บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการไฮบริด ถังปฏิกิริยาไฮบริด โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชันและการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อกระบวนการนี้ ซึ่งน้ำดิบที่ใช้ในการทดลองเป็นสารแขวนลอยเบนโทไนต์ผสมกับน้ำประปาด้วยความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

5.1.1 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด

กระบวนการไฮบริด ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชันและการลอยตะกอนในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ด้วยการทดลองแบบแบตช์เท่านั้น ยังไม่ประสบผลสำเร็จในการทดลองแบบการไหลแบบต่อเนื่อง

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันด้วยกระบวนการไฮบริดถังปฏิกิริยาไฮบริดนี้สามารถสร้างฟลอกที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในได้

ชนิดของสารโพลีเมอร์โคแอกกูแลนท์ ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ FO107 โคแอกกูแลนท์โพลีเมอร์ประจุบวก ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นที่ 93 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโคแอกกูแลนท์โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ AN910 และ AN934 ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นเท่ากับ 84 และ 91 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ กระบวนการโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นเป็นกลไกแบบการรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ (Polymer bridging) ประจุของโพลีเมอร์ที่ใช้ไม่ส่งผลแตกต่างกันต่อกระบวนการ

อัตราการไหลที่ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นสูงที่สุดอยู่ในช่วง 300-400 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 82-93 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโพลีเมอร์ทั้งสามชนิด ซึ่งช่วงอัตราการไหลดังกล่าว ให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่ตำแหน่งจ่ายน้ำเข้าเท่ากับ 82 และ 108 ต่อวินาที นอกจากนี้

การไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 400 ลิตรต่อชั่วโมงแต่ยังไม่เกิดการแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใส

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันโดยถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาดนี้ ให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่คำนวณจากสมการ $G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_t R}$ มีค่าอยู่ในช่วง 41-150 ต่อวินาที และค่า Gt มีค่า 4800 เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีแล้ว ความเร็วแกรเดียนท์ยังไม่เพียงพอสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลนท์ ซึ่งต้องการมากกว่า 300 ต่อวินาที อีกทั้งค่า Gt ในทางทฤษฎีต้องการเท่ากับ 1500-30,000 อย่างไรก็ตาม จากเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นและฟลอกที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไฮบริดด้วยถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกนี้สามารถทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันได้

จากสภาวะการทดลอง รวมทั้งขนาดและลักษณะของถังปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลเข้าถังปฏิกิริยาทั้งหมด มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.0009 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่สามารถสร้างฟลอกพิเศษได้ทั้งหมด โดยสภาวะที่สามารถสร้างฟลอกพิเศษได้ทั้งหมดคือที่ความดัน 3.5 บาร์ขึ้นไป และอัตราการจ่ายน้ำดิบที่ 400 ลิตรต่อชั่วโมง

ที่จุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการรบกวนการไหลแบบหมุนวนภายในถัง ซึ่งลักษณะการไหลแบบหมุนวนนี้จะใช้สำหรับแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใสเมื่อผ่านช่วงโคแอกกูเลชันและฟลอกกูเลชันแล้ว ทำให้ไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์แยกระหว่างฟลอกชนิดพิเศษกับน้ำใสได้ เพราะการไหลแบบหมุนวนอ่อนกำลังลงบริเวณตอนบนของถังปฏิกิริยา

5.1.2 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

ผลกระทบจากชนิดของโคแอกกูแลนท์ทั้งสามชนิด ไม่มีความแตกต่างกันในแง่ของการสร้างฟลอก เช่นเดียวกับถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด โดยที่มีเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นสูงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ทุกๆค่าอัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

การแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใสเกิดขึ้นในการทดลองแบบแบตช์เท่านั้น ส่วนในการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง การไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง แต่ยังไม่เกิดการแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใส

เมื่ออัตราการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณฟลอกที่ลอยด้านบนของไซโคลนลดลง เนื่องจากปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศมีไม่เพียงพอ โดยที่อัตราการไหลต่ำๆ 150 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถสร้างฟลอกชนิดพิเศษได้หมด แต่ที่อัตราการไหลต่ำนี้ จะไม่มีการไหลแบบหมุนวนที่จะใช้แยกระหว่างฟลอกกับน้ำใส ในขณะที่อัตราการไหลสูง 450 ลิตรต่อชั่วโมง ฟลอกที่เกิดขึ้นตกตะกอนด้านล่างทั้งหมดเมื่อหยุดดำเนินการ

ความดันที่สามารถทำให้เกิดฟลอกชนิดพิเศษเกิดขึ้นได้ทั้งหมดคือ 4.0 บาร์ และมีค่าวิกฤตของสัดส่วนอัตราการไหลปริมาตรอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดเท่ากับ 0.0009 เช่นเดียวกับถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด

การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องการจ่ายน้ำเข้า จาก 0.50 เซนติเมตรเป็น 0.35 เซนติเมตร สามารถเพิ่มความเร็ว ณ จุดจ่ายน้ำเข้าได้เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลเดียวกัน ทำให้ความเร็วแกรเดียนท์สูงขึ้น เกิดการไหลแบบหมุนวนแรงขึ้น และการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องการจ่ายน้ำเข้าเป็น 0.35 เซนติเมตร ทำให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่ความสูงใดๆภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 300-2,000 ต่อวินาที

การเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวกันเองของฟองอากาศ ซึ่งลดประสิทธิภาพการสร้างฟลอกชนิดพิเศษ เพราะฟองอากาศที่รวมตัวกันเองไม่สามารถแทรกเข้าไปในฟลอกได้ ทำให้ฟลอกที่ลอยมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งอัตราการไหลที่เริ่มเกิดการรวมตัวกันเองของฟองอากาศนี้คือ 300 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เริ่มเกิดการไหลแบบหมุนวนเช่นกัน

5.2 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด กับทรงกรวยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน

ถังปฏิกิริยาไฮบริดทั้งสองชนิดนี้ สามารถสร้างฟลอกชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในได้ แต่ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก ทำให้เกิดฟลอกที่มีขนาดใหญ่กว่าโดยเฉพาะตรงบริเวณจุดเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งทำให้เกิดการไหลไม่มีทิศทางและรบกวนการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ภายในไซโคลน

ที่อัตราการจ่ายน้ำเดียวกัน ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกสร้างการไหลแบบหมุนวนได้ที่ 300 ลิตรต่อชั่วโมง แต่ทรงกรวยสร้างการไหลแบบหมุนวนได้ที่ 400 ลิตรต่อชั่วโมง

ความดันที่สามารถสร้างฟลอกพิเศษที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในได้หมด ด้วยถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกคือ 3.5 บาร์ขึ้นไป ในขณะที่ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยต้องใช้ความดันเท่ากับ 4.0 บาร์ขึ้นไป ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลปริมาตรอากาศต่ออัตราการจ่ายน้ำเข้าทั้งหมด (Air volume flowrate/Inlet flow Fraction) มีค่าวิกฤติเท่ากับ 0.0009 ทั้งสองชนิดของถังปฏิกิริยาไฮบริด ซึ่งค่าอัตราส่วนดังกล่าว สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความดันที่จำเป็นต้องใช้ ในการสร้างฟลอกชนิดพิเศษที่อัตราการไหลต่างๆได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

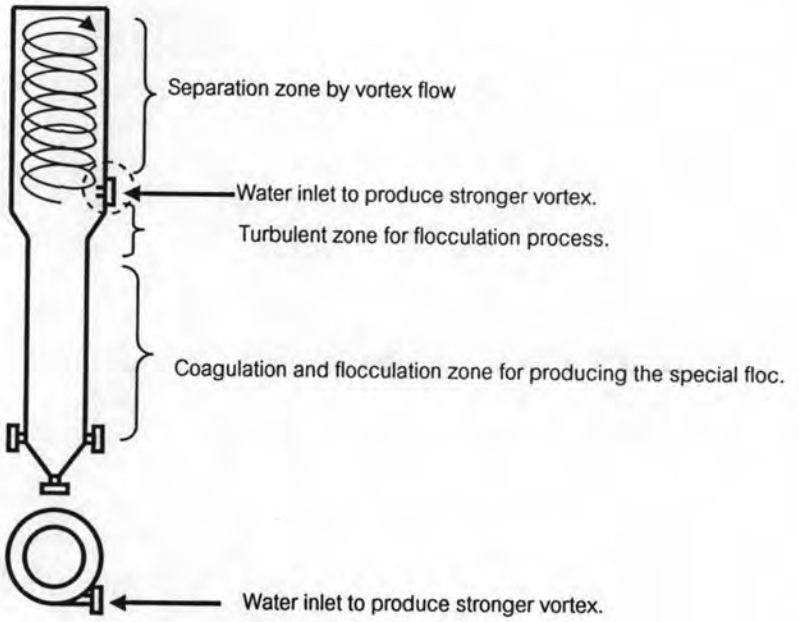
จากผลของตัวแปรต่างๆที่ศึกษา และปัญหาที่พบมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในการแก้ปัญหาการรวมตัวกันของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด ควรมีการปรับปรุงลักษณะของช่องการจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด ให้เป็นลักษณะทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดนให้ด้านยาวขนานกับแกนของไซโคลน แทนที่การใช้ลักษณะช่องการจ่ายเป็นวงกลมดังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อลดความหนาของสนามความเร็วที่เกิดขึ้นจากการจ่ายน้ำเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ

Kesall แนะนำเกี่ยวกับลักษณะของช่องท่อจ่ายน้ำเข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดไว้ว่า เมื่อพื้นที่เปิดสมมูลเท่ากัน (Equivalent area) ช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไซโคลนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม ความยาวต่อความกว้างควรเป็น 2:1 (Kesall, 1953 อ้างถึงใน Bradley, 1965: 119)

2. ข้อขัดแย้งระหว่างการสร้างฟลอกชนิดพิเศษ กับการสร้างการไหลแบบหมุนวนให้แรงพอที่จะแยกฟลอกกับน้ำใสให้ได้นั้น ควรมีการปรับปรุงลักษณะของไซโคลนเพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆได้เหมาะสมยิ่งขึ้นดังนี้

2.1 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด



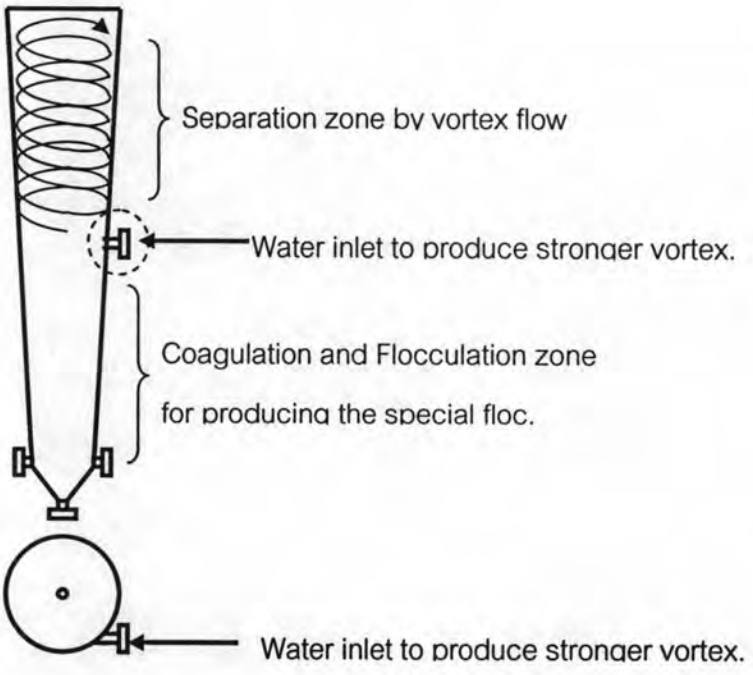
รูปที่ 5.1 แนวความคิดปรับปรุงถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก

จากรูปที่ 5.1 แนวคิดในการเพิ่มช่องจ่ายน้ำเข้าที่บริเวณเหนือจุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้กับถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก ดำเนินการโดยจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ที่ช่องจ่ายน้ำดิบบริเวณด้านล่างของถังปฏิกิริยาด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน อาจไม่จำเป็นต้องใช้ขนาดช่องจ่ายที่มีขนาดเล็กเกินไป เพราะจะทำให้ค่า Gt สูงเกินกว่าค่าที่ต้องการสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน อัตราการไหลที่ไม่สูงจนทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ เพื่อให้กระบวนการสร้างฟลอกชนิดพิเศษเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ตอนล่างของถังปฏิกิริยา

จากนั้นเมื่อของผสมหมุนวนขึ้นด้านบน ค่าความเร็วแกรเดียนท์ลดต่ำลงจนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเกิดการรบกวนการไหลแบบหมุนวน บริเวณนี้จะทำให้เกิดกระบวนการฟลอกกูเลชัน และทำให้ฟลอกขนาดเล็กมีโอกาสชนกันมากขึ้น และรวมตัวกันเป็นฟลอกขนาดใหญ่ขึ้นโดยที่ยังคงฟองอากาศแทรกไว้ข้างใน

จากนั้นช่องจ่ายน้ำที่เพิ่มในตอนกลางของถังปฏิกิริยา ใช้สำหรับจ่ายน้ำให้มีอัตราการไหลที่เพียงพอต่อการสร้างการไหลแบบหมุนวน (Vortex flow) ที่ดี โดยอาจใช้อัตราการไหลต่ำๆ แต่ให้ขนาดเส้นผ่านของช่องจ่ายมีขนาดเล็ก เพื่อให้ค่าความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงพอ และเกิดการแยกระหว่างฟลอกกับน้ำใสด้วยการไหลแบบหมุนวนนั้นในส่วนบนของถังปฏิกิริยา

2.2 ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามแนวแกน



รูปที่ 5.2 แนวความคิดในการปรับปรุงถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวย

จากรูปที่ 5.2 ทำการเพิ่มช่องการจ่ายน้ำเข้าที่บริเวณตรงกลางของส่วนสูงของถังปฏิกิริยาไฮบริด เริ่มดำเนินการโดยจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ที่ช่องจ่ายน้ำดิบบริเวณด้านล่างของถังปฏิกิริยา โดยให้มีอัตราการไหล ที่ทำให้เกิดค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งต้องคำนึงถึงอัตราการไหลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายน้ำเข้า อีกทั้งอัตราการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ

เมื่อของผสมไหลวนขึ้นบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นตามแนวแกนถังปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าความเร็วแกรเดียนท์ลดต่ำลง ตามสมการ 2.33 $G = \frac{Q \times \alpha \times n}{A_i(h\tan\theta + r)}$ นั่นคือเมื่อรัศมีของถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วแกรเดียนท์จะลดต่ำลง ทำให้เหมาะสมกับกระบวนการฟลอกกูเลชัน ฉะนั้นตอนล่างของถังปฏิกิริยาไฮบริดจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชัน โดยที่น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศจะสร้างฟองอากาศให้สามารถแทรกเข้าไปในฟลอกได้ แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มรัศมีของถังปฏิกิริยา จะทำให้การไหลแบบหมุนวนอ่อนกำลังลงด้วยเช่นกัน

ดังนั้นช่องการจ่ายน้ำที่เพิ่มเข้าไปบริเวณตอนกลางของถังปฏิกิริยา จะทำหน้าที่สร้างการไหลแบบหมุนวนที่แข็งแรงขึ้น โดยพิจารณาให้ช่องที่จ่ายนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้อัตราการไหลสูงมาก ความเร็วในแนวสัมผัสที่เกิดจากการจ่ายน้ำเข้ามาเพิ่ม จะสร้าง

การไหลแบบหมุนวน ซึ่งจะทำหน้าที่แยกระหว่างฟลอกชนิดพิเศษออกจากน้ำใสให้มารวมอยู่ตรงกลางของแกนไซโคลน

3. ควรมีการศึกษาเรื่องสนามความเร็วภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดทั้งสองชนิดนี้ ได้แก่ ถังปฏิกิริยาทรงกระบอกและถังปฏิกิริยาทรงกรวย เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายใน และสามารถปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ อีกทั้งพัฒนาระบบไฮบริดให้สามารถใช้ได้จริงในงานทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมต่อไป