำให้มีขนาดใหญ่ถึง 1 ไมครอน ด้วยฟลอกกุเลชันแบบเพอร์โคเนติกเสียก่อน จากนั้นจึงกวนน้ำเพื่อให้เกิดฟลอกกุเลชันแบบออร์โธโคเนติกของอนุภาคขนาด 1 ไมครอน

2.2.4 ความสำคัญของความเร็วแกรเดียนท์

ความเร็วแกรเดียนท์ คือ ความแตกต่างความเร็วของของไหลเมื่อเทียบกับระยะทาง ซึ่งถ้าค่าความเร็วแกรเดียนท์สูง ส่งผลให้อนุภาคมีโอกาสสัมผัสหรือชนกันมากขึ้น ความเร็วแกรเดียนท์เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกระดับความปั่นป่วนของน้ำ ในทางปฏิบัติค่าความเร็วแกรเดียนท์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

นิยามความเร็วแกรเดียนท์

$$G = \frac{\delta v}{\delta S} \quad (2.20)$$

โดยที่ G คือความเร็วแกรเดียนท์เฉลี่ย หน่วย ต่อวินาที

δv คือความแตกต่างความเร็วของของไหล หน่วยเมตรต่อวินาที

δS ความแตกต่างของระยะทาง หน่วยเมตร

ความเร็วแกรเดียนท์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ สามารถบอกความเป็นไปได้ในการรวมตัวของอนุภาค อย่างไรก็ตามไม่สามารถคำนวณให้ได้ถูกต้องแม่นยำที่สุด ในทางปฏิบัติค่าความเร็วแกรเดียนท์จะต้องไม่สูงมากพอจนทำให้กลุ่มอนุภาคที่รวมตัวกันแตกออกจากกันโดยแรงเฉือนของน้ำ ค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่ยอมรับได้จะอยู่ในช่วง 400-1000 ต่อวินาที สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และมีค่าประมาณ 100 ต่อวินาที สำหรับกระบวนการฟล็อกกูเลชัน

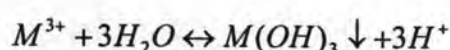
2.2.5 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน

2.2.5.1 โคแอกกูแลนต์ (Coagulant)

โคแอกกูแลนต์ คือสารที่ช่วยในการลดเสถียรภาพของคอลลอยด์ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำโดยปกติมักเป็นประเภตสารอนินทรีย์ไตรวาเลนต์ประจุบวก (Trivalent cations)

เนื่องจากที่ผิวของคอลลอยด์มีประจุลบ ดังนั้นในการทำให้เป็นกลางต้องมีการเพิ่มสารอนินทรีย์โคแอกกูแลนต์ที่มีประจุบวก ถ้ามีวาเลนต์สูงกว่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันได้มากกว่า (โดยทฤษฎีของ Schultz-Hardy กล่าวว่าไตรวาเลนต์อิออน มีประสิทธิภาพมากกว่าไดวาเลนต์อิออนถึงสิบเท่า) (Monod, 1991) ในการเลือกสารโคแอกกูแลนต์ควรพิจารณาสารที่ไม่เป็นพิษต่อน้ำและราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้สารโคแอกกูแลนต์แบบไตรวาเลนต์ประจุบวก หรือเกลืออะลูมิเนียมในกระบวนการโคแอกกูแลนต์

นอกจากนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารโคแอกกูแลนต์อนินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่ต้องการบำบัด



ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดคอลลอยด์จะอยู่ระหว่าง
กระบวนการโคแอกกูเลชัน (ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของคอลลอยด์)

ค่าพีเอชที่เหมาะสมกับ
และค่าพีเอชที่เหมาะสมกับ

กระบวนการฟลอกกูเลชัน (สัมพันธ์กับกลุ่มอนุภาคที่รวมตัวจากเหล็กหรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป) ค่าพีเอชที่เหมาะสมเป็นดังนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมตามชนิดอิออนของโคแอกกูแลนต์ (มันลิน, 2542)

อิออนบวก	ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน
Al^{3+}	6.0-7.4
Fe^{3+}	>5

2.2.5.2 ฟลอกกูแลนต์ (Flocculant)

ฟลอกกูแลนต์ หรืออาจเรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอดส์ (Coagulant aids) คือสารที่ช่วยในการรวมตะกอนที่ผ่านการลดเสถียรภาพแล้ว ให้มารวมกลุ่มและมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อง่ายต่อการแยกออกจากน้ำต่อไป ในอดีตที่ผ่านมามีการใช้ สารอนินทรีย์โพลีเมอร์ (แอกติเวตเตด ซิลิกา) และ สารโพลีเมอร์ในธรรมชาติ เช่น แป้ง เป็นฟลอกกูแลนต์ แต่ปัจจุบันสารโพลีเมอร์สังเคราะห์ให้ผลในการทำฟลอกกูเลชันได้ดีกว่า สารฟลอกกูแลนต์จะไม่ส่งผลใดๆ จนกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันจะผ่านไปก่อน และเวลาที่ใช้ในขั้นตอนโคแอกกูเลชันขึ้นอยู่กับชนิดของคอลลอยด์ อุณหภูมิของน้ำดิบ ปัจจัยหลักที่ควรคำนึงถึงคือขนาดของฟลอก การเกาะตัวกันและอัตราการตกตะกอน

การใช้สารฟลอกกูแลนต์สังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่จะให้ปริมาณตะกอนสลัดจ์น้อยที่สุด และเมื่อใช้เทคนิคการแยกฟลอกออกจากน้ำที่ทันสมัย จะทำให้ได้ตะกอนสลัดจ์ที่เข้มข้น สามารถส่งไปบำบัดในขั้นตอนการรีดน้ำได้โดยตรง

2.2.6 การเลือกสารโคแอกกูแลนต์

การเลือกสารเคมีมาเป็นโคแอกกูแลนต์ ขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำดิบเป็นสำคัญ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ยู่สองชนิด คือ สารส้ม และ สารประกอบเหล็ก เช่น $FeCl_3$ (มันลิน, 2542)

2.2.6.1 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นสูงและมีความเป็นด่างสูง

สร้างโคแอกกูเลชันได้ง่าย พีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารส้มอยู่ในช่วง 6-7 ส่วนเกลือเฟอร์ริคคลอไรด์ใช้ได้ดีในช่วง 5-7 โดยมักไม่ต้องการโคแอกกูแลนต์เอด สามารถใช้โพลีเมอร์ที่มีประจุบวกเป็นโคแอกกูแลนต์ได้เช่นกัน ค่าพีเอชมีผลกระทบน้อยต่อการใช้โพลีเมอร์ เนื่องจากน้ำมี

ความขุ่นสูงนั้น ทำให้อนุภาคมีโอกาสสัมผัสกันง่ายอยู่แล้ว ฟลอคมีขนาดใหญ่ได้โดยไม่จำเป็นต้องเติมเป่าจากภายนอก โดยโพลีเมอร์ที่ใช้ควรพิจารณาที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ

2.2.6.2 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นสูงแต่มีความเป็นต่างต่ำ

ในกรณีนี้โพลีเมอร์อาจใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้ดี สารส้มและเกลือเฟอร์ริกก็สามารใช้ได้ดีเช่นกัน แต่ต้องระวังเรื่องพีเอชลดต่ำลง เนื่องจากมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชด้วยสารละลายต่าง เพื่อป้องกันมิให้พีเอชของน้ำลดต่ำจนโคแอกกูแลนต์เกิดไม่สมบูรณ์

2.2.6.3 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นต่ำแต่มีความเป็นต่างสูง

น้ำดิบชนิดนี้จำเป็นต้องมีการเติมเป่าสัมผัสจากภายนอกด้วย เนื่องจากไม่อาจสร้างโคแอกกูแลนต์ให้เกิดได้ด้วยโพลีเมอร์เพียงลำพัง เป่าสัมผัสที่ใช้ อาจเป็นผงดินเหนียวปน เช่น Kaolite หรือ Bentonite หรืออาจใช้แอคติเวตเต็ดชิลิกา สารส้มและเกลือเฟอร์ริกใช้ได้ผลดี แต่ต้องใช้ปริมาณสูง ทั้งนี้เพื่อสร้างผลึก $Al(OH)_3$ หรือ $Fe(OH)_3$ ให้เป็นเป่าสัมผัสนั่นเอง

2.2.6.4 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นต่ำและมีความเป็นต่างต่ำ

น้ำดิบเช่นนี้สร้างโคแอกกูแลนต์ได้ยาก เนื่องจากมีเป่าสัมผัสน้อย และการใช้สารส้มกับเหล็กเฟอร์ริกจะทำให้มีพีเอชลดต่ำได้เป็นอย่างมาก ข้อเสนอแนะที่ควรทำมีดังนี้คือ

- เติมนูนขาวหรือต่างอย่างอื่น เพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับน้ำหรือ
- เพิ่มเป่าสัมผัสให้น้ำโดยการเติมดินเหนียว หรือสารเจือยอย่างอื่น

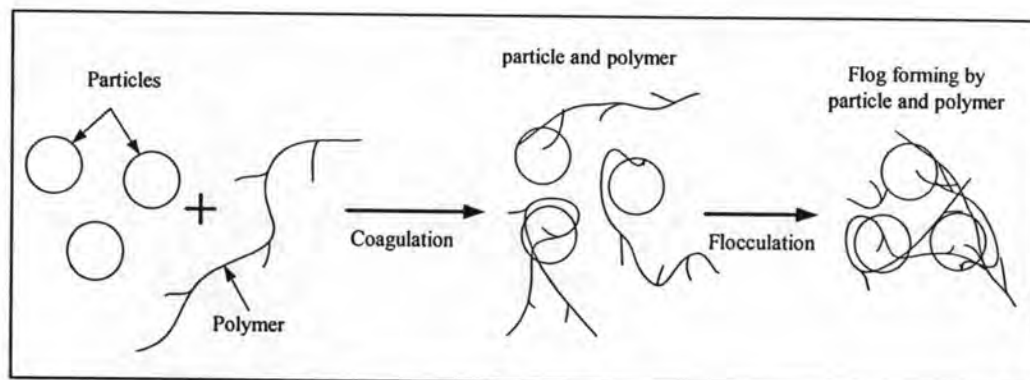
2.2.6.5 กลไกการโคแอกกูเลชันต่างๆ

กลไกการเกิดโคแอกกูเลชัน ประกอบด้วยกลไกหลัก 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก
2. กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ
3. กลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep Coagulation)
4. กลไกโคแอกกูเลชันที่เกิดจากการใช้โพลีเมอร์และโคแอกกูเลชันเอดอื่นๆ



สำหรับกระบวนการไฮบริด : ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชันและการลอยตะกอนในงานวิจัยนี้ กลไกที่เกิดขึ้นเป็นแบบจุดติดผิวและการรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ (Polymer bridging) ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดการจุดติดผิวและการรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ (Polymer bridging)

สารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นและใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ สารเหล่านี้มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าประจำตัวอาจเป็นบวก ลบ หรือไม่มีประจุเลยก็ได้ การใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer bridging) นี้ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.10 นั่นคือสารโพลีเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม การต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นได้ตรงเท่าที่มีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค การใช้โพลีเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไปก็ก่อผลเสียได้ เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วนๆ และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่อีก

สำหรับกลไกการทำลายเสถียรภาพอื่นๆ อันได้แก่ การลดความหนาของชั้นกระจาย การทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์ การห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบและโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก เหล่านี้จำเป็นต้องพิจารณาประจุของสาร

โคแอกกูแลนท์ ซึ่งจะต้องมีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ต้องเหมาะสม และบางกลไกจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาค่าพีเอชของน้ำ เพื่อให้การเกิดกระบวนการโคแอกกูแลชั่นเป็นไปอย่างเหมาะสม

ในงานวิจัยนี้จะใช้โพลีเมอร์เป็นสารโคแอกกูแลนท์และใช้กลไกการรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ เนื่องจากในการทดลองไม่ได้พิจารณาค่าพีเอช และตำแหน่งการเติมสารละลายโคแอกกูแลนท์แตกต่างจากระบบการบำบัดน้ำที่ใช้กันทั่วไปเพราะเป็นระบบใหม่ ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์อย่างแน่นอน จึงใช้กลไกการรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์แทนการใช้กลไกอื่นๆดังที่กล่าวไปข้างต้น อย่างไรก็ตาม จะมีการทดสอบชนิดของประจุของโพลีเมอร์เพื่อนำชนิดที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการศึกษาต่อไป

2.2.7 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูแลชั่นและฟล็อกกูแลชั่น

ปัจจัยที่ต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาทวนน้ำ สำหรับกระบวนการไฮบริดในงานวิจัยนี้การควบคุมที่สำคัญที่สุดคือการควบคุมความเร็วแกรเดียนท์

ความเร็วแกรเดียนท์ (G) หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำ ซึ่งเกิดจากการที่แต่ละอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากัน น้ำในถังทวนเร็วจะต้องมีระดับความปั่นป่วนสูง ทั้งนี้เพื่อให้การผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำ ส่วนน้ำในถังทวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออก ดังทวนเร็วจะมีค่า G ไม่ต่ำกว่า 300 วินาที⁻¹ และในถังทวนช้าก็มีค่า G ไม่เกิน 60-100 วินาที⁻¹

2.2.7.1 การควบคุมค่าความเร็วแกรเดียนท์ในถังทวนเร็ว

พลังงานที่ใช้ในการทวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนในระดับ G อาจคำนวณได้จากสมการของแคมท์และสไตน์ ดังนี้

$$G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{0.5} \quad (2.21)$$

G คือความเร็วแกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน หน่วยต่อวินาที

P คือพลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน หน่วยฟุต-ปอนด์ต่อวินาที

μ คือความหนืดของน้ำ หน่วยปอนด์-วินาทีต่อตร.ฟุต

V คือปริมาตรของน้ำในถังทวนเร็ว หน่วยลบ.ฟุต

2.2.7.2 การควบคุมค่าความเร็วแกรเดียนท์ในถังกวนช้า

ถังกวนช้าต้องการความปั่นป่วน หรือความเร็วแกรเดียนท์ (G) ต่ำ แต่ต้องการเวลาสัมผัส หรือเวลารวมตะกอน (T) นาน ซึ่งตรงกันข้ามกับถังกวนเร็ว เวลารวมตะกอนหรือเวลาสัมผัส ควร มีค่าประมาณ 20-30 นาที การใช้เวลารวมตะกอนนานกว่านั้น ไม่เป็นการประหยัด ระดับที่ เหมาะสมที่สุดของความเร็วแกรเดียนท์ ขึ้นอยู่กับค่าของ T ตามสมการ

$$(G^*)^{2.8} T = K \quad (2.22)$$

G^* = ระดับความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด หน่วยต่อวินาที

T = เวลารวมตะกอน ซึ่งเท่ากับเวลากักน้ำของถังกวนช้า หน่วยนาที

K = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้

ในกรณีที่ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ในปริมาณที่ไม่สูงกว่า 50 มก./ล. จะได้สมการดังนี้

$$(G^*)^{2.8} T = 44 \times 10^5 / C \quad (2.23)$$

C คือความเข้มข้นของสารส้มที่อยู่ในช่วง 0-50 มก./ล.

G^* หรือความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด คือค่า G ที่ทำให้เกิดฟล็อกูเลชันแล้วมี ความขุ่นเหลือน้อยที่สุด โดยควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 ต่อวินาที

ปัจจุบันผลวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า การสร้างฟล็อกูเลชันโดยให้มีการลดระดับ ความเร็วแกรเดียนท์ไปตามความยาวของถังกวนช้า จะให้ผลดีกว่าการใช้ถังกวนช้าที่มีค่าความเร็ว แกรเดียนท์คงที่ โดยแนะนำให้ลดค่า G ในอัตรา 2:1 ไปตามความยาวของถังกวนช้า หรืออาจให้ ใช้ถังกวนช้าที่มีค่า G เริ่มต้นจาก 150 ต่อวินาที ที่บริเวณทางน้ำเข้าไปจนเหลือ 30 ต่อวินาที ที่ บริเวณทางน้ำออก

สำหรับกระบวนการไฮบริดในงานวิจัยนี้ จะทำการควบคุมให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์ เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกูเลชัน โดยวิธีการคำนวณเพื่อนำไปใช้ ควบคุม จะได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.6

2.3 กระบวนการลอยตะกอน (Flotation process)

การแยกตะกอนออกจากของเหลวโดยทำให้ตะกอนลอย (Flotation) เป็นกระบวนการที่ทำให้สิ่งที่ต้องการแยกออกลอยขึ้นมาบนผิวน้ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะตรงกันข้ามกับกระบวนการตกตะกอน โดยสิ่งที่ต้องการแยกออกจากน้ำเสียอาจเป็นอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำสามารถจมตัวได้ดี เช่นสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ หรือ ตะกอนจุลินทรีย์ เป็นต้น หรืออาจเป็นสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloids) ซึ่งจมตัวได้ยากและใช้เวลายาวนาน หรืออาจเป็นสารที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ เช่น น้ำมัน เป็นต้น

การทำให้สารที่ต้องการแยกสามารถลอยตัวขึ้นมารวมกันที่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว สามารถกระทำได้โดยการใช้ฟองอากาศขนาดเล็กไปเกาะบนสารที่ต้องการแยก เพื่อทำให้ความถ่วงจำเพาะสารนั้นลดต่ำลง หรืออาจอธิบายได้ว่าฟองอากาศจะพยุงสารนั้นลอยขึ้นมา การประยุกต์ใช้กระบวนการลอยตัวนี้แต่เดิมใช้ในการแยกแร่ และต่อมานำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานกระดาษ เพื่อลดการสูญเสียเยื่อ ในส่วนการประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมีหลายด้าน เช่น การแยกสารของแข็งในน้ำเสียดิบ เช่นการแยกน้ำมันและไขมัน การแยกสารที่ก่อให้เกิดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมและการแยกตะกอนแบคทีเรีย เพื่อนำกลับมาใช้ในระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง เป็นต้น

ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่างคือ ขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสม และการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคของแข็ง

วิธีการสร้างฟองอากาศสามารถทำได้ 5 วิธี ดังนี้

1. Dispersed-air flotation โดยการต่อเครื่องปั่นความเร็วสูงในระบบการจ่ายอากาศ ให้เข้าไปกระจายในน้ำ ฟองอากาศที่เกิดจะมีขนาดใหญ่
2. Dissolved-air (Vacuum) flotation โดยจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่ความดันบรรยากาศ ผ่านเข้าไปที่ส่วน Flotation (Flotation chamber) ทำการลดความดันลงให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เมื่ออากาศมีความดันสูงกว่าพยายามแยกตัวออกมา
3. Microflotation ทำโดยการบีบอากาศให้ละลายไปในน้ำภายใต้แรงดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic head) เช่นที่ 15 เมตร เมื่อน้ำไหลผ่าน ฟองอากาศจะพยายามแยกตัวออกมา
4. Electroflotation ทำโดยการต่อกระแสตรงผ่านแผ่นขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่อยู่ในน้ำ ทำให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน

5. Dissolved-air (Pressure) flotation ทำโดยละลายอากาศลงไปใของเหลวภายใต้แรงดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อความดันลดลงฟองอากาศจะแยกตัวออกจากของเหลว

ในกระบวนการแยกแหว่งของแข็งและของเหลวด้วยวิธีการลอยตะกอนนี้ มักใช้เทคนิค Dissolved-Air Flotation และ Electrolytic Flotation โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้กันมากในงานบำบัดน้ำเสีย

การสัมผัสกันระหว่างฟองกับอนุภาคของแข็ง ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางธรรมชาติของฟองอากาศกับตัวอนุภาคเอง สำหรับในระบบตะกอนเร่ง การใช้เทคนิค Dissolved Air Flotation (DAF) ฟองอากาศและอนุภาคจะสามารถจับตัวกันได้เองโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีช่วย แต่สำหรับระบบอื่นๆ การใช้เทคนิค DAF จะต้องเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เช่นสารโลหะโคแอกกูแลนต์และโพลีอิเล็กโทรไลต์ (หรือโพลีเมอร์)

สำหรับกระบวนการไฮบริดในงานวิจัยนี้ จะใช้กระบวนการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กๆ (Microbubble) จากเทคนิคของ DAF ดังนั้นจึงจะกล่าวรายละเอียดของ Dissolved Air Flotation เพียงเทคนิคเดียวเท่านั้น

2.4 กระบวนการลอยตะกอนด้วยการอัดอากาศให้อิมตัวในน้ำ (Dissolved-air flotation: DAF)

2.4.1 กระบวนการและกลไกการทำงาน

หลักการของกระบวนการ DAF คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียภายใต้ความดัน 2-3 บรรยากาศ จากนั้นจึงปล่อยความดันให้เข้าสู่สภาวะของความดันบรรยากาศ มีวิธีนี้มีอยู่สองระบบด้วยกันคือ ระบบไม่มีการหมุนเวียนและระบบมีการหมุนเวียน

อุปกรณ์จะประกอบไปด้วยหน่วยของการทำให้ตะกอนลอย (Flotation) และเครื่องทำให้อิมตัวด้วยอากาศ (Saturator) ในส่วนของ Flotation จะทำให้เกิดการแยกแหว่งเฟสของแข็งออกจากเฟสของเหลวจากนั้น Saturator จะทำให้อากาศละลายลงไปใน้ำภายใต้ความดัน น้ำที่อิมตัวด้วยอากาศภายใต้ความดัน (จาก saturator) ไหลเข้าไปในส่วนของ Flotation โดยผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure release valve) เมื่อผ่านวาล์วแล้วความดันลดลงเท่ากับความดันบรรยากาศ และน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศภายใต้แรงดันจึงกลายเป็นน้ำที่อิมตัวยังยวดด้วยอากาศ ทำให้อากาศแยกออกมาจากของเหลวในลักษณะเป็นฟองเล็กๆ (Microbubble) และสัมผัสกับอนุภาคของเสียใน้ำ จนอยู่ในรูปก้อนของฟองอากาศและอนุภาค (Bubble-particle agglomerate) ซึ่งมีความหนาแน่น

น้อยกว่าน้ำ แรงลอยตัวทำให้ฟองอากาศและอนุภาคลอยขึ้นระดับน้ำได้ และรวมตัวกันเป็นตะกอนลอย (Floated floc) อยู่ที่ผิวน้ำ

สำหรับระบบมีการหมุนเวียนจะนิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดเปราะแตกง่าย ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะให้น้ำตะกอนไหลเข้าสู่ถังความดันโดยตรง เพราะตะกอนอาจแตกกระจายไป ลักษณะการทำงานของระบบนี้คือ จะนำน้ำจากถัง Flotation ไปยังถังความดัน แล้วจึงปล่อยออกไปรวมกับน้ำที่จะเข้าสู่ระบบ เพื่อนำไปปล่อยเข้าสู่ถัง Flotation สำหรับการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียต่อไป จากนั้นสามารถทำการแยกออกจากน้ำใสได้โดยการกวาดที่ผิวน้ำ (Skimming)

2.4.2 กลไกการทำให้อากาศละลาย

สำหรับกระบวนการ DAF ตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการลอยขึ้นของกลุ่มก้อนอากาศกับอนุภาค คือสัดส่วนอากาศต่อของแข็ง (Air/solid) ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อสัดส่วนดังกล่าวมีดังนี้

1. ความดันที่ทำให้อากาศละลายลงไปในน้ำ
2. สัดส่วนการเวียนกลับ (Saturator feed/Wastewater feed)

ถ้าหากการทำให้อากาศละลายในน้ำไม่เป็นผลดี จะต้องทำให้สัดส่วนเวียนกลับมากพอที่จะให้สัดส่วนดังกล่าวมีค่าเพียงพอตามที่ต้องการ ซึ่งจะเพิ่มขนาดถัง Flotation ด้วยเช่นกัน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและสูญเสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม

วิธีการทำให้อากาศละลาย มี 3 วิธี ดังนี้

2.4.2.1 Sparged air system

หลักการของระบบนี้คือ อัดอากาศเข้าไปในน้ำในรูปของฟองอากาศ ผ่านน้ำที่อยู่ในเครื่องทำให้อิ่มตัว (Saturator) โดยใช้หัวกระจายอากาศแบบละเอียด (Fine bubble diffuser) ระดับความอิ่มตัวของอากาศในน้ำขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศที่ถูกอัดตัวแล้ว และเวลากักเก็บในเครื่องทำให้อิ่มตัว ประสิทธิภาพของระบบสามารถทำให้ดีขึ้นได้โดยทำให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรุนแรงของส่วนประกอบในเครื่องทำให้อิ่มตัว โดยการใช้ใบพัดความเร็วสูง

2.4.2.2 Air injection system

หลักการของระบบนี้คือจะทำการเติมอากาศเข้าที่ด้านดูดของเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง เพื่อให้ผสมกันได้ดีกับน้ำด้วยแรงจากใบพัด อากาศกับน้ำที่ผสมกันแล้ว (Air-water mixture)

ผ่านเข้าไปในเครื่องทำให้อิมตัว และปล่อยให้เกิดการอิมตัวด้วยเวลาที่เพียงพอ ด้วยวิธีนี้ต้องการใช้อากาศที่จะใช้ทำน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศเพียง 25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

2.4.2.3 Packed column system

หลักการของระบบนี้คือการใช้คอลัมน์บรรจุไว้ด้วยตัวกลางแลกเปลี่ยนอากาศ เพื่อให้น้ำจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอด้วยตัวกลางที่บรรจุอยู่ ก่อนที่น้ำจะกระจายเข้าสู่ถังอัดความดัน ด้วยวิธีนี้ทำให้อากาศสามารถละลายเข้าไปในน้ำได้มากขึ้น กลายเป็นน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ

จากทั้งสามวิธีนี้ ระบบ Packed column system มีประสิทธิภาพมากที่สุด การใช้งานที่เหมาะสมไม่จำเป็นต้องผ่านอากาศเข้าไปในลักษณะทวนกระแสน้ำไหล ในทางปฏิบัติจะใช้เวลาของชั้นตัวกลางประมาณ 300 มิลลิเมตร ที่ความดันมากกว่า 3 บรรยากาศ

ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดันสามบรรยากาศ ปริมาณอากาศที่หลุดออกมาเมื่อลดความดันเป็นความดันบรรยากาศ ต่อลิตรของปริมาณที่จ่ายเข้าเครื่องทำให้อิมตัว หาได้ดังนี้ (Bratby และ Marais, 1975)

$$a_p = 19.5P \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \quad (2.24)$$

โดย a_p คือปริมาณอากาศที่แทรกตัวออกมาเมื่อลดความดันเข้าสู่ความดันบรรยากาศ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

P คือความดันของเครื่องทำให้อิมตัวด้วยน้ำ

ขนาดของเครื่องอัดอากาศควรสัมพันธ์กับความดันของเครื่องทำให้อิมตัวด้วยน้ำ

(Saturator): P และปริมาตรของอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการสำหรับละลายในน้ำของเส้นการจ่ายจาก saturator อัตราการเวียนกลับ: S_w (Saturator feed/wastewater feed) และ อัตราการจ่ายน้ำเสีย: Q , อัตราการเกิดอากาศอิสระของเครื่องอัดอากาศ (Free air delivery rate): FAD ควรจะมีค่าอย่างน้อยดังนี้

$$FAD = a_p S_w Q_i \rho_{air} \quad (2.25)$$

ในกระบวนการไฮบริดของงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการสร้างฟองอากาศเล็กๆ (Micro bubbles) ด้วยหลักการแบบ Pack column system โดยมีตัวกลางแลกเปลี่ยนอากาศที่บรรจุไว้ในคอลัมน์ที่ตำแหน่งก่อนที่น้ำจะเข้าสู่ถังอัดความดัน

2.5 กฎของเฮนรี (Henry's Law)

ความเข้มข้นที่คงที่หรืออิ่มตัวของแก๊สที่ละลายในของไหลนั้น ขึ้นกับชนิดของแก๊สและความดันย่อยของแก๊สที่สัมผัสกับของไหล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของแก๊สในบรรยากาศเหนือของไหล และสัดส่วนโมลของแก๊สในของไหลแสดงได้ดังสมการที่ 2.26 ซึ่งเรียกว่ากฎของเฮนรี (Metcalf and Eddy, 2003)

$$p_g = \frac{H}{P_T} x_g \quad (2.26)$$

โดยที่ p_g = สัดส่วนโมลของแก๊สในอากาศ, โมลแก๊ส/โมลอากาศ

H = ค่าคงที่กฎของเฮนรี, $\frac{atm(moleGas / moleAir)}{(moleGas / moleWater)}$

P_T = ความดันรวม ซึ่งโดยทั่วไปใช้ 1 บรรยากาศ

x_g = สัดส่วนโมลของอากาศในน้ำ, โมลแก๊ส/โมลน้ำ

$$= \frac{moleGas(n_g)}{moleGas(n_g) + moleWater(n_w)}$$

สำหรับอากาศ $p_g = 1.0 \text{ moleAir/moleAir}$

$$H = 66400 \frac{atm(moleGas / moleAir)}{(moleGas / moleWater)}$$

$$x_g = \frac{p_g \times P_T}{H}$$

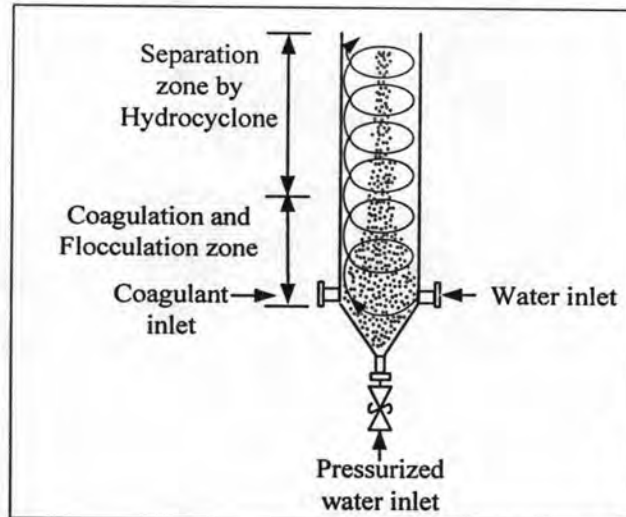
$$x_g = \frac{1.0(moleAir / moleAir) \times 1.0atm}{66400atm \frac{(moleGas / moleAir)}{(moleGas / moleWater)}}$$

$$= 1.506 \times 10^{-5} \text{ โมลอากาศต่อโมลน้ำ}$$

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะนำกฎของเฮนรีมาคำนวณปริมาตรของอากาศที่ได้จากน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ซึ่งแปรเปลี่ยนตามความดันย่อย (Partial pressure) ภายในถึงความดัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลของความดันที่มีต่อลักษณะการสร้างฟลอกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน

2.6 แนวคิดเกี่ยวกับกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชันและการลอยตะกอนของงานวิจัยนี้

กระบวนการไฮบริดของงานวิจัยนี้ เป็นการรวมกระบวนการบำบัดน้ำทั้งสามกระบวนการ อันได้แก่ โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชันและการลอยตะกอน ให้เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เดียวคือ ไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แนวคิดของกระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชันและการลอยตะกอน

บริเวณส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ มีช่องสำหรับจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ และสารละลายโคแอกกูแลนต์ ควบคุมความเร็วแรงแตรเวียนที่บริเวณส่วนล่างนี้ด้วยอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าไป บริเวณส่วนล่างดังกล่าว ควรจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน ส่งผลให้มีการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และอนุภาครวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในขณะเดียวกัน น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศซึ่งผลิตมาจากการใช้เทคนิคการทำให้อากาศละลาย (Dissolved Air Flotation) เมื่อผ่านเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ซึ่งมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศนั้น พยายามแทรกตัวออกมาในลักษณะฟองอากาศเล็กๆ (Microbubbles) ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เกิดขึ้นพร้อมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน ไปแทรกตัวอยู่ในกลุ่มอนุภาคกลายเป็นฟล็อกแบบพิเศษ

สำหรับบริเวณตอนบนของถังปฏิกรณ์ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายใน ส่งผลให้เกิดการแยกกลุ่มฟล็อกพิเศษออกจากน้ำใส โดยกลุ่มฟล็อกพิเศษซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เนื่องจาก

มีฟองอากาศเล็กๆ (Microbubbles) แทรกตัวอยู่ภายในนั้น จะแยกตัวออกมารวมกันที่บริเวณแกนของถังปฏิกริยา

สรุปแนวคิดกระบวนการไฮบริด คือการนำกลไกการหมุนวนของน้ำภายในไฮโดรไซโคลนมาใช้เป็นถังปฏิกริยา สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคกูเลชันและอาศัยปรากฏการณ์แยกระหว่างฟลอกกับน้ำโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในไฮโดรไซโคลน

2.7 การคำนวณในไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไฮโดรไซโคลนให้มีประสิทธิภาพ หรือเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการนำกลไกของไฮโดรไซโคลนมาใช้ โดยทำหน้าที่เป็นถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคกูเลชัน คือความเร็วแกรเดียนท์ (G) ซึ่งมีนิยามคือความแตกต่างระหว่างความเร็วของอนุภาคเทียบกับระยะทาง ดังสมการ 2.20 ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.4. ถ้าความเร็วแกรเดียนท์มีค่าสูง จะทำให้อนุภาคมีความเร็วแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับระยะทาง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะชนหรือสัมผัสกันมาก และส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคกูเลชันสูงตามไปด้วย

สมการความเร็วแกรเดียนท์ในไฮโดรไซโคลน (Gradient velocity) สามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert, 2004)

$$G = \frac{\delta V_y}{\delta R} = \frac{-K \times n}{R^{n+1}} \quad (2.27)$$

โดยที่ $\frac{\delta V_y}{\delta R}$ คือเทอมแสดงความเร็วแกรเดียนท์ในไฮโดรไซโคลน (G)

n คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของไฮโดรไซโคลน

โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-0.8 (Bradley, 1965) ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ที่ค่า 0.8

R คือรัศมีของไฮโดรไซโคลน

K คือค่าคงที่ที่สามารถคำนวณหาได้จากสมการพื้นฐานของไฮโดรไซโคลนดังนี้

$$V_y R^n = K \quad (2.3)$$

V_y คือความเร็วของอนุภาคในแนวเส้นรอบวงของถังปฏิกริยาไฮบริด ณ จุดที่อนุภาคเริ่มเข้าสู่ถังปฏิกริยา (Peripheral velocity) ทั้งนี้ค่า V_y สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.28

$$\alpha = \frac{V_y}{V_i} \quad (2.28)$$

เมื่อ α คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วภายในไฮโดรไซโคลนกับความเร็วที่ท่อจ่ายเข้า (V_i หรือ Inlet velocity) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.8 (Bradley, 1965) และเลือกใช้ที่ค่า 0.6 โดยที่ V_i คือความเร็วของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ท่อด้านเข้าของไฮโดรไซโคลน ซึ่งหาได้จากสมการ

$$V_i = Q / A_i \quad (2.29)$$

เมื่อ A_i คือพื้นที่หน้าตัดของท่อด้านเข้าสำหรับน้ำดิบสังเคราะห์ของถังปฏิกริยาไฮบริด และ Q คืออัตราการไหลเข้าของน้ำดิบสังเคราะห์ในท่อด้านเข้าของถังปฏิกริยาไฮบริด

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรไซโคลน 2 ลักษณะ ลักษณะแรกเป็นถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีรัศมีคงที่ตลอดความยาวของถังปฏิกริยาไฮบริด ทำให้ค่า R และค่า n มีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของถังปฏิกริยาไฮบริด ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้เลือกค่า n เท่ากับ 0.8 และค่า R คงที่เท่ากับ 5 เซนติเมตร ดังนั้นจากสมการทั้งหมดดังที่กล่าวข้างต้น จะเห็นว่า การควบคุมค่าความเร็วแรงแเดียนท์ให้ได้ตามที่ต้องการ สามารถควบคุมได้จากอัตราการไหลเข้านั่นเอง ทั้งนี้สำหรับกระบวนการไฮบริดนี้ จะต้องทำการควบคุมอัตราการไหลให้ได้ค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสมกับกระบวนการต่างๆที่ต้องการให้เกิดภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ยกตัวอย่างเช่น จะต้องควบคุมความเร็วแรงแเดียนท์ (โดยควบคุมจากระบบอัตราการไหลเข้า) สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน หรือการกวนเร็วขึ้นให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 300 ต่อวินาที และสำหรับกระบวนการฟลอกกูเลชันหรือการกวนช้า ให้มีค่าอยู่ในช่วง 60-100 ต่อวินาที เป็นต้น

สำหรับถังปฏิกริยาไฮบริดชนิดที่ 2 ค่ารัศมีจะเพิ่มขึ้นตามแนวแกนของถังปฏิกริยาไฮบริด ทั้งนี้ การคำนวณแสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป

2.8 การออกแบบถังปฏิกริยาไฮบริด ที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

จากสมการ 2.27 ความเร็วแรงแเดียนท์ในถังปฏิกริยาไฮบริด

$$G = \frac{\partial V_y}{\partial R} = \frac{K \times n}{R^{n+1}}$$

จากสมการที่ 2.3
$$V_y R^n = K \quad (2.3)$$

โดย V_y คือความเร็วของน้ำที่หมุนวนภายในถังปฏิริยาไฮบริด (Peripheral velocity) ณ จุดที่อนุภาคเริ่มเข้าสู่ถังปฏิริยา

จะได้
$$G = \frac{V_y R^n \cdot n}{R^{n+1}}$$

จะได้
$$G = \frac{V_y \times n}{R}$$

จากสมการที่ 2.28
$$V_y = V_i \times \alpha \quad (2.30)$$

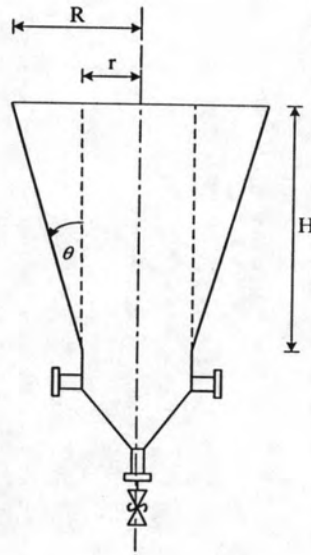
โดย V_i คือความเร็วน้ำดิบที่ทางเข้า (Raw water inlet velocity)

จะได้
$$G = \frac{V_i \cdot \alpha \cdot n}{R}$$

จากสมการที่ 2.29
$$V_i = Q / A_i \quad (2.29)$$

จะได้
$$G = \frac{Q \cdot \alpha \cdot n}{A_i R} \quad (2.31)$$

สมการที่ 2.31 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่ใช้ในการทดลองซึ่งส่งผลต่อความเร็วแกรเดียนท์ภายในไฮโดรไซโคลอน และจะได้นำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิริยาไฮบริดที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นตามแนวแกน



รูปที่ 2.12 การออกแบบถังปฏิกิริยาไฮบริดที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

จากรูปที่ 2.12 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tan \theta = \frac{(R - r)}{H}$$

$$R = H \tan \theta + r \quad (2.32)$$

แทนค่ารัศมีจากสมการ 2.32 ลงในสมการที่ 2.31

$$\text{จะได้} \quad G = \frac{Q \cdot \alpha \cdot n}{A_i \cdot (H \tan \theta + r)} \quad (2.33)$$

สมการ 2.33 นี้ เกิดจากการรวมระหว่างสมการพื้นฐานของไฮดรอลิกโคลน กับการพิจารณารูปร่างทางเรขาคณิตของถังปฏิกิริยาไฮบริดของงานวิจัยนี้เท่านั้น จะถือเป็นสมการพื้นฐานหลักสำหรับการคำนวณ เพื่อใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยาไฮบริดที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นตามแนวแกน โดยใช้การควบคุมความเร็วแรงแผ่นต้นให้เหมาะสมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันที่ต้องการให้เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด

2.9 งานวิจัยที่ผ่านมา

Roldan-villasana และ Williams (1999) ศึกษาการแยกและการแตกของฟล็อกในไฮโดรไซโคลน (Classification and breakage of flocs in hydrocyclones)

งานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ถึง 50 มิลลิเมตร ในการคัดแยกของผสมที่ประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก (ต่ำกว่า 2 ไมครอน) ต้องมีการรวมอนุภาคเล็กๆเหล่านั้น ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนเพื่อสามารถแยกได้โดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง แต่มีงานศึกษาที่กล่าวว่า การเติมสารเพื่อให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคเล็กๆนั้นไม่ประสบผลสำเร็จ เนื่องจากแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนทำให้เกิดการแตกออกของกลุ่มอนุภาค แต่ยังไม่มียานศึกษาใดที่แสดงถึงกลไกการแยกของกลุ่มอนุภาค และการแตกของกลุ่มอนุภาคในขั้นตอนการแยก อีกทั้งยังไม่มีแบบจำลองที่สามารถอธิบายทั้งการแตกและการแยกของอนุภาค

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กเพื่อทำการศึกษาเพิ่มเติมจากสิ่งที่ยานวิจัยที่ผ่านมายังไม่สามารถหาคำตอบได้ ซึ่งคือแบบจำลองที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การแตกและการแยกของอนุภาคได้

ข้อจำกัดที่สำคัญของไฮโดรไซโคลนสองอย่างก็คือ การที่ไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกของแข็งออกมาได้อย่างสมบูรณ์และข้อจำกัดด้านการไหลภายใต้แรงหนีศูนย์กลาง ขนาดตัดที่เล็กที่สุดที่สามารถแยกได้ด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรอยู่ที่ 2 ไมครอน (Rushton, Ward และ Holdich, 2000) (โดยการใช้ซิลิกาเป็นของแข็ง) ในการปรับเปลี่ยนเพื่อแก้ไขข้อจำกัดนั้นอาจทำได้ดังนี้

1. การต่อไฮโดรไซโคลนเข้าด้วยกันแบบอนุกรมหรือขนาน
2. ทำการรวมกลุ่มอนุภาคเล็กละเอียดก่อนที่จะส่งเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

วิธีการแรกเป็นที่นิยมมากเพราะมีค่าการติดตั้งและดำเนินการต่ำ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่บำบัดอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ได้ การรวมกลุ่มอนุภาคที่เล็กมากๆเพื่อให้ออกมาเป็นก้อนอนุภาคเดี่ยวซึ่งจะมีพฤติกรรมการแยกเหมือนอนุภาคขนาดใหญ่ โดยการใช้สารโคแอกกูแลนต์ทางไฟฟ้า (Electrostatic coagulant) หรือสารโพลีเมอร์เป็นฟล็อกกูแลนต์ (Polymeric flocculant) เพื่อรวมคอลลอยด์ให้กลายเป็นกลุ่มอนุภาค ความเข้มข้นของอนุภาคที่ถูกแยกออกมาทาง Underflow จะสูงขึ้น

นอกจากข้อดีที่ได้กล่าวไปแล้ว Roldan-Villasana และ Williams (1999) ได้กล่าวว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์และฟล็อกกูแลนต์เพื่อบำบัดของผสมก่อนที่จะส่งเข้าไปในไฮโดรไซโคลนนั้นไม่ค่อยประสบความสำเร็จในทางปฏิบัติ เนื่องจากกลุ่มอนุภาค (Flocs) ไม่สามารถจะคงสถานะไว้ได้ภายใต้แรงเฉือนในไฮโดรไซโคลน (Tangel และ Brison, 1955; Kelsall, 1952; Svarovsky,

1980; Cobb และคณะ, 1973 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999) อย่างไรก็ตาม ในทางตรงข้ามกับที่กล่าวไปนั้น มีบางรายงานกล่าวว่าสารฟล็อกกูแลนท์สามารถบำบัดอนุภาคขนาดเล็กและสารอินทรีย์แขวนลอยก่อนที่จะแยกในไฮโดรไซโคลน งานศึกษานี้แสดงความเป็นไปได้ในการใช้ฟล็อกกูแลนท์กับอนุภาคละเอียดก่อนส่งเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังรายงานว่ ในงานศึกษาแบบจำลองที่ผ่านมานั้น มีทั้งกล่าวถึงการแตกของกลุ่มอนุภาค (Floc) หรือพฤติกรรมการไหลภายในไฮโดรไซโคลน แต่ยังไม่มีการศึกษาปรากฏการณ์ทั้งการแตกและการแยกภายในไฮโดรไซโคลน (Breakage-separation)

Plitt และ Lilge (1967 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999: 1229) ทำการศึกษาโดยใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร และใช้โพลีอะครีลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นสารฟล็อกกูแลนท์ ทำการบำบัดน้ำผสมดินเหนียว (Clay slurry) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 ไมโครเมตร และบำบัดทราย (Silica) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 25 ไมโครเมตร

ผลการวิจัยพบว่าไฮโดรไซโคลนสามารถลดปริมาณของแข็งที่ออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) เมื่อทำการบำบัดกับน้ำผสมดินเหนียว (Clay slurry) ได้ 72 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลการบำบัดกับ Silica สามารถลดปริมาณของแข็งที่ออกทาง Overflow ได้ 50 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ในการใช้กระบวนการฟล็อกกูแลชั่นกับอนุภาคของแข็งแขวนลอยก่อนนำมาบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลนนั้น ประสบความสำเร็จมากกว่า เมื่ออนุภาคที่ต้องการบำบัดนั้นมีขนาดเล็กกว่า เช่น ดินเหนียว (Clay)

Visman และ Hamza (1973 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999: 1229) ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนในการบำบัด (แยก) ถ่านหินจากโรงงานอุตสาหกรรม (Coal) ซึ่งผ่านการทำการกระบวนการฟล็อกกูแลชั่น ผลการทดลองสรุปว่ากลุ่มอนุภาค (Floc) สามารถคงสภาพจากแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนได้เมื่อใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 ถึง 50 มิลลิเมตร แต่ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง ผลของการใช้กระบวนการฟล็อกกูแลชั่นก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน (Flocculated system) กับการบำบัดแบบไม่มีกระบวนการฟล็อกกูแลชั่น (Non-flocculated system)

Wallace และคณะ (1980 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999: 1229) ศึกษาการใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัว ต่อกันแบบขนานเพื่อบำบัดคาโอลิไนต์ (kaolinite) เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย

0.77 ไมครอน ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดรวมสูงขึ้นเมื่อมีการเติมสารละลาย โพลีอะครีลาไมด์ (Polyacrylamide) เพื่อใช้เป็นสารฟล็อกกูแลนท์

Borts และคณะ (1982 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999: 1229) ทำการเพิ่มประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลนโดยการเติมโพลีอะครีลาไมด์ (Poly-acrylamide) เพื่อใช้เป็นสารฟล็อกกูแลนท์ให้กับของผสม (Slurry) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดของแข็งได้ 94 เปอร์เซ็นต์ จากเดิมเมื่อไม่ได้ใช้สารฟล็อกกูแลนท์ที่สามารถกำจัดได้เพียง 53 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของของผสม (Slurry)

Williams และ Roldan-Villasana (1991 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999) ทำการพัฒนาประสิทธิภาพโดยการใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร Vortex finder ขนาด 2.6 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัวต่อกันแบบขนาน บำบัดคากโอลิน (Kaolin) ที่ผ่านการทำฟล็อกกูแล้นด้วยการใช้โพลีอะครีลาไมด์เป็นสารฟล็อกกูแลนท์

จากงานวิจัยทั้งข้างต้นแสดงให้เห็นว่า มีการนำสารสารเคมีมาประกอบการใช้กับการบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการนำสารเคมีมาใช้ในขั้นตอนโคแอกกูเลชันเช่นกัน

Bidault A. และคณะ. (1997) ศึกษาการแตกตัวของฟล็อกภายใต้แรงเฉือนสูงจากเครื่องสูบน้ำและไฮโดรไซโคลน โดยชนิดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิด ชนิดแรกเป็นแป้งผง (Talc) ผสมกับน้ำ เข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร สองคือตัวอย่างน้ำสลัดจ์จากถังบำบัดตะกอนเร่งปริมาณ 500 ลิตร ชนิดที่สามเป็นการรวมตัวอย่างที่หนึ่งและสองเข้าด้วยกัน ชนิดที่สี่เป็นตัวอย่างที่สามที่ผ่านการทำให้เสถียรภาพแล้วเป็นเวลา 4 เดือน ทำการทดลองด้วยการสูบน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องสูบน้ำ จากนั้นจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ด้วยความดัน 3 บาร์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกทางด้านบน (Overflow) และน้ำที่ออกทางด้านล่าง (Underflow) แล้วนำมาวิเคราะห์

ผลการทดลองพบว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกแป้งขนาดเล็กๆ ได้ดีกว่า สำหรับการทดลองกับตัวอย่างจากถังบำบัดตะกอนเร่งพบว่าฟล็อกเกิดการแตกตัวหลังจากผ่านเครื่องสูบน้ำ ไม่เกิดการแยกภายในไฮโดรไซโคลนและไม่มีคุณลักษณะที่สามารถตกตะกอนได้

สำหรับตัวอย่างที่สามได้ผลเช่นเดียวกันนั่นคือ ฟล็อกแตกตัวหลังจากผ่านเครื่องสูบน้ำ ขนาดของฟล็อกที่ผ่านไฮโดรไซโคลนประมาณ 10 ถึง 15 ไมครอน เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนแล้วน้ำ

ยังคงมีความชุ่มและมีอนุภาคแขวนลอยอยู่ แบ่งฝงที่รวมตัวกันกลายเป็นฟลอกขนาดใหญ่ (Macrofloc) แตกออกเมื่อผ่านเครื่องสูบน้ำ การแยกภายในไฮโดรไซโคลอนไม่ได้เพิ่มการแตกของฟลอก เพราะแรงเฉือนจากเครื่องสูบน้ำสูงเพียงพอทำให้เกิดการแตกของกลุ่มตะกอนอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน

ในขณะที่ตัวอย่างที่สี่ ฟลอกมีการแตกบ้างเล็กน้อยเมื่อผ่านเครื่องสูบน้ำ ขนาดของฟลอก ลดลงจาก 120 ไมครอน เป็น 60 ไมครอน แต่การแยกภายในไฮโดรไซโคลอนไม่ได้ทำลายก้อนตะกอน และยังสามารถตกตะกอนได้ค่อนข้างดี ผลการแยกเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะมากกว่าความแตกต่างของขนาด แสดงให้เห็นว่าการแตกของฟลอกภายใต้แรงเฉือนสูงๆภายในเครื่องสูบน้ำและไฮโดรไซโคลอน ขึ้นกับการเตรียมฟลอกให้มีคุณสมบัติที่ดีพอจึงจะคงสภาพภายใต้แรงเฉือนนั้นได้

Woodfield และ Bickert (2004) ศึกษาการแยกฟลอกภายในไฮโดรไซโคลอน โดยสนใจที่การแตกตัวของฟลอกและกลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อฟลอก (Separation of flocs in hydrocyclones-significance of floc breakage and floc hydrodynamics)

ทำการทดลองทำโดยการใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร และทำการบำบัดอนุภาคอะลูมินา ไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate) ด้วยกระบวนการฟลอกกู่เลชันและใช้โพลีเมอร์เป็นสารฟลอกกู่แลนท์ ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอนที่ทดลองด้วยความดัน 100 กิโลปาสกาล

ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้กระบวนการฟลอกกู่เลชัน *ประสิทธิภาพลด* (Reduced efficiency) เพิ่มขึ้นจาก 75 เปอร์เซ็นต์เป็น 84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีที่ผ่านมา ซึ่งกล่าวไว้ว่า แรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลอนจะทำให้ฟลอกแตกตัว และไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนด้วยการทำกระบวนการฟลอกกู่เลชันก่อนเข้าสู่การแยกด้วยไฮโดรไซโคลอนได้

Woodfield และ Bickert พบว่าในการทดลองมีการแตกของฟลอกภายในไฮโดรไซโคลอน แต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนน้อยมาก และอธิบายถึงปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฟลอกแตกตัวในไฮโดรไซโคลอนคือความหนาแน่นและกลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อฟลอก (Floc hydrodynamics) มิใช่แรงเฉือน

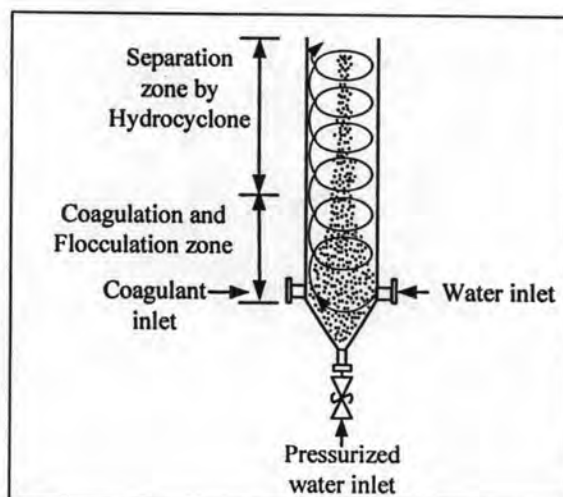
นอกจากนี้ขนาดของฟลอกที่ออกทางออกด้านบน (Overflow) มีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับฟลอกที่ออกที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) แต่ยังคงทำให้*ประสิทธิภาพลด* (Reduced efficiency) ของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องมาจากอนุภาคขนาดเล็กจะยึดรวมตัวเป็นฟลอกกับอนุภาคหยาบด้วยสารฟลอกกู่แลนท์ และถูกแยกออกที่ Underflow

ดังนั้นสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของฟล็อกและกลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อฟล็อก (Floc Hydrodynamics) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากกว่าแรงเฉือน ต่อการแตกตัวของฟล็อกในไฮโดรไซโคลน

ข้อมูลจากงานวิจัยของ Bidault และคณะ (1997) กับ Woodfield และ Bickert (2004) สนับสนุนแนวคิดที่ว่า ฟล็อกสามารถคงตัวอยู่ในไฮโดรไซโคลนได้ หากมีการเตรียมฟล็อกให้แข็งแรงพอต่อแรงเฉือนที่มีภายในไฮโดรไซโคลน

Puprasert (2004) ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลนโคแอกกูเลชัน - ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอน เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำดิบสังเคราะห์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา ถึงปฏิกิริยาที่ใช้เป็นไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร น้ำดิบใช้เบนโทไนท์เพื่อสร้างความขุ่นสังเคราะห์ในสภาพคอลลอยด์ และใช้โพลิเมอร์ประจุบวกชนิด EM470 เป็นสารโคแอกกูแลนต์

การทดลองทำโดยสูบน้ำจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์เข้าไปในไฮโดรไซโคลน ในทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบวงของไซโคลน พร้อมกับน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยความเร็วแรงแทงเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในเวลาเดียวกันก็ทำการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ เข้าทางส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศผ่านเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนซึ่งมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ทำให้อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ เปลี่ยนสถานะและพยายามแทรกตัวออกมาในลักษณะฟองอากาศเล็กๆ (Microbubble) ณ จุดที่มีการจ่ายเข้าของน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ, น้ำดิบสังเคราะห์และโคแอกกูแลนต์ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ มีการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็ก(Microbubble)แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของฟล็อก



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นสำหรับงานวิจัยของ Puprasert (2004)

งานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็นสามส่วนดังนี้

1. การทดลองความเป็นไปได้ของกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน - ฟล็อกกูเลชันและการลอยตะกอนโดยเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง ผลการทดลองที่ได้นั้นไม่เกิดปรากฏการณ์ที่คาดหวัง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่าน้ำภายในไฮโดรไซโคลน ยังคงขุ่นด้วยอนุภาคคอลลอยด์ของเบนโทไนต์ อย่างไรก็ตามเมื่อทดลองการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง ทำโดยเดินระบบสูบน้ำจ่ายเส้นการไหลทั้งสามสู่ไฮโดรไซโคลน และหยุดการเดินระบบโดยการปิดเครื่องสูบน้ำที่สูบน้ำจากทั้งสามส่วน คือน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ น้ำดิบสังเคราะห์และโคแอกกูแลนท์ พบว่าเมื่อหยุดการจ่ายน้ำทั้งสามส่วนดังกล่าวเข้าไป น้ำภายในไฮโดรไซโคลนยังคงหมุนวนด้วยความเฉื่อยต่อไป แต่มีความเร็วลดลง เกิดฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้นในไฮโดรไซโคลนและฟล็อกดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันอยู่ตรงแกนกลางของไซโคลน และลอยขึ้นสู่ด้านบน เมื่อนำกลุ่มอนุภาคหรือฟล็อกที่เกิดขึ้นมาส่องด้วยกล้องไมโครสโคป พบว่าเป็นฟล็อกแบบพิเศษ คือมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้ฟล็อกลอยขึ้น

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อดูพฤติกรรมของฟล็อกที่ลอยขึ้น เนื่องจากในการทดลองที่ 1 นั้น ผลการทดลองพบว่าฟล็อกที่เกิดขึ้นไม่ได้ลอยขึ้นสู่ด้านบนของไฮโดรไซโคลนทั้งหมด แต่ยังมีบางส่วนที่จมอยู่ด้านล่าง ดังนั้นจึงทำการทดลองนี้โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ (Pressurized water) 4 ค่า ได้แก่ 14, 21, 28 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศเพิ่มขึ้น ฟล็อกที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนลอยเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งถึงค่าที่ 35 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าฟล็อกลอยขึ้นทั้งหมด เกิดการแบ่งชั้นระหว่างน้ำใส และกลุ่มฟล็อกที่ลอยอยู่ด้านบนอย่างชัดเจน ซึ่งที่อัตราการไหล 35 ลิตรต่อชั่วโมงนี้ มีค่าเท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราการไหลเข้าของน้ำดิบสังเคราะห์ อัตราการไหลดังกล่าวมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับกระบวนการลอยตะกอนแบบวิธี Dissolved Air Flotation (DAF) ที่ใช้กันทั่วไป โดยกระบวนการ DAF นั้น ต้องการปริมาณน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศสูงถึง 30-50 เปอร์เซ็นต์ (เกรียงศักดิ์, 2539)

การทดลองส่วนที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อปรับเปลี่ยนค่าความเร็วแรงแคเดียนท์ให้เหมาะสมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วแรงแคเดียนท์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วของน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน และควบคุมให้บริเวณด้านล่างของไซโคลน มีค่าความเร็วแรงแคเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ส่วนบริเวณตอนกลางของไฮโดรไซโคลนนั้น ควบคุมให้มีความเร็วแรงแคเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการฟล็อกกูเลชัน และสุดท้ายทางด้านบนของไฮโดรไซโคลน แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ทำให้ฟล็อกพิเศษแยกตัวออกมาจากน้ำมารวมกันที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลน ผลการทดลองพบว่า ยังไม่เกิดปรากฏการณ์ตามที่คาดหวังไว้

เนื่องจากเมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ เพื่อให้ความเร็วแรงแเดียนท์เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันบริเวณด้านล่าง ทำให้ความเร็วแรงแเดียนท์ในตอนกลางของถังสูงเกินไป ไม่เหมาะกับการเกิดกระบวนการฟลอกกูเลชัน และเมื่อปรับความเร็วแรงแเดียนท์ที่เข้าไฮโดรไซโคลนเพื่อให้ทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนเหมาะสมกับกระบวนการฟลอกกูเลชัน ส่งผลให้บริเวณด้านล่างมีความเร็วแรงแเดียนท์ไม่เพียงพอต่อการเกิดโคแอกกูเลชัน และทางตอนบนของถังปฏิริยามิแรงหนีศูนย์กลางต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกตัวของฟลอกลดลงตามไปด้วย

สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

1. การทดลองประสบผลสำเร็จในการการสร้างฟลอกแบบพิเศษ ซึ่งคือฟลอกของอนุภาคเบนโทไนท์ กับสารโคแอกกูแลนต์ที่มีฟองอากาศที่ละลายมากับน้ำที่อ้อมตัวด้วยอากาศแทรกอยู่ภายในฟลอกนั้น
2. ปรากฏการณ์ที่คาดหวังไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ยังไม่สามารถทำได้สำเร็จในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง
3. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชันและการลอยตะกอนนี้มีความเป็นไปได้ เนื่องจากมีฟลอกแบบพิเศษเกิดขึ้น

ดังนั้น จึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาวิธีการดำเนินการเพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันภายในไฮโดรไซโคลน โดยให้เป็นการไหลแบบต่อเนื่อง เพื่อสามารถนำไปประยุกต์หรือศึกษาเพื่อการใช้งานจริงต่อไป ซึ่งมีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสภาพ หรือลักษณะของถังปฏิริยาด้วยการคำนวณ และปรับเปลี่ยนปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น ดังจะกล่าวต่อไป