บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยเรื่องผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาของทาร์จากชีวมวลในเบดนิ่งสองขั้นตอน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส

5.1.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อยในกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นจาก 400 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ของชีวมวลทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ส่วนร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าองค์ประกอบของทาร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ มักเป็นสารประกอบจำพวกคีโตน กรดคาร์บอกซิลิก และแอลกอฮอล์ เป็นหลัก ส่วนองค์ประกอบของทาร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงมักเป็นสารประกอบจำพวกอะโรมาติก เช่น โทลูอีน สไตรีน แนฟทาลีน อินดีน และฟีนอล อย่างไรก็ตามสารประกอบจำพวกอนุพันธ์ของฟีนอลไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

5.1.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการสลายตัวของทาร์จากไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อยในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำ

- **ในกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา**

เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นจาก 400 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ของชีวมวลทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นร้อยละการเปลี่ยนของทาร์มีค่าลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าทาร์ส่วนใหญ่เกือบไม่สลายตัวด้วยไอน้ำเลย จึงสรุปได้

ว่าทาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสของชีวมวลที่อุณหภูมิสูงจะมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยไอน้ำต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสของชีวมวลที่อุณหภูมิต่ำ

- **ในกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา**

เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นจาก 400 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ของชีวมวลทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส แต่ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มีค่ามากที่สุด เนื่องมาจากที่อุณหภูมินี้ มีองค์ประกอบของเบนซีนไดออล เบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิด และเลโวกลูโคแซน ในปริมาณมากกว่าอุณหภูมิอื่น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยอาจจะไม่เหมาะสมกับการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มิงขององค์ประกอบเหล่านี้ ทำให้เกิดการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยากกว่าองค์ประกอบอื่น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ มีค่าลดลงเช่นเดียวกับในกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงกล่าวได้ว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลที่อุณหภูมิสูง จะมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลที่อุณหภูมิต่ำ

นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นี้มีความสามารถในการแตกทาร์ที่มีองค์ประกอบเป็นอะโรมาติกได้ดีกว่าองค์ประกอบอื่น

5.1.2 ผลของชนิดชีวมวล

5.1.2.1 ผลของชนิดชีวมวลต่อพฤติกรรมการสลายตัวของทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยา

ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสระหว่าง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส ขี้เลื่อยจะให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์สูงกว่าไม้กระถินยักษ์ ทุกช่วงอุณหภูมิ เนื่องมาจากขี้เลื่อยมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่น้อยกว่าหรือมีคาร์บอนในเนื้อไม้ที่มากกว่าไม้กระถินยักษ์นั่นเอง ซึ่งบ่งบอกถึงการมีปริมาณองค์ประกอบของลิกนินที่สูงกว่าไม้กระถินยักษ์ได้ ในทางตรงกันข้ามขี้เลื่อยจะให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สที่ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ เนื่องมาจากทาร์ที่เกิดจากขี้เลื่อยมีองค์ประกอบของเบนซีนไดออล เบนซีนไดคาร์บอกซิลิก แอซิด เลโวกลูโคแซน และ

สารประกอบอะโรมาติกมากกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์ จึงส่งผลให้ทาร์จากขี้เลื่อยสลายตัวกลายเป็นแก๊สได้ยากกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์

5.1.2.2 ผลของชนิดชีวมวลต่อความว่องไวในการสลายตัวของทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำ

สำหรับกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป ขี้เลื่อยจะให้ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ที่ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ แสดงว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงทาร์ที่เกิดจากขี้เลื่อย จะมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยไอน้ำต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขี้เลื่อยมีองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติกสูงกว่า ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ไม่สามารถแตกตัวด้วยไอน้ำได้ ส่วนกระบวนการรีฟอร์มิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป ขี้เลื่อยจะให้ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์เช่นกัน แสดงว่าทาร์ที่เกิดจากขี้เลื่อยจะมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์ เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับวิธีการเก็บทาร์มาวิเคราะห์ในเชิงคุณปริมาณในงานวิจัยนี้ อาจยังไม่มีประสิทธิภาพดีเพียงพอ เนื่องจากยังไม่มีการติดตั้งระบบป้องการการควบแน่นของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการทดลอง จึงทำให้อาจมีทาร์บางส่วนสูญเสียไปมากก่อนการดักเก็บทาร์ไปวิเคราะห์ ดังนั้นหากต้องการดักเก็บทาร์มาวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบแล้ว จำเป็นต้องติดตั้งระบบดังกล่าว นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนขวดที่ใช้ในเก็บทาร์อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการวิเคราะห์องค์ประกอบของทาร์มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการใช้ชีวมวลในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงเพื่อศึกษาอย่างละเอียดต่อไป

จากความรู้ที่ได้ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปริมาณทาร์ที่เกิดจากกระบวนการแกซิฟิเคชันลงได้เป็นอย่างดี นอกเหนือจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการเลือกใช้อุณหภูมิต่ำในกระบวนการที่ก่อให้เกิดการสลายตัวของชีวมวลกลายเป็นทาร์ เพื่อให้ทาร์ที่เกิดขึ้นมีความว่องไวต่อการสลายตัวในปฏิกิริยารีฟอร์มิงด้วยไอน้ำต่อได้อีก โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะเป็นการช่วยลดต้นทุนในเรื่องของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

นอกจากนี้หากต้องการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการแกซิฟิเคชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแล้ว จำเป็นต้องเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเหมาะสมกับสภาวะนี้ด้วย นั่นคือ ควรเลือกตัวเร่งให้มีความสามารถในการแตกตัวทาร์ที่มีสารประกอบจำพวกฟีนอลิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบของ เบนซีนไดออล เบนซีนไดคาร์บอกซิลิก แอซิด รวมไปถึงเลโวกลูโคแซน ด้วย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสม ตัวอย่างเช่น โปรแทสเซียมคาร์บอเนต (KCO_3) ซึ่งเป็นตัวเร่งที่ช่วยลดโอกาสการแตกตัวของเซลลูโลสกลายเป็นเลโวกลูโคแซน แต่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวกลายเป็นสารประกอบอะลิฟาติกในกระบวนการไพโรไลซิสแทน (Nishimura, Iwasaki and Horio, 2009) ซึ่งสารประกอบอะลิฟาติกนั้นสามารถแตกตัวได้ง่ายแม้จะใช้เพียงไอน้ำในการแตกตัวก็ตาม นอกจากนี้ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาอีกตัวหนึ่งคือ ซีโอไลด์ (HZSM-5) ซึ่งเป็นตัวเร่งที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยสามารถเปลี่ยนสารประกอบจำพวกฟีนอลิก (phenolic compound) ที่เกิดมาจากการสลายตัวของโครงสร้างลิกนินผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยา deoxygenation ให้กลายเป็นสารประกอบอะโรมาติกได้ (Mullen and Boateng, 2010) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้สามารถแตกตัวในปฏิกิริยารีฟอร์มิงต่อ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ คาดว่าจะส่งผลให้สามารถลดปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นในสภาวะดังกล่าวได้อีกทางหนึ่งด้วย