บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟลอกกูเลชันและลอยตะกอน

1. ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก
2. ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย
2. ถังเก็บน้ำประปา
3. ถังรองรับน้ำล้น
4. ถังอัดความดัน
5. ถังอากาศภายใต้ความดัน
6. ถังเตรียมและเก็บสารโคแอกกูแลนท์
7. ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบสังเคราะห์
8. วาล์วไฟฟ้าสามทาง
9. วาล์วลดความดัน (Releasing valve)
10. เกจวัดความดัน
11. ตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศ
12. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำภายในถังความดัน
13. เครื่องสูบน้ำ
14. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์
2. กล้องถ่ายรูปดิจิตอล
3. ชุดอุปกรณ์การกรองสำหรับการหาของแข็งแขวนลอย
4. ชุดอุปกรณ์การทำจาร์เทสต์ (Jar test)
5. เครื่องมือวัดความขุ่น

3.1.3 สารเคมี

1. เบนโทไนท์ (Bentonite)
2. โคแอกกูแลนท์แบบโพลีเมอร์ประจุบวก FO107
3. โคแอกกูแลนท์แบบโพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ AN910
4. โคแอกกูแลนท์แบบโพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ AN934
5. สารละลายสำหรับปรับค่าพีเอช

3.2 การดำเนินการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้จะดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ Laboratoire d'ingénierie des procèdes de l'environnement เมืองตูลูส ประเทศฝรั่งเศส ตั้งแต่วันที่ 4 พฤษภาคม 2548 ถึงวันที่ 31 มกราคม 2549 ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับสถาบัน INSA (Institut National des Sciences Appliquées) ประเทศฝรั่งเศส โดยกำหนดแผนการวิจัยให้สอดคล้องวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

ในขั้นต้นออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 5 การทดลองย่อยได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบไฮโดรไซโคลน 2 ชนิด คือถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด กับถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน
2. การทดสอบผลของความแตกต่างของชนิดโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการไฮบริด
3. การทดลองเปรียบเทียบผลกระทบจากความเร็วแกรเดียนท์ต่อปรากฏการณ์บำบัดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาไฮบริดด้วยวิธีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าถังปฏิกิริยาไฮบริด
4. การทดลองเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศกับปริมาณน้ำดิบสังเคราะห์ที่ใช้ในกระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชันและการลอยตะกอน
5. การทดสอบผลของการทำโคแอกกูเลชันก่อนเข้าถังปฏิกิริยาไฮบริด (Pre-coagulation) ด้วยท่อผสม (Static mixer) กับการทำโคแอกกูเลชันภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด (Coagulation in

reactor) ที่มีต่อการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชัน และการลอยตะกอน

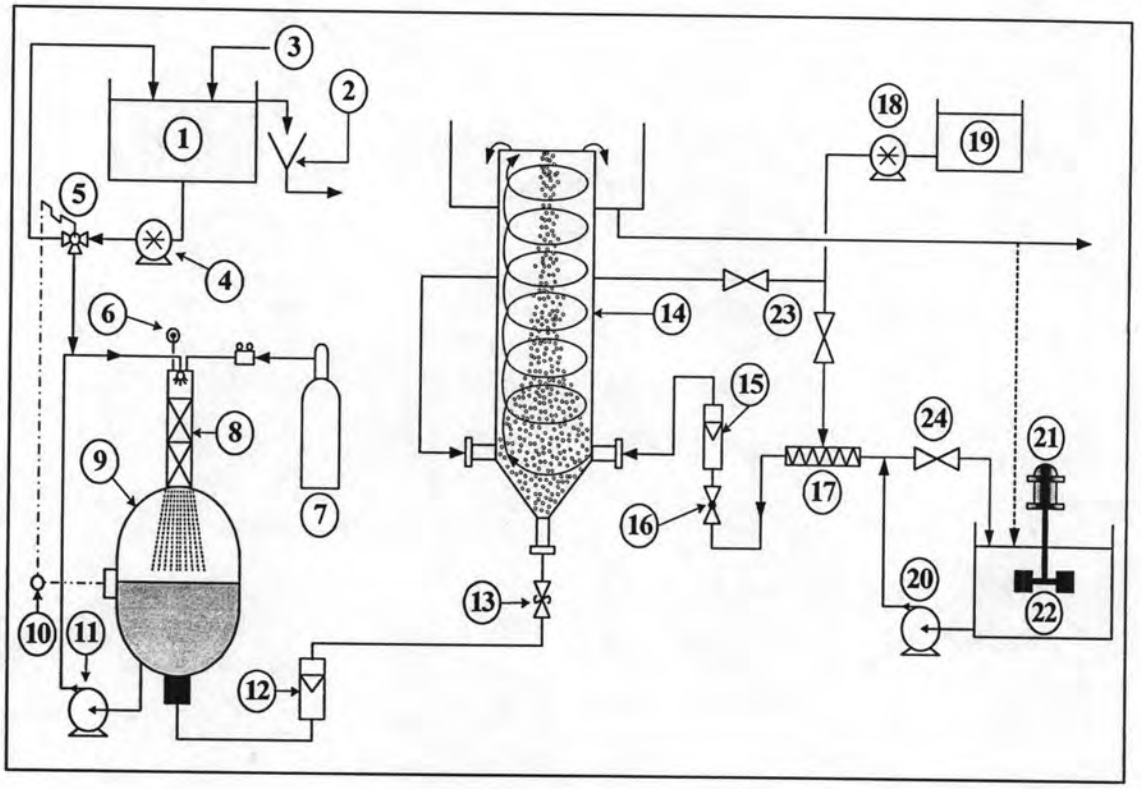
แต่ในการปฏิบัติจริง ขั้นตอนการทดลองที่ 5 การทดสอบผลของการทำโคแอกกูเลชันก่อนเข้าถังปฏิกิริยาไฮบริด (Pre-coagulation) ด้วยท่อผสม (Static mixer) กับการทำโคแอกกูเลชันภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด (Pre-coagulation inside reactor) ที่มีต่อการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชันและการลอยตะกอน ผลการทดลองที่ได้พบว่า การทำโคแอกกูเลชันก่อนเข้าถังปฏิกิริยาไฮบริดนั้น ไม่เกิดการรวมตัวของ ฟลอกภายในถังปฏิกิริยา ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป และด้วยเหตุดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ตัดแผนการทดลองที่ทำกับถังปฏิกิริยาไฮบริดแบบมีการทำโคแอกกูเลชันก่อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยา แต่ได้เพิ่มการทดลองที่ศึกษาการเพิ่มความเร็วแกรเดียนท์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดด้วยการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด เพื่อศึกษาผลของความเร็วแกรเดียนท์ที่เปลี่ยนไป ณ ตำแหน่งจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้า

3.3 ส่วนประกอบและการติดตั้งของ Pilot plant ที่ใช้ในการทดลอง

แบ่งเป็นสามส่วนใหญ่ๆดังนี้

1. ส่วนที่ใช้สร้างน้ำให้อิ่มตัวด้วยอากาศ (Pressurized water producer)
2. ส่วนที่เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์และเตรียมสารโคแอกกูแลนท์
3. ไฮโดรไซโคลนหรือถังปฏิกิริยาไฮบริด

รายละเอียดแต่ละขั้นตอนและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.1 จะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์

1. ถังเก็บน้ำประปาเพื่อนำไปละลายด้วยอากาศ
2. ถังรองรับน้ำล้น
3. น้ำที่เติมเข้าสู่ระบบ
4. เครื่องสูบน้ำ
5. วาล์วไฟฟ้าสามทาง
6. เกจวัดความดัน
7. ถังอากาศภายใต้ความดัน
8. ตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศ
9. ถังความดันสำหรับผลิตน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ
10. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำภายในถังความดัน
11. เครื่องสูบน้ำหมุนเวียน
12. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล
13. วาล์วลดความดัน
14. ถังปฏิกิริยาไฮบริด (ซึ่งมีสองชนิด)
15. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล
16. วาล์วควบคุมทิศทางการไหล
17. ท่อผสม (Static mixer)
18. เครื่องสูบน้ำจากถังเก็บสารโคแอกกูแลนท์
19. ถังเตรียมและเก็บสารโคแอกกูแลนท์
20. เครื่องสูบน้ำจากถังเก็บน้ำเสียสังเคราะห์
21. เครื่องกวนผสม
22. ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบสังเคราะห์
23. วาล์วสำหรับปรับทิศทางของการไหล
24. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลเข้าของน้ำดิบสังเคราะห์

3.3.1 ส่วนที่ใช้สร้างน้ำให้อิ่มตัวด้วยอากาศ

การสร้างน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ซึ่งโดยปกติจะใช้ในกระบวนการทำให้เกิดตะกอนลอย (Flotation) ทำโดยการเตรียมน้ำไว้ในถังเก็บน้ำ (1) ซึ่งมีการเติมน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำไว้ให้เพียงพอตลอดเวลา (3) และสูบน้ำจากถังเก็บน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำ เพื่อส่งไปที่ถังความดัน ติดตั้งวาล์วสามทางที่เส้นทางก่อนเข้าสู่ถังความดันเพื่อควบคุมปริมาณน้ำให้เหมาะสมตามที่ต้องการก่อนส่งไปที่ถังความดัน (9) หากปริมาณน้ำภายในถังความดันมีมากเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ สัญญาณจะส่งไปที่วาล์วสามทาง(5) เพื่อเวียนน้ำกลับไปที่ถังเก็บน้ำข้างต้น ก่อนที่น้ำประปาจะเข้าสู่ถังความดันนั้นจะต้องผ่านตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศ (8) เพื่อทำให้น้ำกระจายตัวในขณะเข้าสู่ถังความดัน และเพิ่มโอกาสให้น้ำสัมผัสอากาศมากขึ้น ที่ถังความดันจะมีอุปกรณ์ตรวจสอบระดับน้ำ (10) หากระดับน้ำต่ำเกินกว่าที่ต้องการ สัญญาณจะส่งไปที่วาล์วสามทางเพื่อปรับให้ปริมาณน้ำเข้าถังความดันมากขึ้น เครื่องสูบน้ำที่ต่ออยู่ด้านล่างของถังความดัน (11) ทำหน้าที่สูบน้ำวนเวียนกลับเข้าไปในถังอีก เพื่อให้แน่ใจว่าอากาศจะละลายลงไปในน้ำได้อย่างสมบูรณ์ ความดันในถังความดันควบคุมโดยใช้วาล์วปรับความดัน และจากอากาศเตรียมจากถังอากาศภายใต้ความดัน (7) โดยการส่งอากาศผ่านวาล์วปรับความดันมาเข้าที่ถังความดัน โดยผ่านตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศเช่นเดียวกัน และตรวจสอบความดันภายในด้วยมาโนมิเตอร์ (6) จากนั้นทำการส่งน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศไปที่ถังปฏิกิริยาไฮบริดโดยผ่านวาล์วลดความดัน (13)

3.3.2 ส่วนที่เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์และสารโคแอกกูแลนท์

น้ำที่ใช้แทนน้ำดิบในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำดิบสังเคราะห์ที่เกิดจากการผสมระหว่างน้ำประปากับเบนโทไนท์ เพื่อเป็นตัวแทนของคอลลอยด์ การเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ทำได้โดยนำน้ำประปาและเบนโทไนท์มากวนด้วยใบพัดอย่างสมบูรณ์เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ เพื่อให้มั่นใจว่าเบนโทไนท์กระจายตัวภายในน้ำ กลายเป็นคอลลอยด์ซึ่งจะไม่สามารถตกตะกอนได้เองภายในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง หลังจากนั้น นำน้ำดิบมาเตรียมไว้ในถังเก็บน้ำดิบสังเคราะห์ (22) และเตรียมสารโคแอกกูแลนท์ไว้อีกถังหนึ่ง (19) ติดตั้งเครื่องสูบน้ำ (18) เพื่อสูบน้ำจากทั้งสองส่วนผ่านวาล์วที่สามารถทำการบังคับทิศทางได้

สำหรับสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ได้แก่ โคแอกกูแลนท์ที่มีประจุบวก FO107 โคแอกกูแลนท์ที่มีประจุลบและไม่มีประจุ AN019 และ AN934 สำหรับปริมาณหรือความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมหาได้จากวิธีการทำจาร์เทสต์ (Jar test) ดังแสดงในภาคผนวก ก

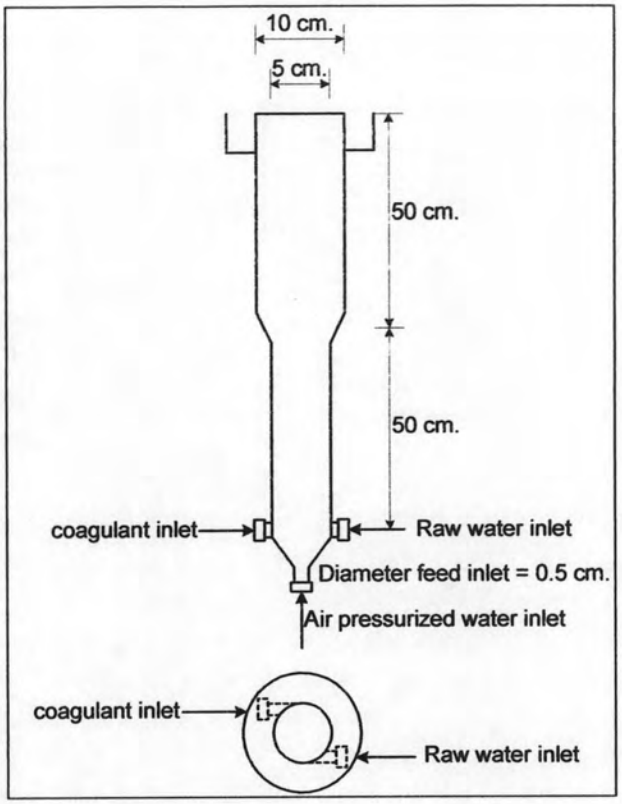
3.3.3 ส่วนถังปฏิกิริยาไฮบริด

ภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดควรจะเกิดกระบวนการทั้งสามขั้นตอน ได้แก่ โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชัน และตะกอนลอย (Flotation) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ถังปฏิกิริยามีช่องท่อสำหรับจ่ายน้ำเข้าสามทาง คือท่อสำหรับจ่ายสารโคแอกกูแลนท์ โดยจ่ายเข้าลักษณะสัมผัสกับเส้นรอบวงของถังปฏิกิริยาไฮบริด ทางที่สองคือท่อสำหรับจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ ซึ่งจะจ่ายเข้าลักษณะสัมผัสกับผิวของถังปฏิกิริยาไฮบริดเช่นกัน ทางที่สามคือท่อสำหรับจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ (Pressurized water) โดยช่องทางเข้าจะอยู่ที่ปลายกรวยด้านล่างของถังปฏิกิริยาไฮบริด มีวาล์วลดความดัน (หมายเลข 13) ก่อนถึงปากกรวย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศกับความดันบรรยากาศมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการฟุ้งตัวจนทำให้ฟองอากาศตีกลับที่บริเวณปากทางเข้าถังปฏิกิริยา

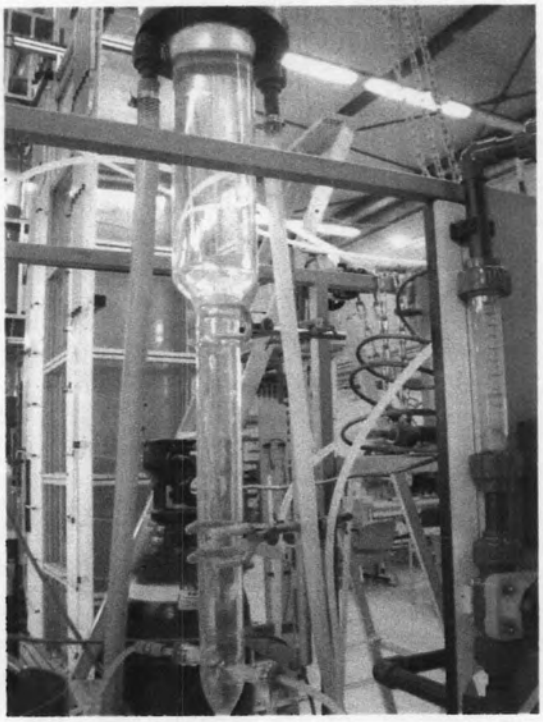
ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาลักษณะถังปฏิกิริยาสองแบบคือ 1 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด และ 2 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาตัวแปรต่างๆ มาเปรียบเทียบกัน โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.3.1 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก

ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกประกอบด้วยส่วนที่เป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด เพื่อให้บริเวณตอนล่างซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน และเมื่อน้ำเคลื่อนที่มาสู่ด้านบนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 10 เซนติเมตร ทำให้ความเร็วแกรเดียนท์ลดต่ำลงเหมาะสมสำหรับกระบวนการฟลอกกูเลชัน โดยรายละเอียดรูปร่างแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ และถังปฏิกิริยาแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ขนาดและรายละเอียดของถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด



รูปที่ 3.3 ถังปฏิกิริยาทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด

ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดนี้ ทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณตอนบนของถังปฏิกิริยา ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.2 เพื่อลดความเร็วแกรเดียนท์ให้เหมาะสมกับกระบวนการฟลอกกูเลชัน เนื่องจากเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มจะทำให้ความเร็วแกรเดียนท์ลดลง ถังปฏิกิริยานี้มีรายละเอียดดังนี้

1. ช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

   ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

   พื้นที่หน้าตัด = $\frac{\pi d^2}{4}$ = 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

2. ช่องจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ (Pressurized water inlet)

   ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

   พื้นที่หน้าตัด = 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

3. ช่องจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนท์

   ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

   พื้นที่หน้าตัด = 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

4. ตัวถังปฏิกิริยาไฮบริด

   ส่วนล่าง

   ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 5 เซนติเมตร

   ความสูง = 50 เซนติเมตร

   ส่วนบน

   ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 10 เซนติเมตร

   ความสูง = 50 เซนติเมตร

5. ปริมาตรของถังปฏิกิริยาไฮบริด = 5 ลิตร

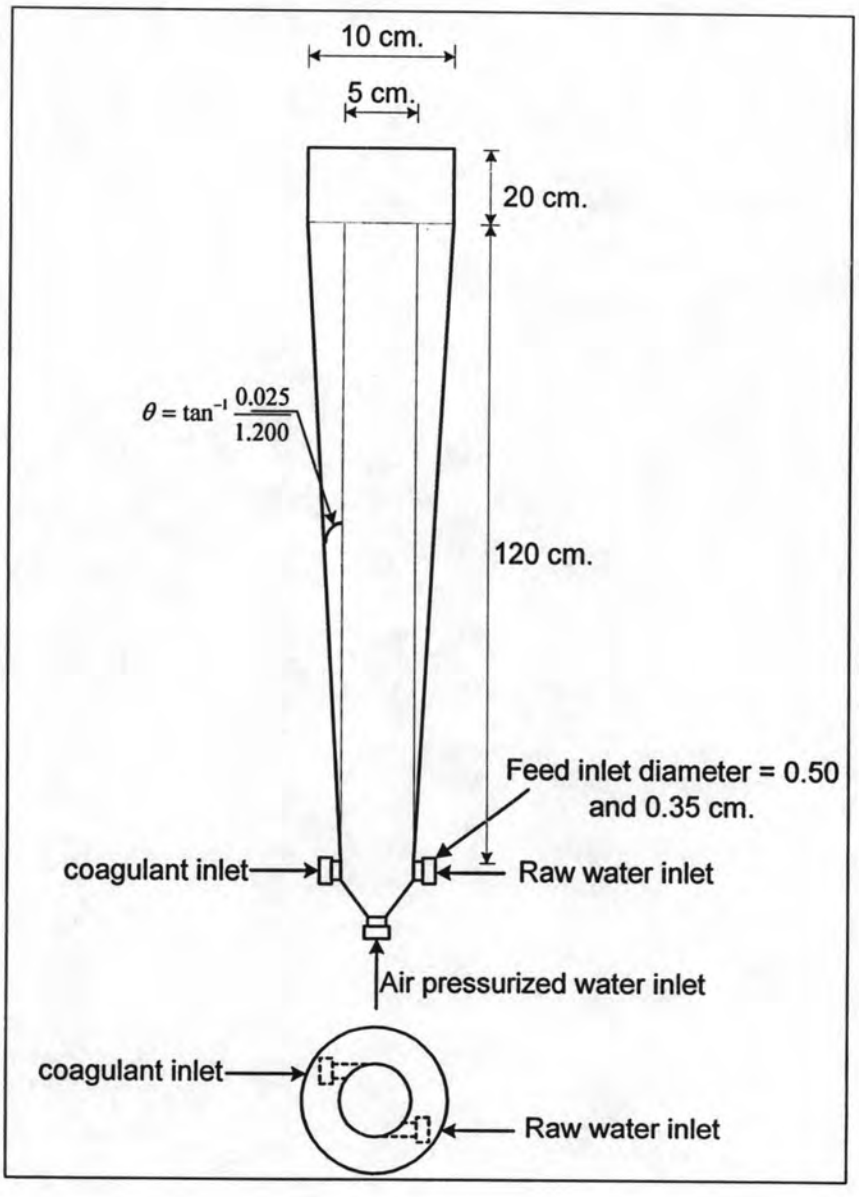
ซึ่งเวลากักเก็บน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ และเทอม Gt ของถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก แสดงได้ดังนี้

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	150	200	300	400	500	550
เวลากักเก็บ (วินาที)	118	88	59	44	35	32
ความเร็วแกรเดียนท์ (ต่อวินาที)	41	54	82	109	136	150
Gt	4830	4768	4830	4818	4800	4820

หมายเหตุ ความเร็วแกรเดียนท์คำนวณจากสมการ $G = \frac{\alpha \times n \times Q}{A \times R}$ ด้วยอัตราการไหลที่ตำแหน่งจ่ายน้ำเข้า

3.3.3.2 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย

ขนาดและรายละเอียดถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน เพื่อให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์ลดลงตามความสูงของถังปฏิกิริยา อีกทั้งเพิ่มปริมาตรสูงขึ้นเพื่อเพิ่มเวลากักเก็บน้ำภายในถังปฏิกิริยา เพื่อให้เพียงพอต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน รายละเอียดของถังปฏิกิริยานี้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์และถังปฏิกิริยาแสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ขนาดและรายละเอียดถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย
ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

รูปที่ 3.5 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกนนี้ ไม่มีจุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณกลางตัวเรือนของถังปฏิกิริยา แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นโดยทำมุมกับเส้นแนวดิ่ง ทำมุมประมาณ $\theta = \tan^{-1}\frac{0.025}{1.2}$ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นตามแนวแกนนี้ มีไว้เพื่อลดความเร็วแกรเดียนท์ภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด ให้เหมาะกับกระบวนการฟลอกกูเลชัน อีกทั้งเพื่อลดการสะสมของตะกอนที่บริเวณตอนกลางภายในถังปฏิกิริยา และลดลักษณะการไหลปั่นป่วนที่บริเวณจุดเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยรายละเอียดลักษณะของถังปฏิกิริยามีดังนี้

1. ช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัด = $\frac{\pi d^2}{4}$ = 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.35 เซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัด = $\frac{\pi d^2}{4}$ = 9.62×10^{-6} ตารางเมตร

2. ช่องจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ (Pressurized water inlet)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัด = 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

3. ช่องจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนท์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 เซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัด = 1.96×10^{-5} ตารางเมตร

4. ถังปฏิกิริยาไฮบริด

ตำแหน่งต่ำสุด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 5 เซนติเมตร

ตำแหน่งบนสุด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 10 เซนติเมตร

ปริมาตรของถังปฏิกิริยาไฮบริด = 7.2 ลิตร

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การทดลองตอนที่ 1 การหาชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม

การทดลองหาชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม ทำโดยวิธีจาร์เทสต์ที่จะนำไปใช้ทดลองกับกระบวนการไฮบริด โดยมีโพลีเมอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองมี 5 ชนิดได้แก่ FC300, FO107, AN934, FO4190 และ AN910 ซึ่งมีคุณสมบัติและรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก.5 หน้า 145 (รายละเอียดแสดงไว้เพียง FO107, AN934 และ AN910 เท่านั้น เนื่องจากได้นำมาใช้ในการทดลองต่อๆไป) ละลายในน้ำให้มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร จากนั้นทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมคอลลอยด์เบนโทไนต์เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 5 บีกเกอร์
2. ใส่สารละลายโคแอกกูแลนท์แต่ละชนิด 1 มิลลิลิตรลงไปบีกเกอร์ทั้ง 5 ใบ หรือเท่ากับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. กวนเร็วด้วยความเร็วการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. กวนช้าด้วยความเร็วการกวน 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
5. ปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำใสที่อยู่ในบีกเกอร์มาวัดความขุ่น

จากนั้นนำค่าความขุ่นที่ได้มาวิเคราะห์เป็นเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่น และจากค่าดังกล่าวจะทำให้ทราบว่า โคแอกกูแลนท์ชนิดใด เหมาะสมที่สุด

จากนั้น ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนท์ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในแต่ละชนิดของโคแอกกูแลนท์ ทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมคอลลอยด์เบนโทไนต์เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จำนวน 5 บีกเกอร์
2. ใส่สารละลายโคแอกกูแลนท์ด้วยปริมาณต่างๆกัน 6 ค่า ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. กวนเร็วด้วยความเร็วการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. กวนช้าด้วยความเร็วการกวน 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
5. ปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำใสที่อยู่ในบีกเกอร์มาวัดความขุ่น
7. นำค่าความขุ่นที่ได้มาวิเคราะห์เป็นเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่น
8. ทำซ้ำข้อที่ 1. โดยเปลี่ยนชนิดของสารโคแอกกูแลนท์

3.4.2 การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาผลของรูปร่างลักษณะของถังปฏิกิริยาไฮบริดที่มีผลต่อการบำบัดน้ำสำหรับกระบวนการไฮบริด

ในการทดลองนี้ ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด กับถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

3.4.2.1 รายละเอียดและขั้นตอนการทดลองตอนที่ 2

การทดลองในขั้นตอนนี้ จะเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำจากถังปฏิกิริยาไฮบริดที่มีรูปร่างต่างกัน เนื่องจากการวิจัยที่ผ่านมาของ Puprasert (2004) พบว่าถังปฏิกิริยาไฮบริดที่ใช้ยังไม่สามารถควบคุมให้มีค่าความเร็วแกรเดียนท์ให้เหมาะสมกับการเกิดทั้งกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันทั้งสองกระบวนการพร้อมๆกันได้ งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบถังปฏิกิริยาไฮบริดโดยการคำนวณมาจากค่าความเร็วแกรเดียนท์ตามสมการที่ 2.33 เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น

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

ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก แบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด เท่ากับ 50 และ 100 มิลลิเมตร กับถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน ซึ่งการติดตั้งถังปฏิกิริยาไฮบริดเป็นแบบที่ถอดออกได้สะดวก ในการดำเนินการทดลองต้องทำการปรับอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าถังปฏิกิริยาไฮบริด ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 และทำการทดลองด้วยการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆตามตารางแสดงค่าตัวแปรและเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่องเพื่อสังเกตปรากฏการณ์การแยกระหว่างฟลอกและน้ำใส และจะเดินระบบโดยการทดลองแบบแบตช์เพื่อดูลักษณะการเกิดฟลอกพิเศษที่สามารถลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาได้ จากนั้นเก็บตัวอย่างของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบริเวณแกนกลางภายในถังปฏิกิริยาและบริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยามาวิเคราะห์ผล ทั้งนี้ตำแหน่งและวิธีการเก็บตัวอย่างจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.5

3.4.2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 2 สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. รูปร่างของถังปฏิกิริยาไฮบริด	
- ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด	- เส้นผ่านศูนย์กลาง ตอนล่าง 50 มิลลิเมตร ตอนบน 100 มิลลิเมตร
- ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน (ดูรูปที่ 3.4)	- เส้นผ่านศูนย์กลาง ด้านล่าง 50 มิลลิเมตร ด้านบน 100 มิลลิเมตร มุม $\theta = \tan^{-1}\frac{0.125}{1.20}$

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของน้ำดิบสังเคราะห์	- 1 กรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนท์	- ได้จากการทดสอบด้วยวิธีจาร์เทสต์ในหัวข้อที่ 3.4.1
3. อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 36 ลิตรต่อชั่วโมง
4. ชนิดของสารโคแอกกูแลนท์	- โคแอกกูแลนท์โพลีเมอร์ 3 ชนิด FO107, AN910, AN934
5. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้า	- 150, 200, 300, 400, 500, 550 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**การวิเคราะห์**
1. ค่าความขุ่น - น้ำบริเวณแกนกลางภายถังปฏิกิริยา - น้ำบริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยา	- วัดค่าความขุ่นด้วยเครื่อง (Turbidity meter)
2. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตา	- การถ่ายรูปเก็บข้อมูล

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมคืออุณหภูมิของน้ำและสารละลายโคแอกกูแลนท์ โดยใช้ที่อุณหภูมิห้อง

3.4.3 การทดลองตอนที่ 3 ศึกษาชนิดของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟลอกกูเลชันและการลอยตะกอน

ในการทดลองนี้ทำการทดลองเปรียบเทียบชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ ต่อผลการบำบัดน้ำดิบสังเคราะห์ในกระบวนการไฮบริด ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.4.3.1 รายละเอียดการทดลองตอนที่ 3

การทดลองตอนที่ 3 นี้ เป็นการทดลองเพื่อให้ทราบชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยมากที่สุด โดยทดสอบกับถังปฏิกิริยาไฮบริด เนื่องจากเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า อนุภาคคอลลอยด์มักจะมีประจุลบ ดังนั้นการใช้โพลีเมอร์ประจุบวกควรจะทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน และฟลอกกูเลชันได้ดีที่สุดด้วยกลไกการเกิดโคแอกกูเลชันแบบทำลายเสถียรภาพ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้โพลีอะครีลาไมด์ (Acrylamide) ซึ่งเป็น

โพลีเมอร์แบบไม่มีประจุ (มั่นสิน, 2542) ใช้ร่วมกับการทำกระบวนการฟลอกกูเลชัน ซึ่งเป็นกลไกการเกิดโคแอกกูเลชันแบบการสร้างต่อเชื่อมอนุภาคด้วยโพลีเมอร์ (Polymer bridging)

ดังนั้นเพื่อให้ทราบชนิดของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม จึงทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสารโคแอกกูแลนท์ทั้งสามชนิดได้แก่ โพลีเมอร์ประจุบวก โพลีเมอร์ประจุลบ และโพลีเมอร์ไม่มีประจุ สำหรับความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์ จะทำการทดสอบด้วยวิธีทำจาร์เทสต์ (Jar test) ในห้องปฏิบัติการ และควบคุมตัวแปรอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.4.3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 3

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 3 สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของสารโคแอกกูแลนท์	- โพลีเมอร์ประจุบวก FO107 - โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ AN910 - โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ AN934
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นของน้ำดิบสังเคราะห์	- 1 กรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนท์	- 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 36 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**การวิเคราะห์**
1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย - บริเวณแกนกลางของถังปฏิกิริยา - บริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยา	- วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)
2. ค่าความขุ่น - บริเวณแกนกลางของถังปฏิกิริยา - บริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยา	- วัดค่าความขุ่นด้วยเครื่อง (Turbidity meter)
3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตา	- การถ่ายรูปและวิดิทัศน์เก็บข้อมูล

3.4.4 การทดลองตอนที่ 4 การศึกษาผลของความเร็วแกรเดียนท์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาไฮบริด

ในการทดลองตอนที่ 4 นี้ เพื่อศึกษาผลของความเร็วแกรเดียนท์ที่ตำแหน่งจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยการควบคุมอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ที่ช่องจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกิริยา

3.4.4.1 รายละเอียดการทดลองตอนที่ 4

ในการทดลองตอนที่ 4 นี้ ศึกษาผลของความเร็วแกรเดียนท์ที่มีผลต่อการบำบัดด้วยกระบวนการไฮบริด โดยควบคุมจากอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้า ซึ่งค่าตามทฤษฎีของความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน ควรมีค่าอยู่ในช่วง 60-300 ต่อวินาที แต่ในการทดลองจริงภายในห้องปฏิบัติการ เครื่องสูบน้ำและอุปกรณ์อื่นๆ สามารถให้ช่วงอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าที่ 150-550 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่ตำแหน่งจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้า มีค่าอยู่ในช่วง 41-150 ต่อวินาที

ดังนั้นในการทดลองนี้ใช้อัตราการไหลที่ 150, 200, 300, 400, 500 และ 550 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่ตำแหน่งจ่ายน้ำดิบเข้าเท่ากับ 41, 54, 82, 109 และ 150 ต่อวินาที ตามลำดับ โดยทำการควบคุมอัตราการจ่ายน้ำเข้าด้วยวาล์ว และสำหรับน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ใช้ที่อัตราการไหล 36 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ระบบสามารถสร้างได้ เพื่อให้เกิดสภาวะที่ดีที่สุดในแง่ของปริมาณน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ทำให้สามารถพิจารณาผลของอัตราการจ่ายน้ำดิบเข้าได้ชัดเจน จากนั้นทดลองด้วยการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 3.3 แสดงค่าตัวแปรและดำเนินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง เก็บตัวอย่างของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนที่เป็นน้ำใส และส่วนที่เป็นน้ำตะกอน มาวิเคราะห์ผล

3.4.4.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 4

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 4 สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 4

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเร็วแกรเดียนท์ของน้ำดิบสังเคราะห์ ณ ตำแหน่งจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดซึ่งควบคุมโดยอัตราการจ่ายน้ำดิบ	- 150, 200, 300, 400, 500, 550 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 41, 54, 82, 109 และ 150 ต่อวินาที ตามลำดับ
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นของน้ำดิบสังเคราะห์	- 1 กรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนท์	- 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 36 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**การวิเคราะห์**
1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย	- วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอย
- บริเวณแกนกลางของถังปฏิกิริยา	
- บริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยา	
2. ค่าความขุ่น	- วัดค่าความขุ่นด้วยเครื่องวัดความขุ่น
- บริเวณแกนกลางของถังปฏิกิริยา	
- บริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยา	
3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตา	- การถ่ายรูปและวิดิทัศน์เพื่อเก็บข้อมูล

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำและของสารละลายโคแอกกูแลนท์

3.4.5 การทดลองตอนที่ 5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันภายในถังความดันที่ใช้ในระบบการสร้างน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ต่อผลการสร้างฟลอกชนิดพิเศษด้วยกระบวนการไฮบริด

3.4.5.1 รายละเอียดการทดลองตอนที่ 5

ในการทดลองตอนที่ 5 เป็นการศึกษาผลของความดันภายในถังความดันที่ใช้ในระบบการสร้างน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ โดยคำนวณเป็นสัดส่วนของปริมาณอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ ซึ่งการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศต่อน้ำดิบสังเคราะห์นี้นำไปเปรียบเทียบกับกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายในน้ำ (Dissolved air flotation) ที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากกระบวนการดังกล่าว ต้องใช้ปริมาณน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศสูงถึง 30-50 เปอร์เซ็นต์ แต่ในผลการทดลองจากงานวิจัยของ Puprasert (2004) ปริมาณน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่ทำให้ถังปฏิกิริยาไฮบริดมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 9%

นอกจากนี้ยังจะนำผลที่ได้ไปคำนวณเป็นสัดส่วนของปริมาตรอากาศที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดต่ออัตราการจ่ายน้ำเข้าทั้งหมด เพื่อให้ทราบถึงสัดส่วนที่น้อยที่สุดที่สามารถสร้างฟลอกชนิดพิเศษได้ในการทดลองแบบแบตช์หรือแบบการไหลไม่ต่อเนื่อง

ในการทดลองตอนนี้ ทำการแปรเปลี่ยนค่าความดันภายในถังความดันสำหรับสร้างน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ 5 ค่า คือ 2.0 2.5 3.0 3.5 และ 4.0 บาร์ตามลำดับ สำหรับตัวแปรอื่นๆ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการจาร์เทสต์ (Jar test) ในการทดลองตอนที่ 1 ที่ผ่านมา ส่วนอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ พิจารณาค่าที่เหมาะสมจากผลการทดลองตอนที่ 4 เป็นต้น ทดลองด้วยการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 3.4 แสดงค่าตัวแปรและดำเนินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่างของน้ำที่ผ่านการบำบัดมาวิเคราะห์ผล

3.4.5.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 5

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 5

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความดันในถังความดันที่ใช้ในระบบการสร้างน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 2.0 2.5 3.0 3.5 และ 4.0 บาร์
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นของน้ำดิบสังเคราะห์	- 1 กรัมต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของสารละลาย	- 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ชนิดของสารโคแอกกูแลนท์	- ชนิดประจุบวก FO107
4. อัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์	- 300, 400, 500 ลิตรต่อชั่วโมง
5. อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 36 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่ 5

ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย - บริเวณแกนกลางของไซโคลน - บริเวณผิวด้านในของไซโคลน	- วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอย
2. ค่าความขุ่น - บริเวณแกนกลางของไซโคลน - บริเวณผิวด้านในของไซโคลน	- วัดค่าความขุ่นด้วยเครื่องวัดความขุ่น
3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตา	- การถ่ายรูปและภาพวิดิทัศน์เก็บข้อมูล
4. สัดส่วนอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการจ่ายน้ำเข้าทั้งหมด	- การคำนวณด้วยกฎของเฮนรี่

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำและสารละลายโคแอกกูแลนท์ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

3.4.6 การทดลองตอนที่ 6 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบเข้าของถังปฏิกิริยาไฮบริด ที่มีต่อค่าความเร็วแกรเดียนท์ และลักษณะปรากฏการณ์ภายในถังปฏิกิริยา

ในการทดลองตอนนี้ ทำการเปรียบเทียบผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกิริยา ต่อค่าความเร็วแกรเดียนท์ โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายเท่ากับ 0.50 เซนติเมตร และ 0.35 เซนติเมตร ซึ่งรายละเอียดในการทดลองอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

3.4.6.1 รายละเอียดการทดลองตอนที่ 6

ในการทดลองตอนที่ 6 นี้ เป็นการทดสอบปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาไฮบริด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ลักษณะการไหลแบบหมุนวนของน้ำ (Vortex flow) โดยการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.33

$$G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_i(H \tan\theta + r)} \qquad (2.33)$$

จะเห็นได้ว่า ถ้าควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ แต่ต้องการเพิ่มความเร็วแกรเดียนท์ให้สูงขึ้น สามารถทำได้โดยการลดพื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายน้ำเข้า (A_i) จะส่งผลให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์สูงขึ้น และ/หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกฟลอกที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยา

ดังนั้นในการทดลองนี้ ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายน้ำดิบสองค่าคือ 0.35 เซนติเมตรและ 0.50 เซนติเมตร แล้วสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยา อีกทั้งนำมาคำนวณเปรียบเทียบค่าความเร็วแกรเดียนท์ ณ จุดจ่ายน้ำเข้า ของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองขนาด

ทั้งนี้ในการทดลองตอนนี้จะใช้น้ำประปาแทนที่การใช้น้ำดิบสังเคราะห์ (สารคอลลอยด์เบนโทไนต์) เนื่องจากทำให้ง่ายต่อการสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาได้ จากนั้นคำนวณค่าความเร็วแกรเดียนท์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชัน อีกทั้งสังเกตลักษณะของการหมุนวนภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด ทำการถ่ายรูปและบันทึกภาพวิดิทัศน์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยา สำหรับตัวแปรอื่นๆนั้น ใช้ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 3.5

3.4.6.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 6

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 6 แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 ดังนี้

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 6

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายน้ำประปาเข้า	- 0.50 และ 0.35 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. รูปร่างของถังปฏิกิริยาไฮบริด	- ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน
2. อัตราการจ่ายน้ำประปา	- 150, 200, 300, 400, 500 และ 550 ลิตรต่อชั่วโมง
3. อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 36 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**การวิเคราะห์**
1.ลักษณะการเกิดฟองอากาศภายในไซโคลน 2. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตา	- การถ่ายรูปและภาพวิดิทัศน์เก็บข้อมูล

3.4.7 การทดลองตอนที่ 7 เพื่อสังเกตพฤติกรรมของฟองอากาศภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายน้ำเข้า

ในการทดลองตอนที่ 7 นี้ น้ำดิบที่ใช้เป็นน้ำประปาแทนการใช้น้ำดิบสังเคราะห์ (สารคอลลอยด์เบนโทไนต์) เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน ซึ่งการทดลองนี้จะสนใจลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายน้ำเข้า โดยมีรายละเอียดการทดลองอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.4.7.1 รายละเอียดขั้นตอนการทดลองตอนที่ 7

ในการทดลองตอนที่ 7 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยา เนื่องจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่า เมื่ออัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้นภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน ทำให้ปริมาณการลอยของฟลอกลดต่ำลง ซึ่งขัดแย้งกับหลักการทางทฤษฎี (จากการทดลองตอนที่ 5) เพราะว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้น ทำให้ความเร็วแกรเดียนท์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งน่าจะส่งผลให้กระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อัตราการไหลต่ำๆ แต่ผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นดังที่กล่าวไป ดังนั้น ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะต้องมีผลต่อการสร้างฟลอกชนิดพิเศษ

ฉะนั้น ในการทดลองนี้จึงใช้น้ำประปาแทนการใช้น้ำดิบสังเคราะห์ เพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมของฟองอากาศได้ง่าย และทดลองกับน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่ใช้อัตราการไหลคงที่สูงสุดที่ 36 ลิตรต่อชั่วโมง ผลที่ได้นำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดลองก่อนหน้านี้และหาแนวคิดในการศึกษาวิจัยต่อไป

สำหรับรายละเอียดของตัวแปรต่างๆในการทดลองนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

3.4.7.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 7

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 7

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พฤติกรรมของฟองอากาศภายในถังปฏิกิริยา	- ลักษณะการรวมตัวกันของฟองอากาศ

ตารางที่ 3.6 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 7

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. รูปร่างของถังปฏิกิริยาไฮบริด	- ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำเข้า	- 0.35 เซนติเมตร
3. อัตราการจ่ายน้ำประปา	- 150, 200, 300, 400, 500 และ 550 ลิตรต่อชั่วโมง
4. อัตราการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ	- 36 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1.ลักษณะการเกิดฟองอากาศภายในถังปฏิกิริยา 2. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตา	- การถ่ายรูปและภาพวิดิทัศน์เก็บข้อมูล

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำและสารละลายโคแอกกูแลนท์ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

3.5 วิธีการและตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำภายในถังปฏิกิริยา

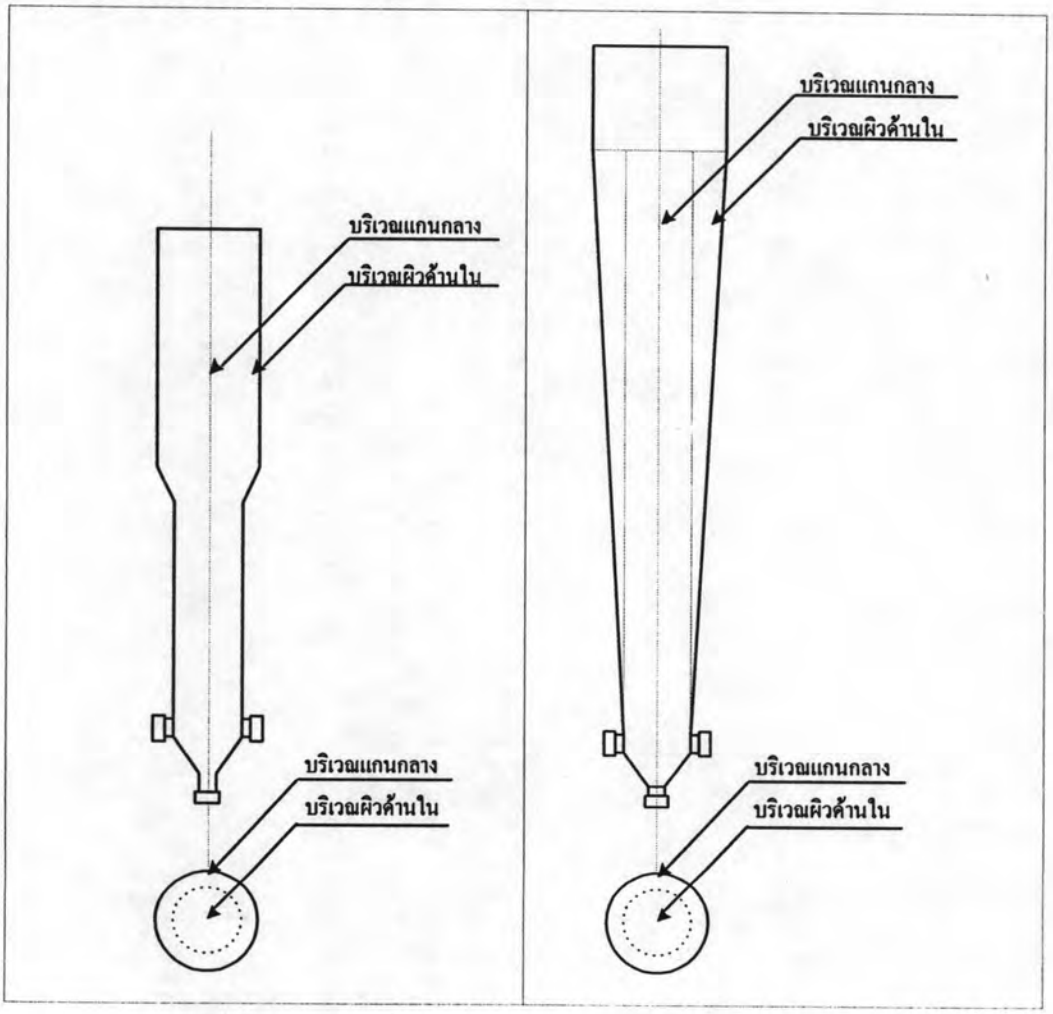
ในการทดลองทั้ง 7 ตอนดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ประกอบไปด้วยการทดลองทั้งการไหลแบบต่อเนื่องและการทดลองแบบแบตช์

การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ทำโดยการดำเนินระบบตามสภาวะดำเนินการอย่างต่อเนื่องให้มีเวลานานกว่าเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล และทำการเก็บตัวอย่างน้ำในขณะที่ระบบยังดำเนินการอยู่อย่างต่อเนื่อง

สำหรับการทดลองแบบแบตช์หรือแบบไม่ต่อเนื่อง ทำโดยการดำเนินระบบตามสภาวะของแต่ละการทดลองเช่นเดียวกัน รวมทั้งให้มีเวลานานกว่าเวลากักเก็บน้ำ เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชัน และการสร้างฟลอกชนิดพิเศษอยู่ในสภาวะสมดุล จากนั้นหยุดดำเนินการทั้งหมด โดยการปิดเครื่องสูบน้ำ หยุดการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ สารโคแอกกูแลนท์ และน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 2 การทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำในการทดลองด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง

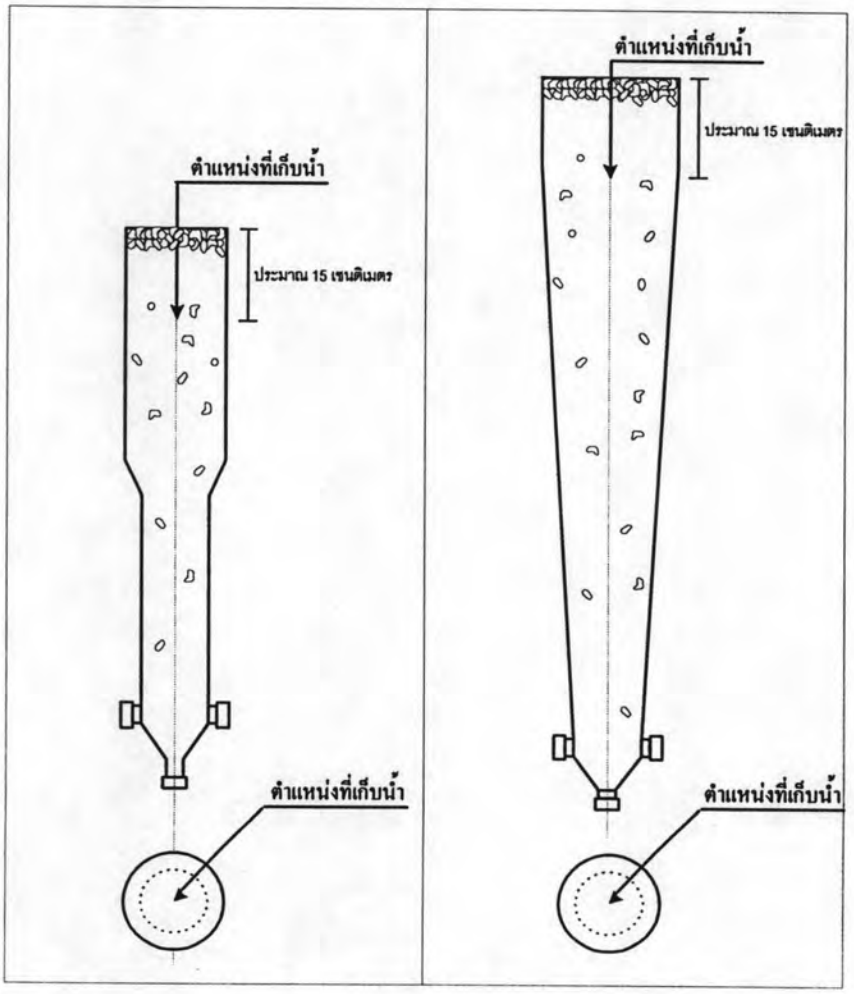
เพื่อตรวจสอบว่ามีการแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใสภายในถังปฏิกิริยา โดยทำการทดลองตามสภาวะที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง ให้มีเวลานานกว่าเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยาดังแสดงในตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข หน้า 151 สำหรับถังปฏิกิริยาทรงกระบอก และตาราง ค.1 ในภาคผนวก ค หน้า 161 สำหรับถังปฏิกิริยาทรงกรวย จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำด้วยปิเปตปากกว้างเพื่อไม่ให้เกิดการทำให้ฟลอกแตกตัวออก เก็บน้ำที่บริเวณแกนกลางและบริเวณผิวด้านในของถังปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อนำน้ำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์ผลต่อไป ซึ่งแสดงการเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับในการทดลองกับถังปฏิกิริยาทรงกระบอกและทรงกรวย หากเกิดการแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใส บริเวณแกนกลางของถังปฏิกิริยาควรจะมีค่าความขุ่นหรือปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงกว่าบริเวณผิวด้านในของถัง



รูปที่ 3.6 การเก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกิริยาด้วยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

3.5.2 การเก็บตัวอย่างน้ำในการทดลองแบบแบตช์

การเก็บตัวอย่างแบบแบตช์นี้ เพื่อทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันภายในถังปฏิกิริยา หากเกิดกระบวนการดังกล่าวจะต้องเกิดฟลอกและ/หรือฟลอกชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน และลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา ดังนั้นการทดลองตามสภาวะที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง ให้มีเวลากักเก็บตามตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข หน้า 151 สำหรับถังปฏิกิริยาทรงกระบอก และตาราง ค.1 ในภาคผนวก ค หน้า 161 สำหรับถังปฏิกิริยาทรงกรวย จากนั้นปิดการดำเนินการ เพื่อให้ฟลอกที่เกิดขึ้น ตกตะกอนลงสู่ด้านล่าง หรือลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในส่วนน้ำใสด้วยปิเปต เพื่อนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่น และปริมาณของแข็งแขวนลอย ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ความลึกของตำแหน่งที่เก็บน้ำใช้วิธีการประมาณ โดยให้ต่ำกว่าฟลอกที่ลอยอยู่ด้านบน หรือประมาณ 15 เซนติเมตร จากระดับบนสุดของถังปฏิกิริยา



รูปที่ 3.7 การเก็บน้ำตัวอย่างด้วยการทดลองแบบแบตช์

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย