

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสต่อความว่องไวของทาร์ที่ปลดปล่อยออกมาในปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ($\text{NiO/MgO/Al}_2\text{O}_3$) ดำเนินการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองชั้นตอน โดยศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสในช่วง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส และชนิดของชีวมวล ได้แก่ ไม้กระถินยักษ์ และซีลี้อย ทำการวิเคราะห์หรือผลได้ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของทาร์ที่ปลดปล่อยจากชั้นไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งศึกษาองค์ประกอบของทาร์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS)

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 คือ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินยักษ์และซีลี้อย ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ส่วนที่ 2 คือ ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์และซีลี้อยด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ส่วนที่ 3 คือ ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนย่อยที่ 1 คือ ผลของอุณหภูมิที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสเพียงอย่างเดียวต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์ที่เกิดขึ้นจากไม้กระถินยักษ์และซีลี้อย ส่วนย่อยที่ 2 คือ ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของทาร์ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ ($\text{NiO/MgO/Al}_2\text{O}_3$) และส่วนย่อยที่ 3 คือ ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อความว่องไวในการสลายตัวของทาร์ ส่วนที่ 4 คือ ผลของชนิดชีวมวล ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนย่อยที่ 1 คือ ผลของชนิดชีวมวลในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของทาร์กรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สและทาร์ที่เกิดขึ้น ส่วนย่อยที่ 2 คือ ผลของชนิดชีวมวลต่อความว่องไวในการสลายตัวของทาร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของชีวมวลทั้งสองชนิดในตารางที่ 4.1 พบว่าไม้กระถินยักษ์และซีลี้อยมีปริมาณความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัวใกล้เคียงกัน ส่วนผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ในตารางที่ 4.2 พบว่าไม้กระถินยักษ์มีปริมาณธาตุไนโตรเจนและธาตุออกซิเจนสูงกว่าซีลี้อยอย่างชัดเจน ในขณะที่มีปริมาณของคาร์บอนที่ต่ำกว่า เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนแล้วพบว่า ไม้กระถินยักษ์ให้ค่าอัตราส่วนทั้งสองสูงกว่าซีลี้อย จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวส่งผลให้องค์ประกอบของสารที่เกิดขึ้นจากชีวมวลทั้งสองมีความแตกต่างกัน ซึ่งผลการอธิบายนี้จะถูกกล่าวไว้ในผลของชนิดชีวมวลในส่วนถัดไป นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความร้อนของซีลี้อยมีค่าสูงกว่าไม้กระถินยักษ์ด้วย

ตารางที่ 4. 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของชีวมวลทั้งสองชนิด

ชนิดของเชื้อเพลิง	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว*	ค่าความร้อน* (MJ/kg)
ไม้กระถินยักษ์	9.69	79.48	2.06	8.78	1,873
ซีลี้อย	9.10	78.43	3.96	8.51	2,219

คาร์บอนคงตัว* = 100-ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

ค่าความร้อน* (Demirbas, 1997)

ตารางที่ 4. 2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของชีวมวลทั้งสองชนิด

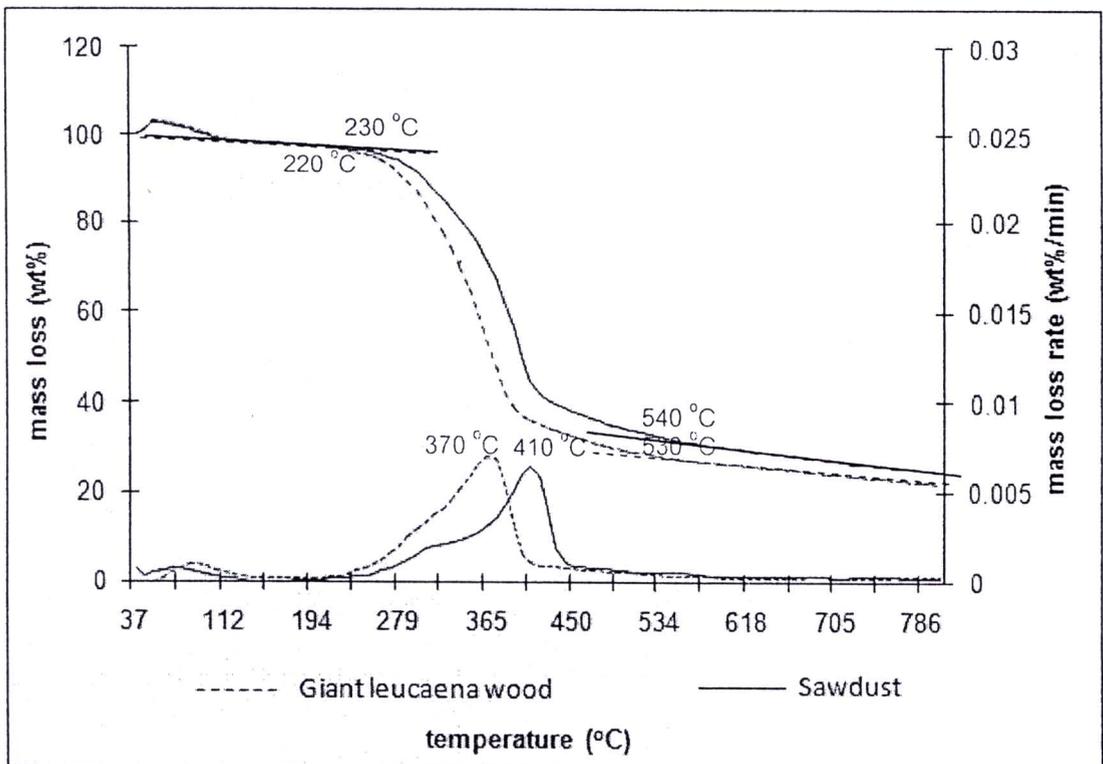
ชนิดของเชื้อเพลิง	ธาตุ (% daf)*					
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน*	ออกซิเจนต่อคาร์บอน	ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน
ไม้กระถินยักษ์	49.99	6.188	0.803	43.019	0.861	0.124
ซีลี้อย	56.59	6.295	0.081	37.034	0.654	0.111

ออกซิเจน* = 100-ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

daf* = dry ash free

4.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

การวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลทั้งสองชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อย ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TG-DTA) แสดงได้ดังในรูปที่ 4.1 พบว่าไม้กระถินยักษ์เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส สลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส ส่วนขี้เลื่อยเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส สลายตัวได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส และสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 540 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าไม้กระถินยักษ์สามารถสลายตัวด้วยความร้อนได้ง่ายกว่าขี้เลื่อย



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA

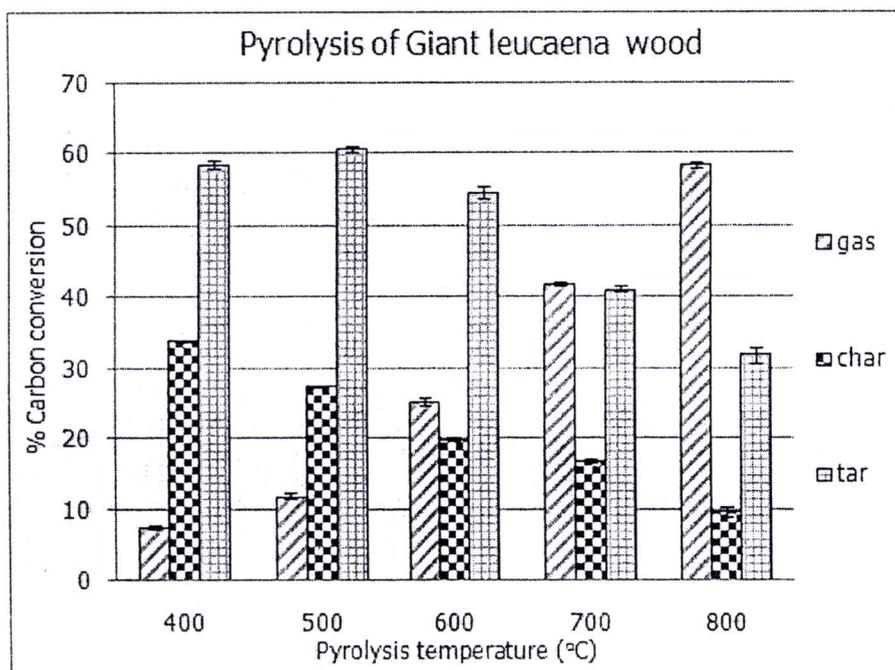


4.3 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส

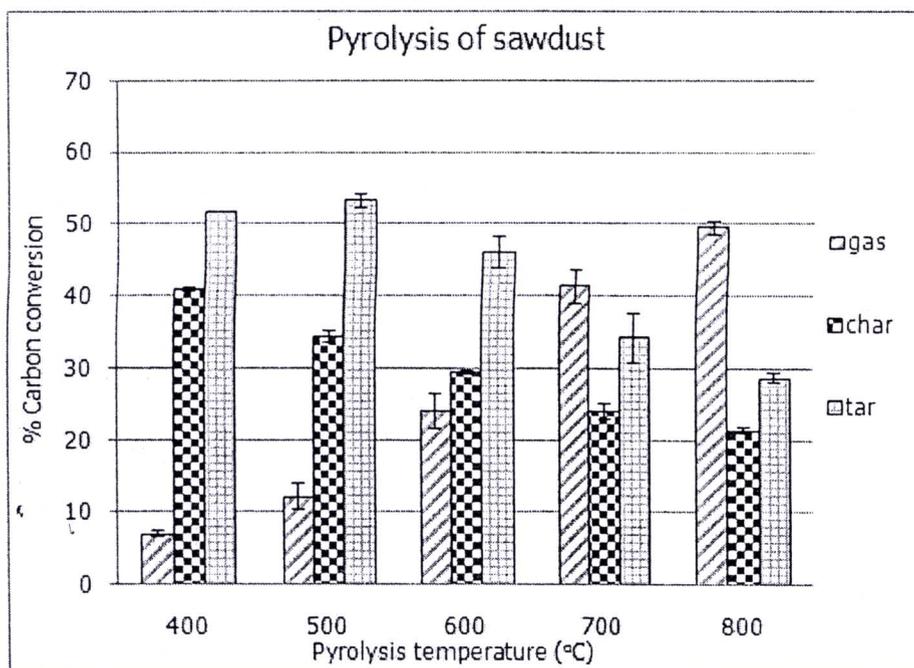
4.3.1 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis)

ศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์และผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เกิดจากชีวมวลทั้งสองชนิด

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆของชีวมวลทั้งสองชนิด พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกันคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์ (thermal cracking) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (long-chained compound) ให้กลายเป็นทาร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง จนกระทั่งกลายเป็นแก๊ส (Ates and Isikdag, 2009) แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ไม่กระถินยักษ์และซีเลื้อยยังสลายตัวไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ดังรูปที่ 4.1

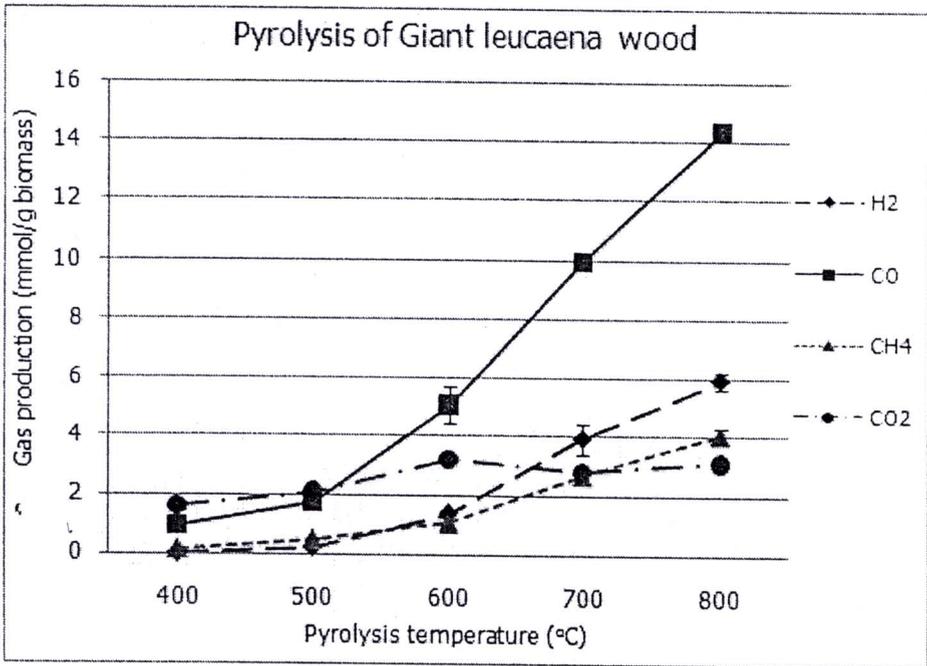


รูปที่ 4. 2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของไม้กระถินยักษ์

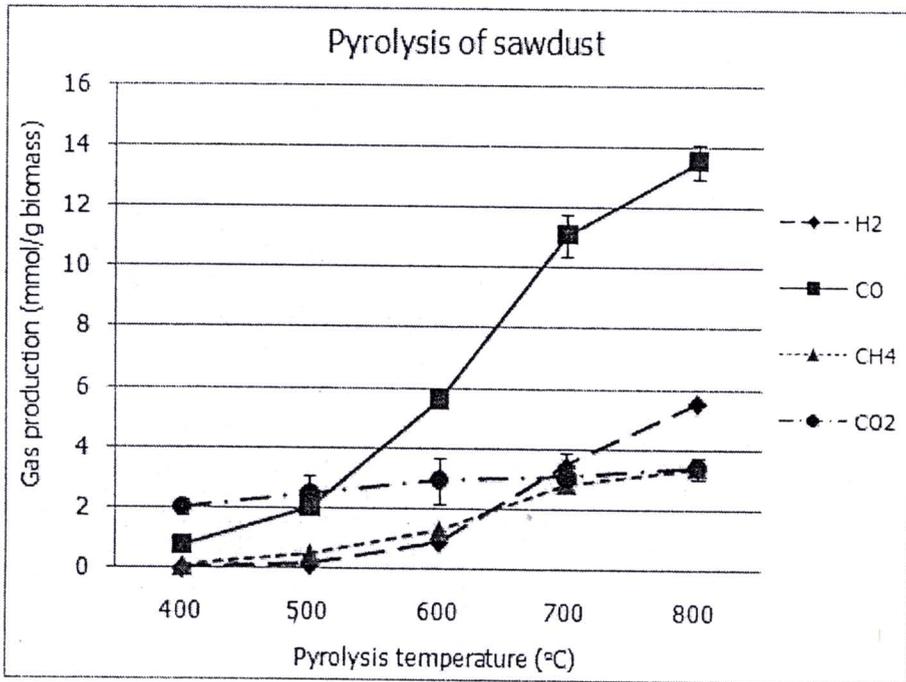


รูปที่ 4. 3 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของชี้เลี้ยง

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากชีวมวลทั้งสองชนิดในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สทุกชนิดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีปริมาณสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์ในปฏิกิริยาขั้นที่สอง (secondary reaction) ก่อให้เกิดการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (oxygen-containing functional groups) เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของทาร์ เช่น หมู่อีเทอร์ และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) (Zhang et al., 2010) ด้วยปฏิกิริยา decarbonylation รวมไปถึงเกิดการแตกวง (ring-opened intermediate) ของสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic compounds) ด้วย ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการสลายตัวของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ด้วยปฏิกิริยา decarboxylation ในปฏิกิริยาขั้นที่หนึ่ง (primary reaction) เท่านั้น (Shen, Gu and Bridgwater, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่าแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน มีปริมาณสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าเกิดการรวมตัวกันของแรดิคอลลิสระ (free radical) (Ates and Isikdag, 2009) ที่มาจากการแตกตัวของทาร์ในปฏิกิริยาขั้นที่สองด้วยปฏิกิริยา dehydrogenation, cyclization และ aromatization กลายเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic) และ polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs)

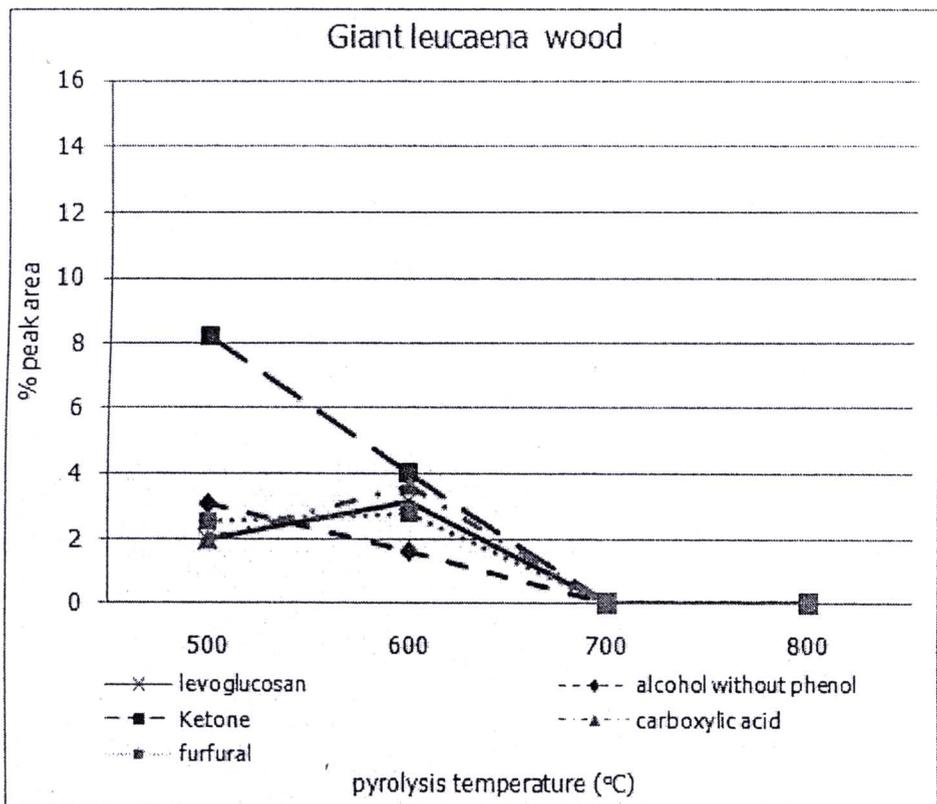


รูปที่ 4. 4 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของไม้กระถินยักษ์

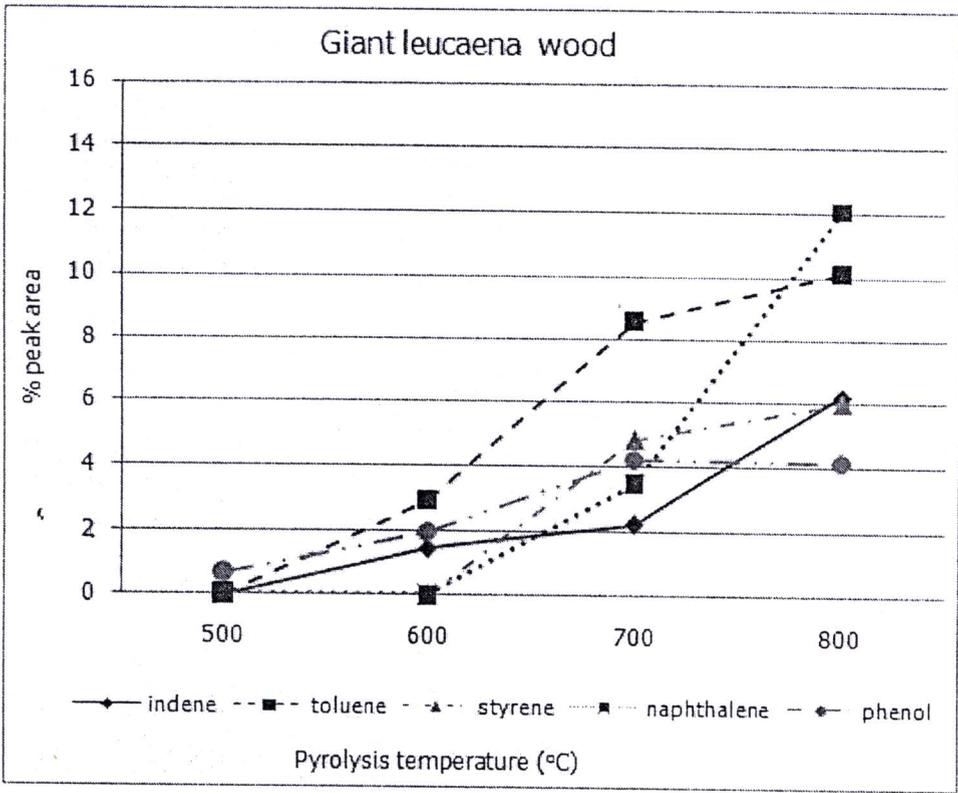


รูปที่ 4. 5 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สของขี้เลื่อย

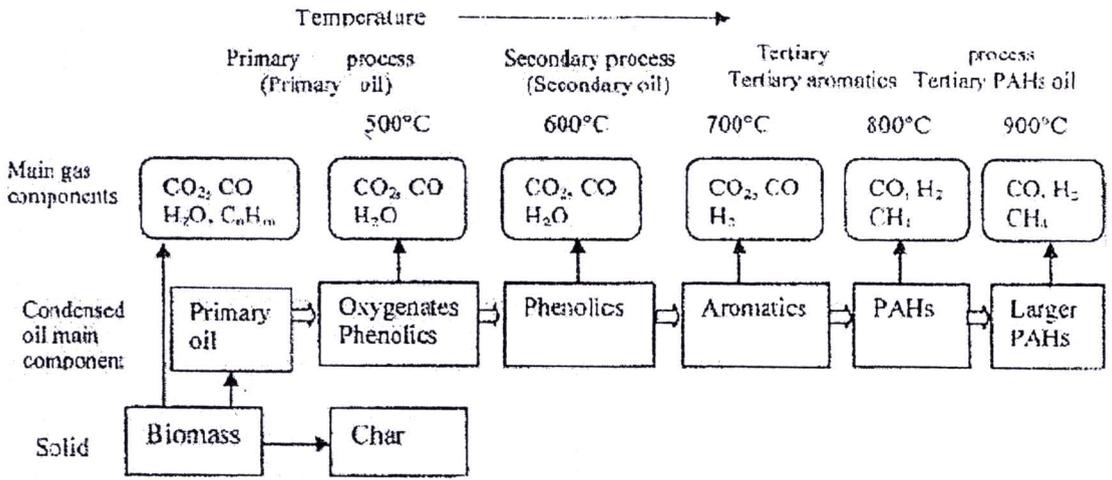
โดยสามารถยืนยันผลดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของทาร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) ในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ ของไม้กระถินยักษ์ ซึ่งได้มาจากการดักจับทาร์ด้วยตัวทำละลายไอโซโพนานอล(2-isopropanol) ในระบบพบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เกิดสารประกอบจำพวกคีโตน (ketone) ซึ่งมีหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากที่สุด และเกิดสารประกอบจำพวกกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และแอลกอฮอล์ (alcohol) รองลงมา แต่เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสสูงขึ้น สารประกอบเหล่านี้มีปริมาณลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น กลายเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic) ที่เพิ่มสูงขึ้นแทน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 โดยผลการทดลองนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Li และคณะ ซึ่งได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากปาล์ม (Li et al., 2007) โดยผลการทดลองนั้น สามารถเขียนแนวโน้มของการเกิดองค์ประกอบของทาร์ประเภทต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4. 6 องค์ประกอบของทาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆของไม้กระถินยักษ์



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของสารจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆของไม้กระถินยักษ์



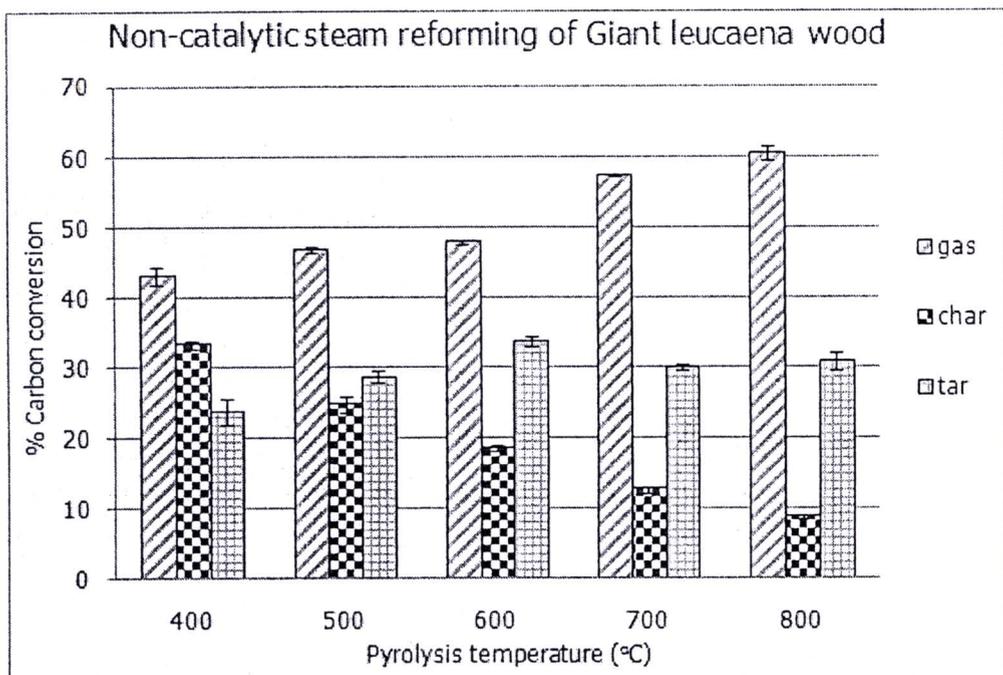
รูปที่ 4.8 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของสารที่อุณหภูมิต่างๆ (Li et al., 2007)

4.3.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming)

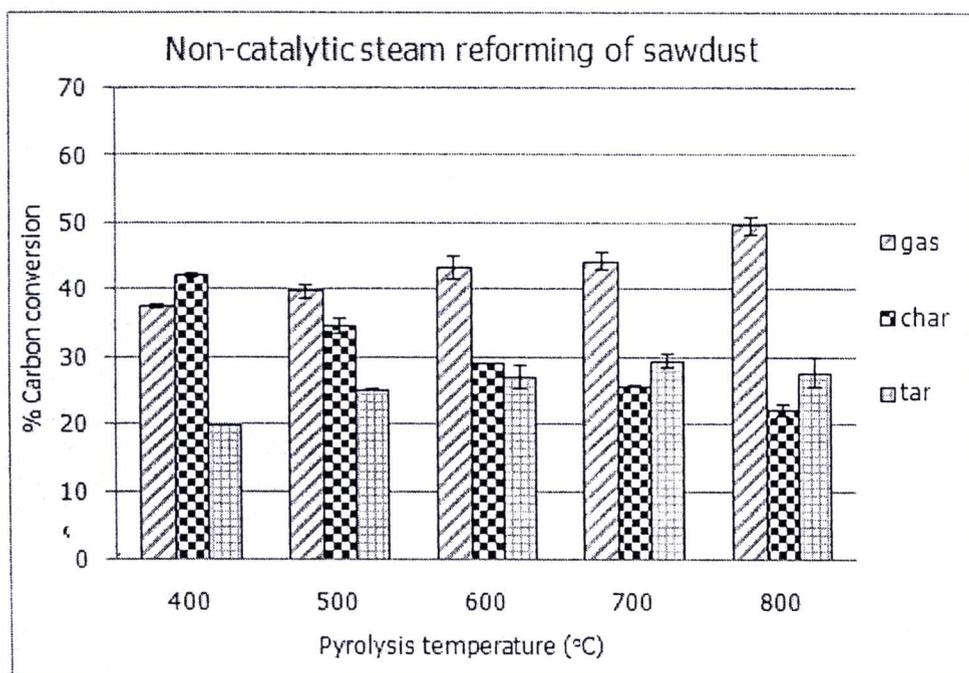
4.3.2.1 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลทั้งสองชนิด

จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลทั้งสองชนิด พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกันคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สและทาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน

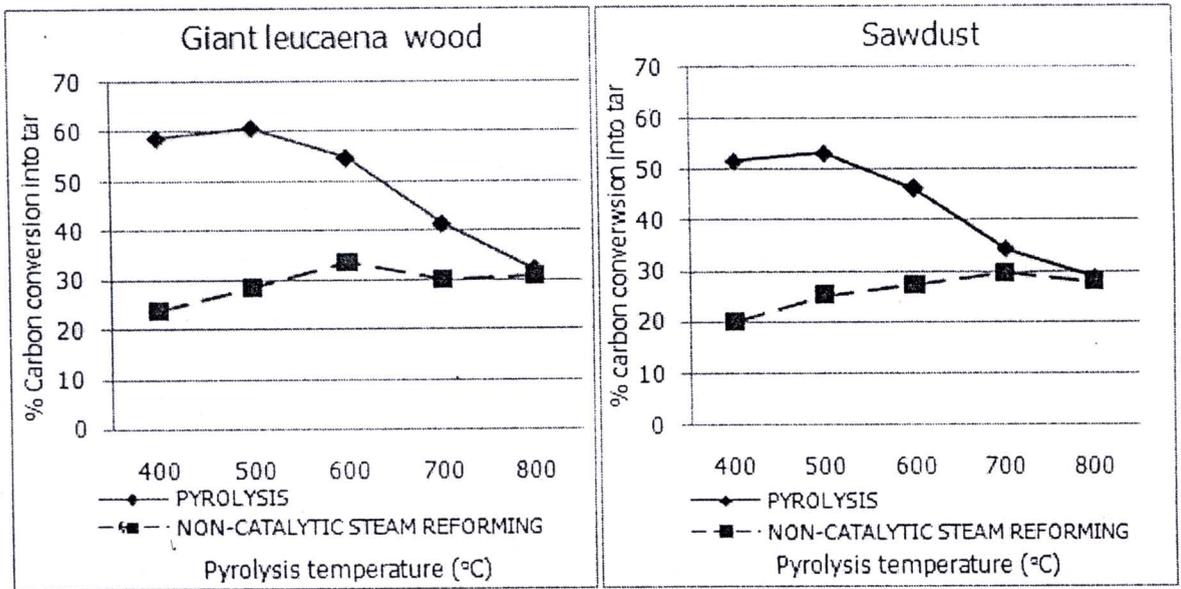


รูปที่ 4. 9 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของไม้กระถินยักษ์



รูปที่ 4. 10 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของชี้เลี้ยง

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของชีวมวลทั้งสองชนิด พบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูง ทาร์ที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำได้น้อยลง ทั้งนี้เนื่องมาจากทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำส่วนใหญ่เป็นสารประกอบจำพวกคีโตน (ketone) กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และแอลกอฮอล์ (alcohol) ทั้งที่เป็นแอลิฟาติก (aliphatic) และไซคลิก โดยสารประกอบเหล่านี้เป็นสารประกอบที่มีเฮเทอโรอะตอม (hetero atoms) อยู่ในโครงสร้างในปริมาณมาก โดยเฉพาะธาตุออกซิเจน (O) จึงส่งผลให้ทาร์ที่เกิดขึ้นสามารถแตกตัวด้วยไอน้ำได้ง่าย (Devi et al., 2005) ในขณะที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้น สารประกอบดังกล่าวมีปริมาณลดลง ในทางตรงกันข้ามเกิดสารประกอบจำพวกอะโรมาติก (aromatic) เช่น โทลูอีน (toluene) สไตรีน (styrene) และแนฟทาซีน (naphthalene) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ส่งผลให้ทาร์ที่อุณหภูมิสูงแตกตัวด้วยไอน้ำได้ยากขึ้นนั่นเอง (Devi et al., 2005) นอกจากนี้ยังพบฟีนอล (phenol) ในปริมาณที่สูงขึ้นด้วย จึงถือได้ว่าฟีนอลเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงด้วย (Li et al., 2007)

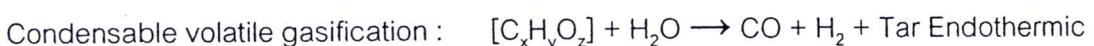


รูปที่ 4. 11 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสและรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของไม้กระถินยักษ์และซีเลื้อย

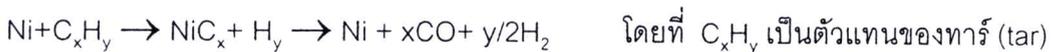
4.3.2.2 กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ และร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของชีวมวลทั้งสองชนิด

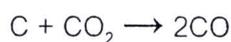
จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา carbon gasification และ condensable volatiles gasification ของทาร์ ดังสมการต่อไปนี้ (Zang et al., 2010) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน



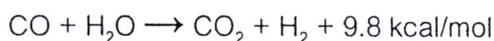
นอกจากนี้ยังพบว่าไม้กระถินยักษ์เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวทาร์ขึ้นสอง ตั้งแต่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ด้วยปฏิกิริยา carbonylation, dehydrogenation และ aromatization กลายเป็นสารประกอบอะโรมาติก ส่งผลให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและ คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ แบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณสูงขึ้นอย่างมากแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวนี้สามารถช่วยให้เกิดการแตกตัวของทาร์ได้ดีขึ้น ดังสมการต่อไปนี้ (สุภชิตา เกริก ไกวัล, 2551)

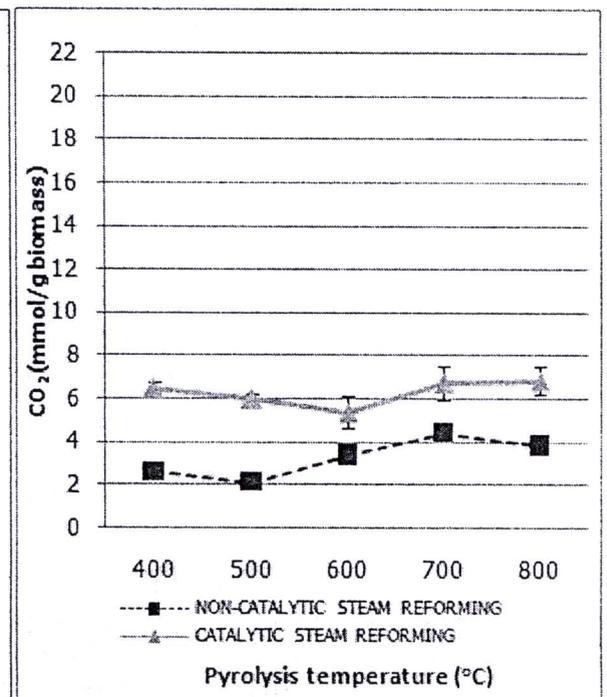
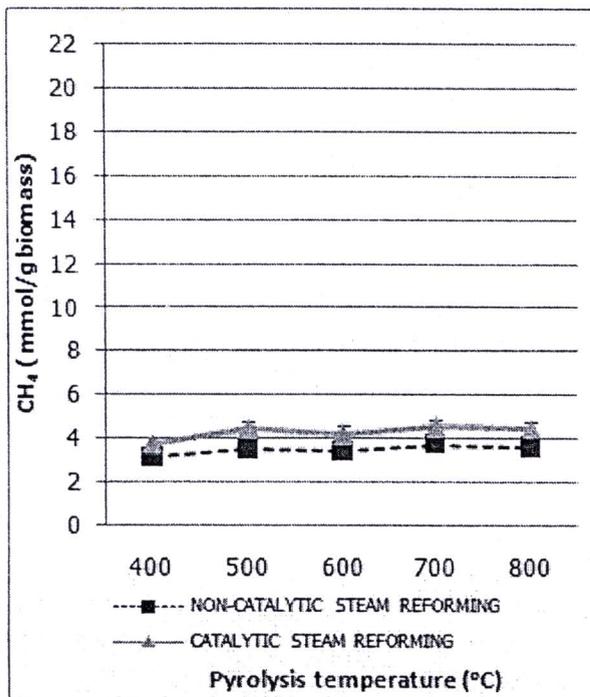
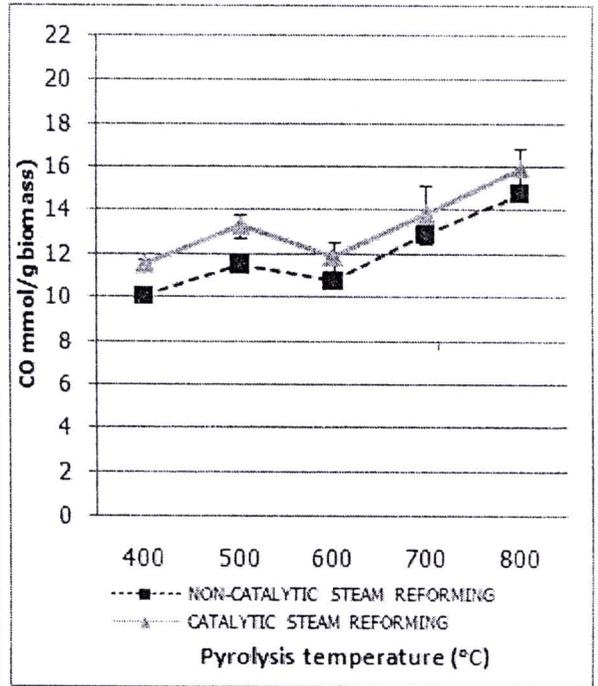
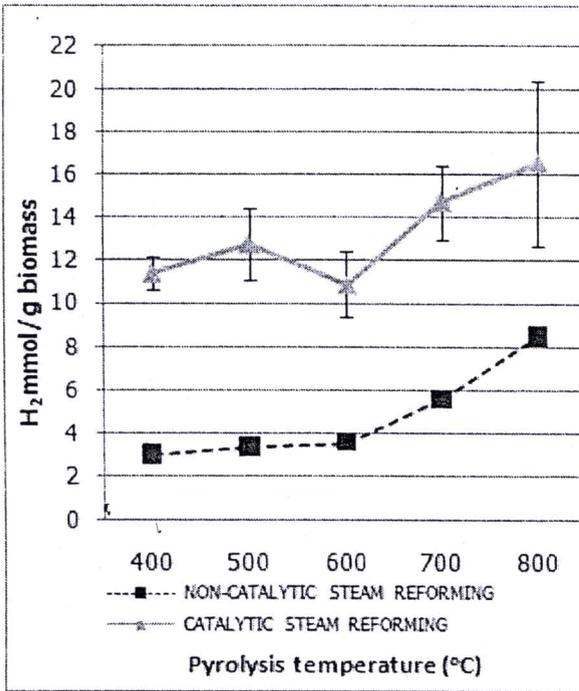


เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สมีเทน โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ รีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน แสดงว่าตัวเร่ง ปฏิกิริยานี้ไม่ช่วยในการแตกตัวของแก๊สมีเทนมากนัก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ของกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลง เล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาบาวดาร์ด (boudard reaction) ซึ่งสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการต่อไปนี้



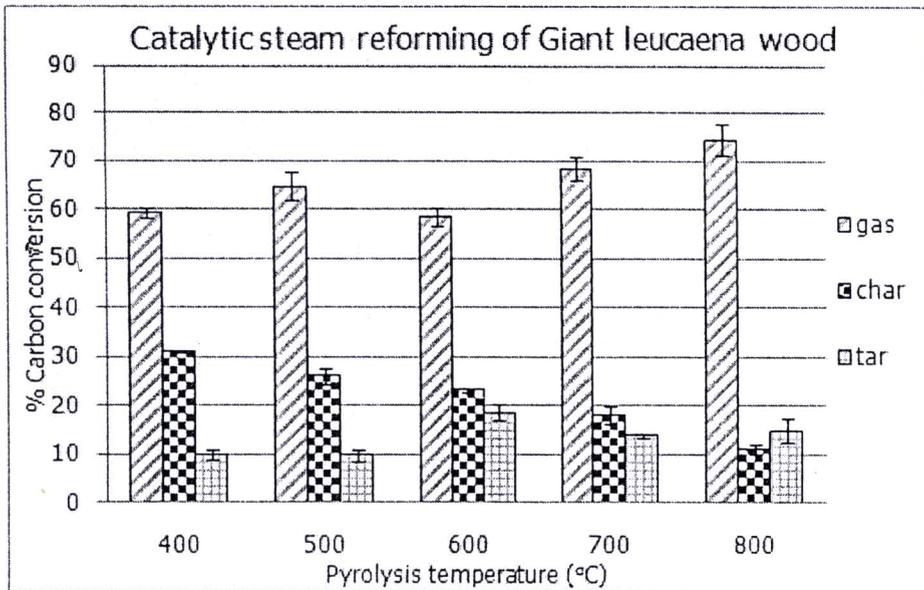
ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊สชิฟ (water gas shift) ซึ่งสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเป็น ปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการต่อไปนี้



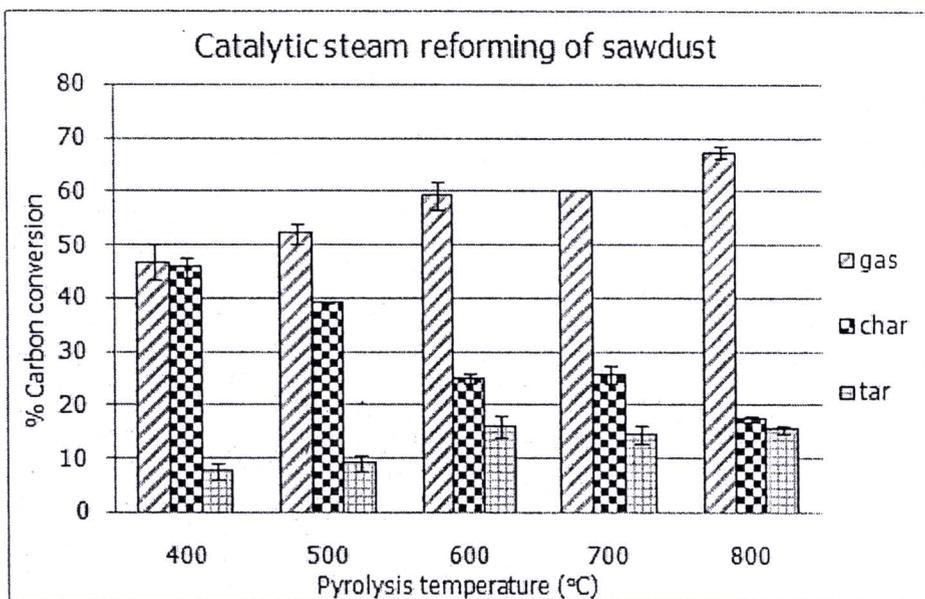


รูปที่ 4. 12 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์

และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของชีวมวลทั้งสองชนิด พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกันคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สและทาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะมีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์มากที่สุด

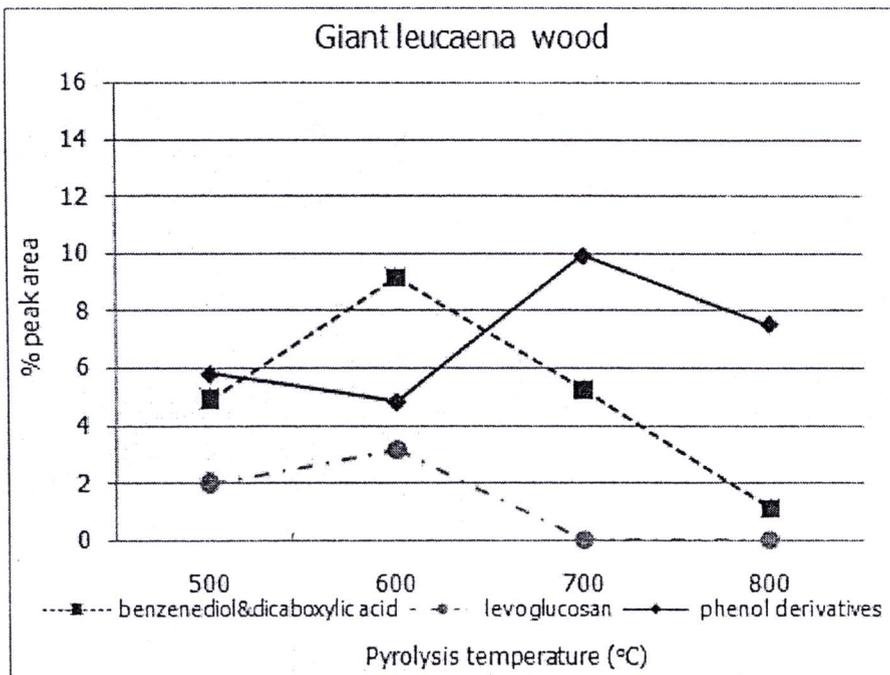


รูปที่ 4. 13 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของไม้กระถินยักษ์

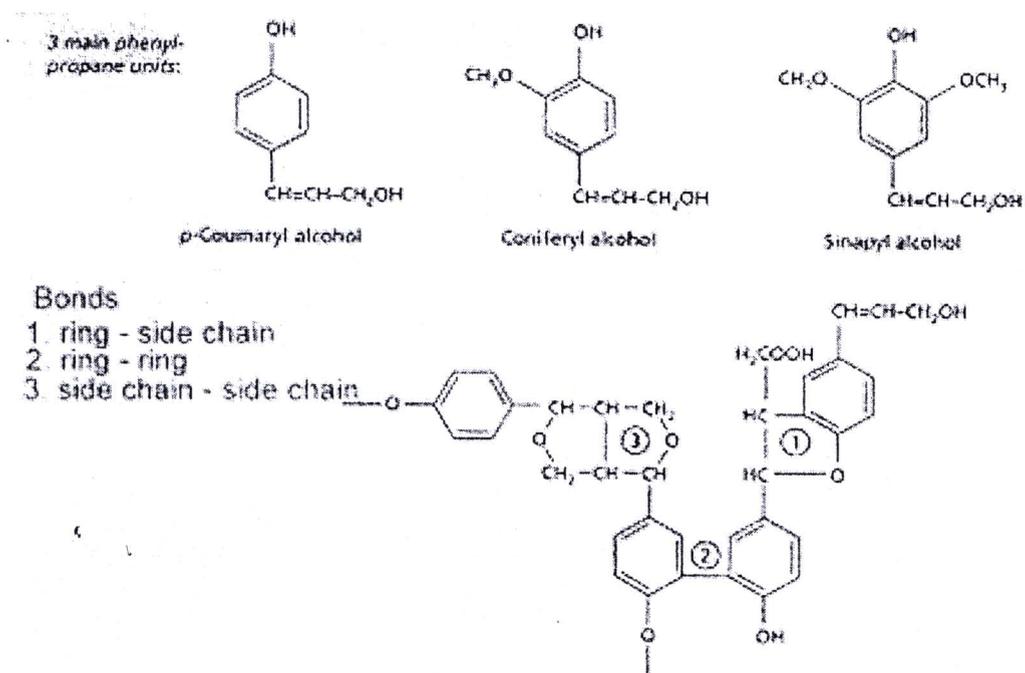


รูปที่ 4. 14 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ของขี้เลื่อย

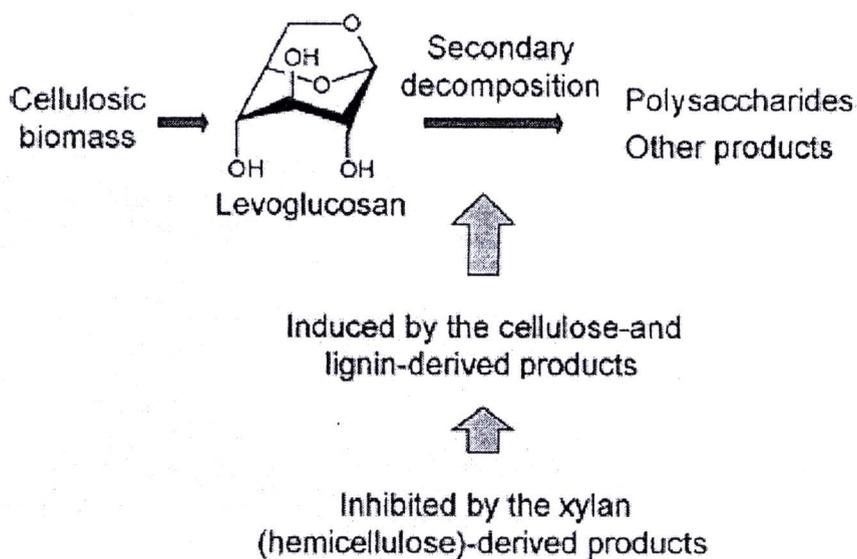
ซึ่งผลจากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ของไม้กระถินยักษ์ พบว่าเกิดสารประกอบจำพวกเบนซีนไดออล (benzenediol) และเบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิด (benzenedicarboxylic acid) เป็นจำนวนมาก แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 สารประกอบเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก (phenolics compound) ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการแตกตัวของหน่วย phenyl-propane ในโครงสร้างลิกนิน (Balat, 2008) แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และ 4.16 โดยสารประกอบเหล่านี้มีวงเบนซีนเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้โครงสร้างมีความเสถียรมากกว่าสารประกอบแอลิแฟติก (Aliphatic compounds) ของกรดคาร์บอกซิลิก และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic compounds) ของคีโตน และแอลกอฮอล์ ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ส่งผลให้สารที่อุณหภูมินี้เกิดการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดสารประกอบของลิวกลูโคแซน (levoglucosan) ในปริมาณที่สูงกว่าอุณหภูมิอื่นด้วย โดยสารประกอบนี้ ถือเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (< 630 องศาเซลเซียส) ของเซลลูโลส (Shen et al., 2010) ซึ่งสารประกอบนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่อื่นๆ ได้ (Kawamoto, Morisaki and Saka, 2009) ดังรูปที่ 4.17 จึงส่งผลให้ที่อุณหภูมินี้ยังคงเหลือสารในปริมาณมากกว่าอุณหภูมิอื่น



รูปที่ 4. 15 องค์ประกอบของสารจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆของไม้กระถินยักษ์

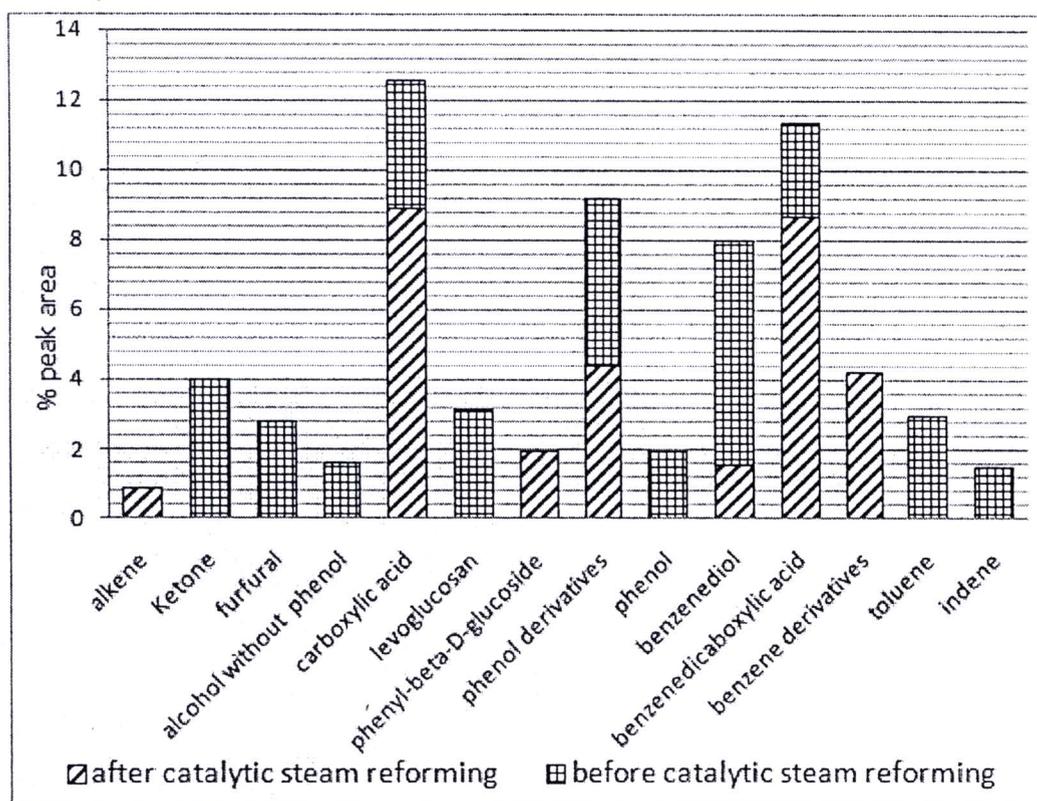


รูปที่ 4. 16 หน่วยของ phenyl-propane ซึ่งยึดกันด้วยพันธะต่างๆ ภายในโครงสร้างของลิกนิน
(biology : online)



รูปที่ 4. 17 การสลายตัวในปฏิกิริยาขั้นที่สองของลิวโกลูโคแซน (levoglucosan) ในกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล (Kawamoto, Morisaki and Saka, 2009)

โดยยืนยันผลดังกล่าว ได้จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบของทาร์ทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.18 พบว่าองค์ประกอบของเบนซีนไดออล แม้จะมีสัดส่วนที่ลดลงแต่ก็ยังคงเหลืออยู่ในระบบ ส่วนเบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิด และกรดคาร์บอกซิลิก กลับมีสัดส่วนที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบเบนซีนไดออล และเบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิดนี้มีความไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยากกว่าองค์ประกอบอื่น อย่างไรก็ตามการที่องค์ประกอบของเบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิด และกรดคาร์บอกซิลิก มีปริมาณสูงขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบของเบนซีนไดออล ฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีสัดส่วนลดลง กับไอน้ำซึ่งถือว่าเป็นแหล่งให้ออกซิเจนกับระบบโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วย นอกจากนี้ยังพบสารประกอบของ phenyl-beta-D-glucoside ซึ่งอาจเกิดมาจากการรวมตัวกันของเรดิคอลลอิสระ (free radical) ระหว่าง beta-D-glucoside (อนุพันธ์ของดีไวกลูโคแซน) กับวงเบนซีน ส่วนสารประกอบอะโรมาติก เช่น โทลูอีน และอินดีน นั้นไม่พบอยู่ในระบบหลังจากทำปฏิกิริยาแล้ว แสดงให้เห็นว่าสารประกอบเหล่านี้มีความไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4. 18 องค์ประกอบของทาร์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

4.3.3 ความว่องไวของการสลายตัวทาร์

ศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อความว่องไวในการสลายตัวของทาร์จากไม้กระถินยักษ์และซีเลื่อยในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (% tar conversion)

วิธีการคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของทาร์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)} = \frac{C_p - C_{NC}}{C_p} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา)} = \frac{C_p - C_c}{C_p} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ C_p คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์จากกระบวนการไพโรไลซิส

C_{NC} คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

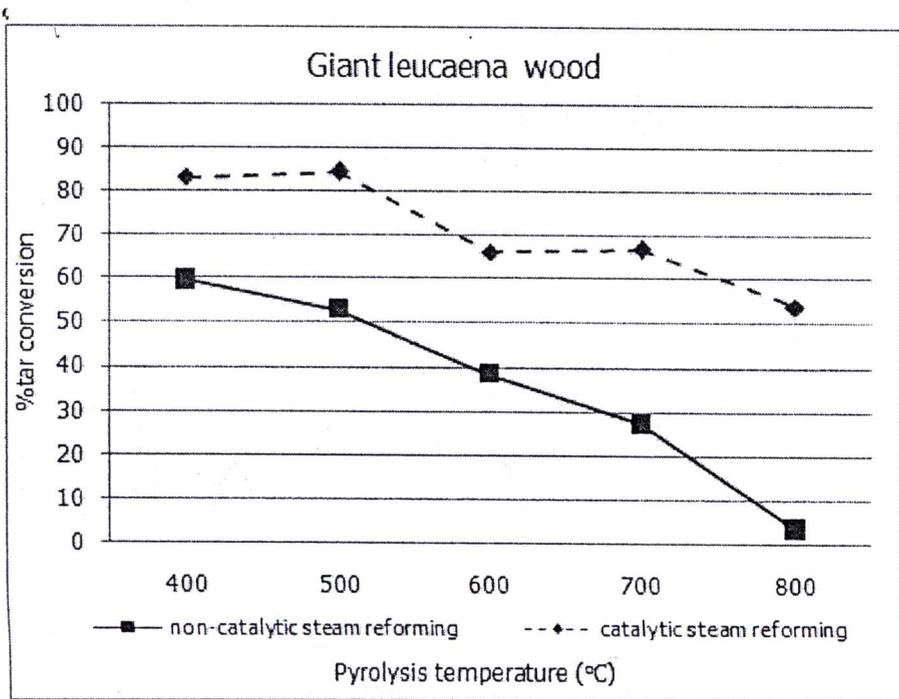
C_c คือ ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับสมการที่ 1 เป็นการคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนสมการที่ 2 เป็นการคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

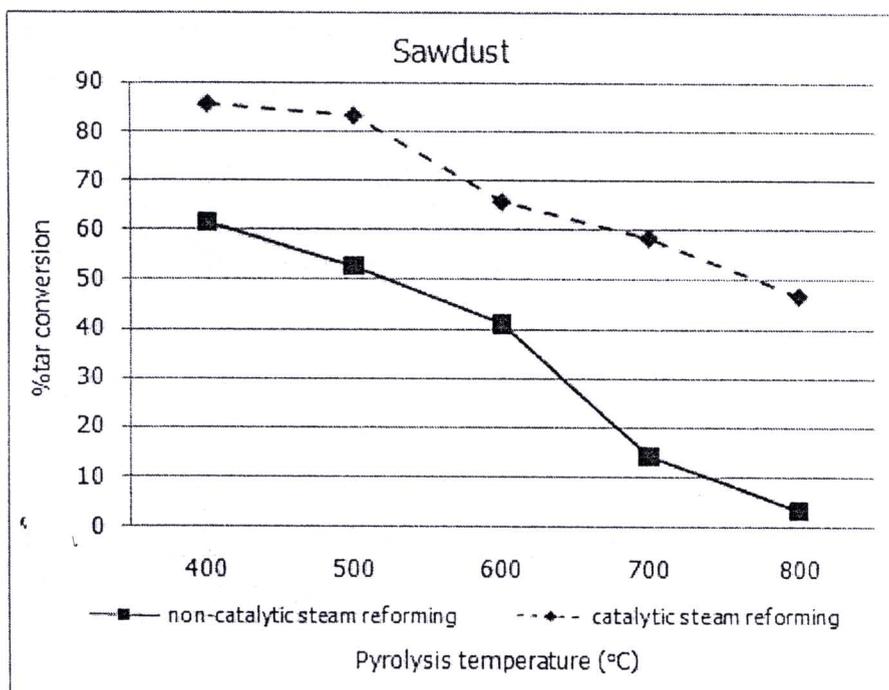
จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (% tar conversion) จากไม้กระถินยักษ์และซีเลื่อย โดยกราฟเส้นที่เป็นการคำนวณมาจากสมการที่ 1 พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกันคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละการเปลี่ยนของทาร์มีค่าลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าทาร์ส่วนใหญ่สลายตัวด้วยไอน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจากรูปที่ 4.11 รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 จึงสามารถสรุปได้ว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะมีความว่องไวในการสลายตัวด้วยไอน้ำได้น้อยกว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ

ส่วนกราฟเส้นประเป็นการคำนวณจากสมการที่ 2 พบว่าทั้งไม้กระถินยักษ์และขี้เลื่อยมีแนวโน้มคล้ายกันคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละการเปลี่ยนของทาร์มีค่าลดลง บ่งบอกได้ว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงมีความว่องไวต่อการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยกว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ

อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้นกลับพบว่า ผลต่างระหว่างกราฟเส้นทั้งสองมีค่ามากขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูง องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic) จึงแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความสามารถในการแตกตัวทาร์มีองค์ประกอบของอะโรมาติกได้ดีกว่าองค์ประกอบอื่น



รูปที่ 4. 19 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์



รูปที่ 4. 20 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของซีลี้อย

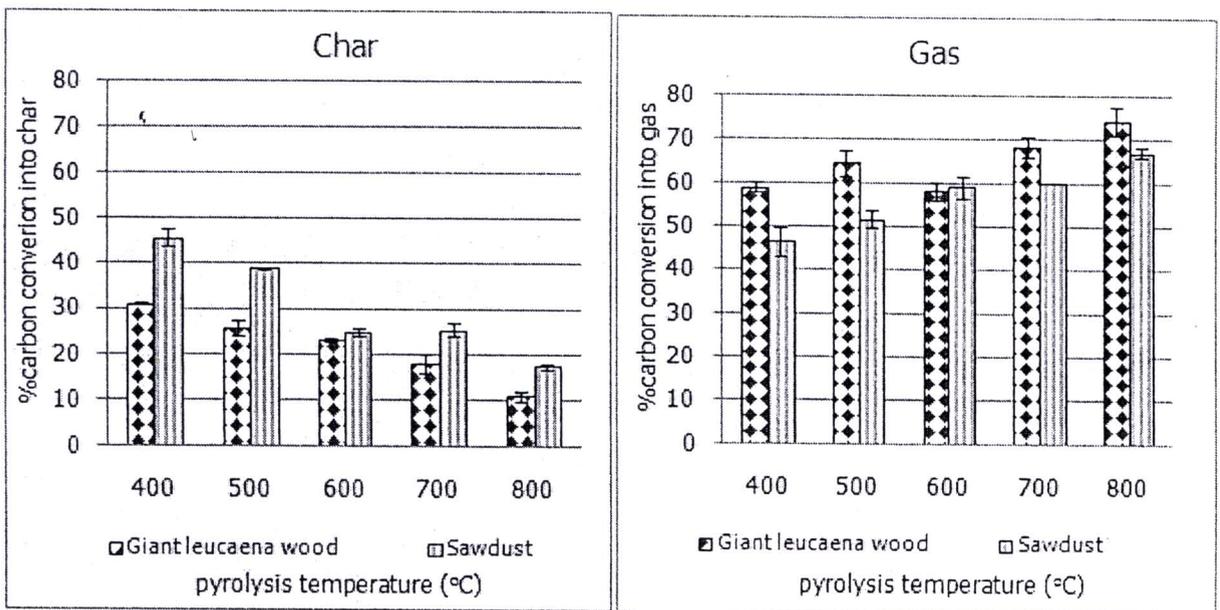
4.4 ผลของชนิดชีวมวล

4.4.1 กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (steam reorming)

ศึกษาผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการ รีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.21 แสดงผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์และแก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าซีลี้อยให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์มากกว่าไม้กระถินยักษ์ ในทางตรงกันข้ามกระถินยักษ์จะให้ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊สมากกว่าซีลี้อย เนื่องจากซีลี้อยนั้นมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) น้อยกว่าไม้กระถินยักษ์ ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ที่หนาแน่นมากกว่า จึงส่งผลให้ซีลี้อยมีร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์มากกว่าไม้กระถินยักษ์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในชีวมวลด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Demirbas พบว่าผลิตภัณฑ์

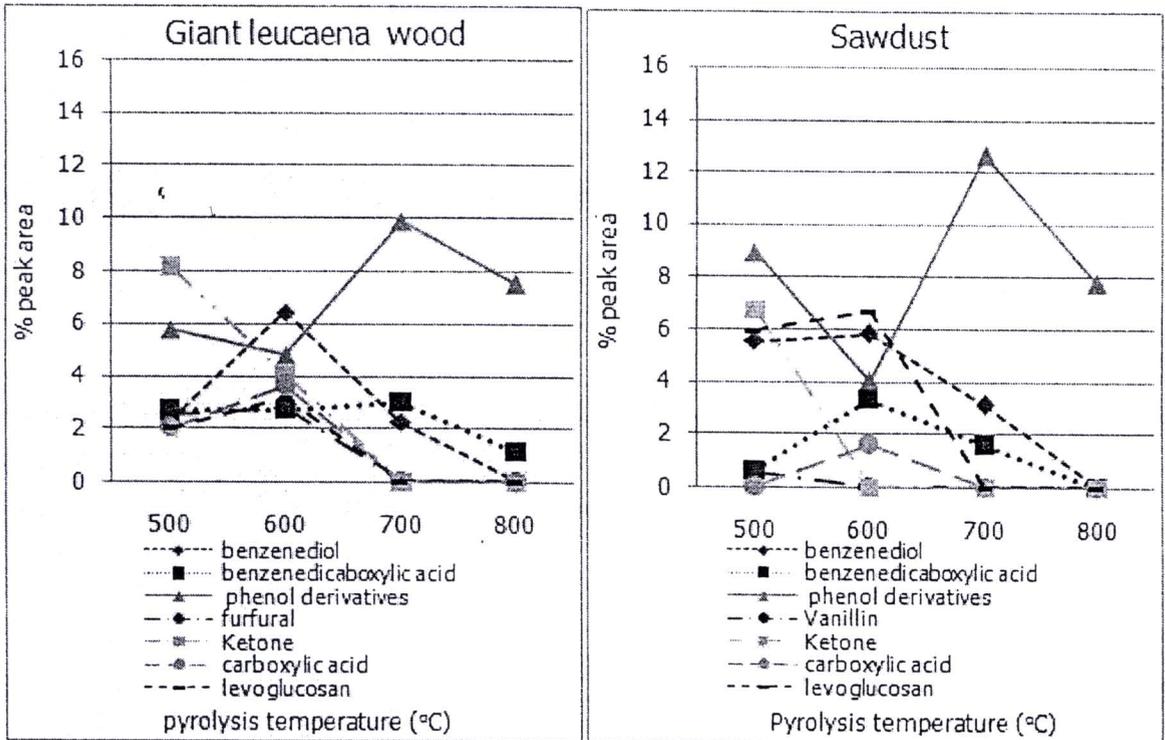
หลักที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนินในกระบวนการไพโรไลซิส คือ ชาร์ (Demirbas, 2000) และจากงานวิจัยของ Hosoya และคณะ พบว่าองค์ประกอบหลักของทาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของลิกนินนั้นมี vanillin เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย (Hosoya, Kawamoto and Saka, 2007) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สามารถสนับสนุนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของทาร์จากชี้เลื่อยในกระบวนการไพโรไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าชี้เลื่อยนั้นมีองค์ประกอบของลิกนินที่สูงกว่าไม้กระถินยักษ์



รูปที่ 4. 21 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์และแก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

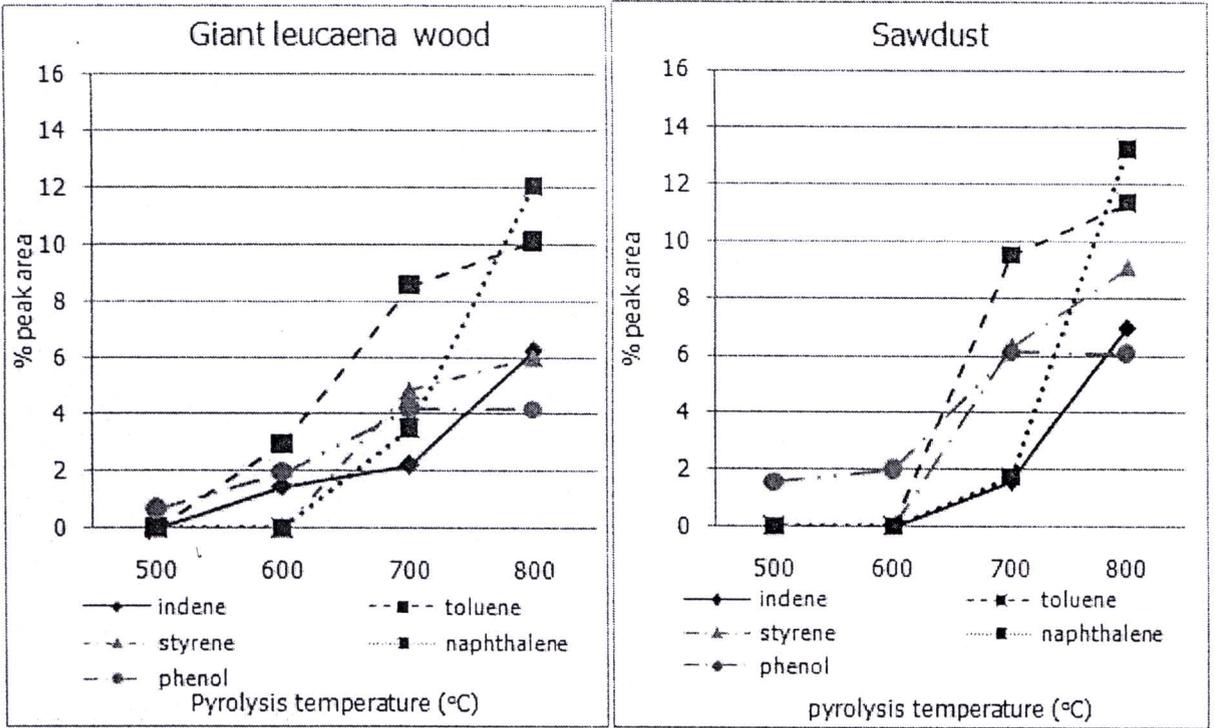
จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 เมื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบของทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิสจากชี้เลื่อย เปรียบเทียบกับไม้กระถินยักษ์ พบว่าที่อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่ำ ทาร์ที่เกิดขึ้นจากชี้เลื่อยมีองค์ประกอบของฟีนอลิก (phenolic) เบนซีนไดออล (benzenediol) เบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิด (benzenedicarboxylic acid) สูงกว่า และที่อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสสูง ทาร์ที่เกิดจากชี้เลื่อยมีองค์ประกอบของสารประกอบอะโรมาติกสูงกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์เช่นกัน จึงส่งผลให้ทาร์จากไม้กระถินยักษ์แตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ง่ายกว่าชี้เลื่อยนั่นเอง

จากรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นทาร์ระหว่างไม้กระถินยักษ์ และซีเลื่อยในกระบวนการไพโรไลซิสพบว่า ไม้กระถินยักษ์มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นทาร์สูงกว่าซีเลื่อย แต่ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนเป็นทาร์ของชีวมวลทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงบ่งบอกได้ว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์แตกตัวด้วยไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าทาร์ที่เกิดจากซีเลื่อย

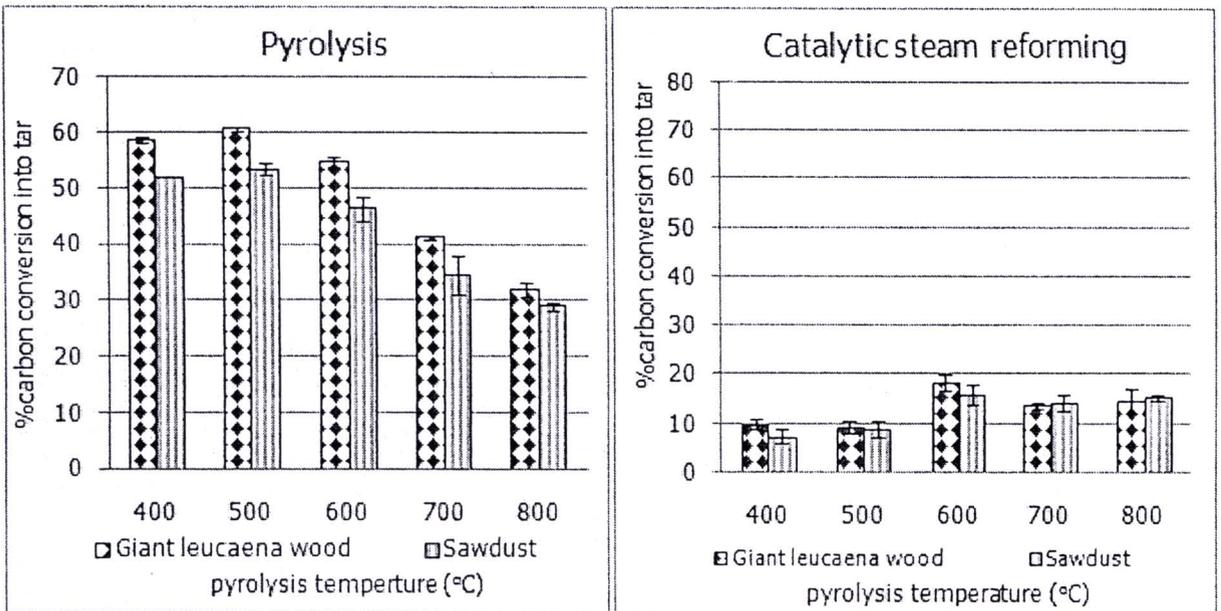


รูปที่ 4. 22 ผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบฟีนอลิก คีโตน และกรดคาร์บอกซิลิกของทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส



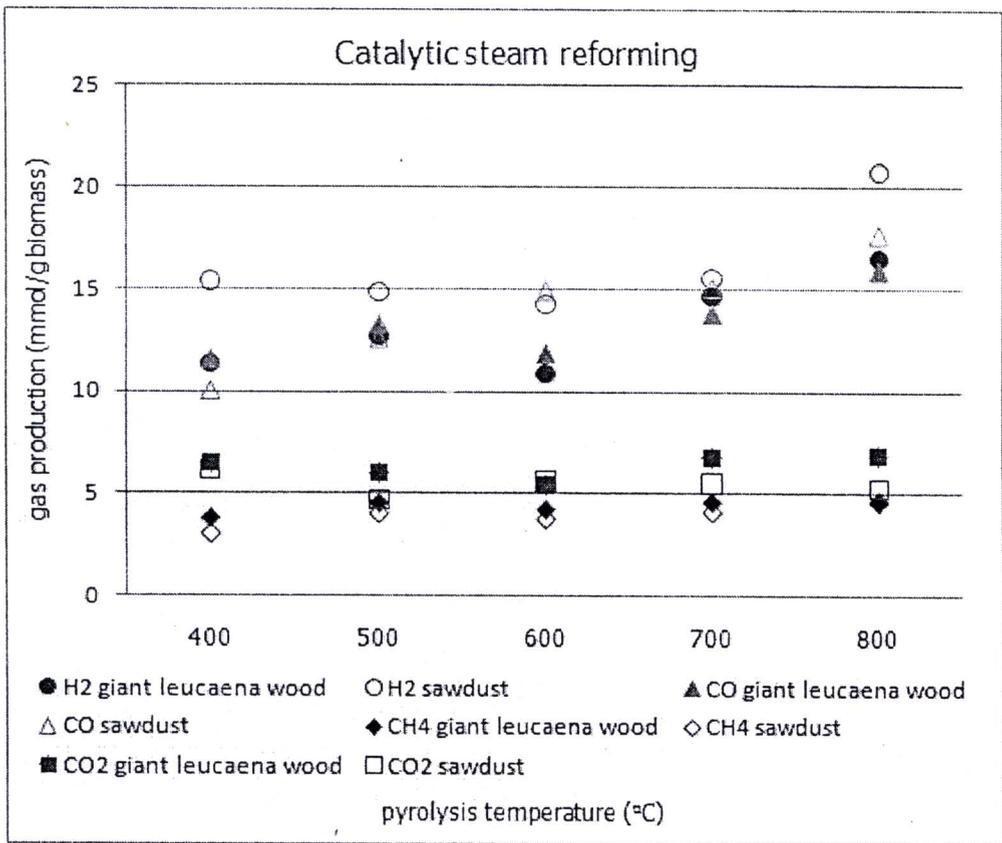


รูปที่ 4. 23 ผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ของทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส



รูปที่ 4. 24 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นทาร์ในกระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.25 แสดงผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลทั้งสองชนิด พบว่าไม้กระถินยักษ์จะให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนซีลี้อยจะให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่มากกว่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของซีลี้อยสูงกว่าไม้กระถินยักษ์เกือบทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งจากงานวิจัยของ Hanaoka และคณะได้ทำการศึกษาการสลายตัวของชีวมวลในกระบวนการแก๊สซิเคชันด้วยไอน้ำและอากาศที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินเป็นหลักจะให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่สูงกว่าชีวมวลที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสเป็นหลัก (Hanaoka et al., 2005) จึงกล่าวได้ว่าซีลี้อย มีองค์ประกอบของลิกนินที่สูงกว่าไม้กระถินยักษ์ จากผลการทดลองนี้สามารถสนับสนุนเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น



รูปที่ 4. 25 ผลของชนิดชีวมวลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

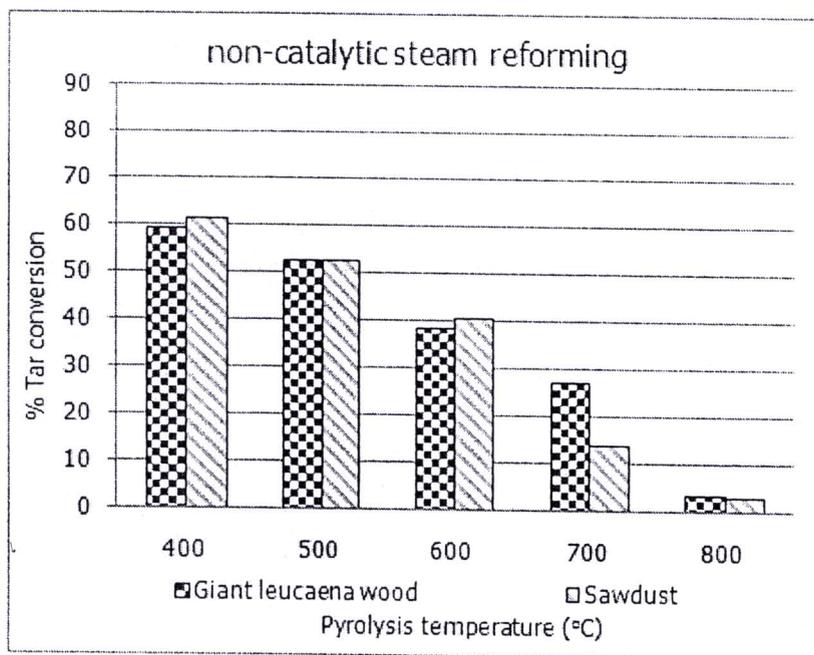
4.4.2 ความว่องไวของการสลายตัวทาร์

ศึกษาผลของชนิดชีวมวลต่อความว่องไวของการสลายตัวทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ (%tar conversion) ซึ่งวิธีการคำนวณและความหมายของตัวแปร แสดงได้ดังสมการที่ 1 และ 2 ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น

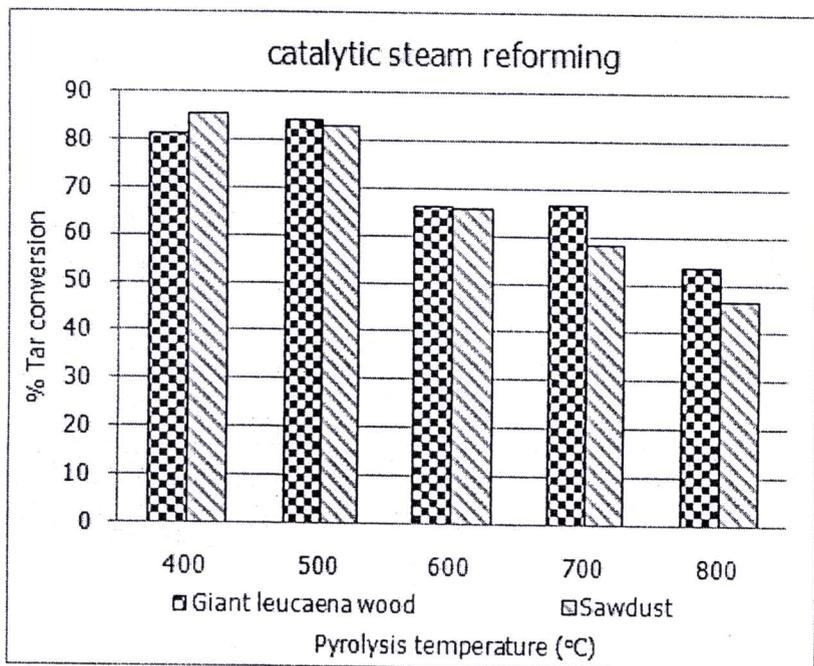
จากรูปที่ 4.26 แสดงผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 1 พบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิสตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียส ชีล้อยมีร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์ เนื่องจากที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูง องค์ประกอบของทาร์ที่เกิดจากชีล้อยมีสารประกอบอะโรมาติกสูงกว่าไม้กระถินยักษ์ จึงส่งผลให้สารประกอบเหล่านี้มีความสามารถในการแตกตัวด้วยไอน้ำได้น้อยนั่นเอง ดังรูปที่ 4.23

จากรูปที่ 4.27 แสดงผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 2 พบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิสตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป ชีล้อยมีร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ต่ำกว่าไม้กระถินยักษ์เช่นกัน เนื่องจากในกระบวนการไพโรไลซิสทาร์ที่เกิดจากชีล้อยมีองค์ประกอบของฟีนอลิก เบนซีนไดออกไซด์ เบนซีนไดคาร์บอกซิลิก เอซิด และสารประกอบอะโรมาติกสูงกว่าทาร์ที่เกิดจากไม้กระถินยักษ์

ดังนั้นจากรูปที่ 4.22 และ 4.23 และรูปที่ 4.27 จึงสามารถสรุปได้ว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของชีล้อยจะมีความว่องไวในการสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้อยกว่าทาร์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์



รูปที่ 4. 26 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4. 27 ผลของชนิดชีวมวลต่อร้อยละการเปลี่ยนของทาร์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา