

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น

- แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก
- ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย
- เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จาก

สวนป่าที่ปลูกไว้

- กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด
- กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก
- กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไป

ผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว เป็นต้น

นอกจากนั้นชีวมวลยังรวมถึงมูลสัตว์จากฟาร์มเลี้ยงสัตว์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ชีวมวล สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมา (อุสาคี, 2546)

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท ตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้

2. เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (agricultural residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง

3. ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) เช่นไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

4. ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (waste streams) เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลกลบขี้เลื่อยเส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม (<http://www.thaienv.com>)

2.1.1 การผลิตชีวมวลในประเทศไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักของประเทศในด้านพลังงานหมุนเวียน ได้ทำการสำรวจศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืช 10 ชนิดหลักของประเทศ ดังตารางที่ 2.1 โดยได้พิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการเก็บหรือนำวัสดุเหล่านั้นกลับมาใช้ตามสภาพความเป็นจริง พบว่า ในปี 2543 ประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรรวม 63 ล้านตัน และมีการนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงและอื่นๆ เพียง 16 ล้านตันเท่านั้น ส่วนที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้และมีศักยภาพในการให้พลังงานนั้นมีสูงถึง 42 ล้านตัน และหากนับรวมถึงแก๊สชีวภาพที่ได้จากมูลสัตว์ ชยะ และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มาประกอบการประเมิน และได้คิดเผื่อถึงความเป็นไปได้ทุกอย่างในการนำพลังงานกลับมาใช้จริงแล้ว พบว่า ในปี 2543 เพียงปีเดียวประเทศไทยมีศักยภาพของพลังงานชีวมวลถึง 650 เพตาจูล เทียบเท่ากับพลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปริมาณ 17,850 ล้านลิตร (ในปี 2545 ประเทศไทยใช้น้ำมันดีเซลทั้งปีรวม 15,970 ล้านลิตร) (วงกต, 2547)

ตารางที่ 2.1 การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, ปีเพาะปลูก 2546/47

ชนิด	วัสดุเหลือใช้	แฟกเตอร์ของ การใช้เป็น พลังงาน	ปริมาณ วัสดุ เหลือใช้ที่ ใช้เป็น พลังงาน (10 ³ กก.)	แฟกเตอร์ วัสดุ เหลือใช้ ที่ยังไม่มี การใช้	ปริมาณ วัสดุเหลือ ใช้ที่ยังไม่ มีการใช้ (10 ³ กก.)	ค่า ความร้อน (เมกะจูล/กก.)	พลังงาน (เทราจูล)
1. อ้อย	ชานอ้อย ส่วนยอดและใบ	0.793	12,344	0.207	3,222	14.40	46,401
		0.000	0	0.986	15,929	17.39	277,006
2. ข้าว	แกลบ ฟาง (ส่วนบน)	0.507	2,819	0.493	2,741	14.27	39,112
		0.000	0	0.684	7,391	10.24	75,679
3. ปาล์ม น้ำมัน	ทะลายปาล์ม	0.030	42	0.584	814	17.86	14,535
	เส้นใยปาล์ม	0.858	411	0.134	64	17.62	1,130
	กะลาปาล์ม	0.588	94	0.037	6	18.46	109
	ก้าน	0.000	0	1.000	8,479	9.83	83,345
	ทะลายตัวผู้	0.000	0	1.000	759	16.33	12,389
4. มะพร้าว	เปลือก	0.289	146	0.595	302	16.23	4,894
	กะลามะพร้าว	0.413	93	0.378	85	17.93	1,518
	ทะลายมะพร้าว	0.144	10	0.843	58	15.40	891
	ทางมะพร้าว	0.159	50	0.809	255	16.00	4,077
5. มันสำปะ หลัง	ลำต้น	0.000	0	0.407	683	18.42	12,577
6. ข้าวโพด	ชังข้าวโพด	0.193	226	0.670	784	18.04	14,142
7. ถั่วลิสง	เปลือก	0.000	0	1.000	45	12.66	564
8. ฝ้าย	ลำต้น	0.000	0	1.000	116	14.49	1,686
9. ถั่วเหลือง	ลำต้น, ใบ, เปลือก	0.007	6	0.760	646	19.44	12,551
10. ข้าวฟ่าง	ใบ, ต้น	0.118	21	0.648	115	19.23	2,215
รวมทั้งหมด							604,822

- ที่มา : 1. "แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน" และ "แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้" สำหรับใบและยอดอ้อย ฟางข้าว ต้นมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด และวัสดุเหลือใช้จากถั่วเหลืองและข้าวฟ่าง : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, ภาวศึกษาพฤติกรรมและรูปแบบการใช้พลังงานในการเพาะปลูก, 2535.
2. "แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน" และ "แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้" สำหรับชานอ้อย : Black & Veatch(Thailand), Thailand Biomass-Based Power Generation and Cogeneration within Small Rural Industries(Progress report),1999.
3. "แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน" และ "แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้" สำหรับปาล์ม น้ำมัน:กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, รายงานผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากปาล์ม น้ำมัน, 2538.
4. "แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน" และ "แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการนำไปใช้" สำหรับมะพร้าว:กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, รายงานผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากมะพร้าว, 2537.
5. "แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน" สำหรับแกลบ : กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, รายงานพลังงานของประเทศไทย, 2544.

โดยส่วนเหลือจากอ้อย เช่น ชานอ้อยหรือยอดและใบอ้อย แกลบและฟางข้าว และส่วนเหลือของปาล์มน้ำมัน เช่นกะลา ทะลาย หรือเส้นใยปาล์ม จัดเป็นกลุ่มชีวมวลที่มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็น 85% ของศักยภาพชีวมวลทั้งหมดของประเทศ (วงกต, 2547) อย่างไรก็ตาม ชีวมวลในประเทศไทยมีอยู่หลายชนิด ซึ่งในการนำมาใช้ประโยชน์ต้องคำนึงถึงความเหมาะสม และจุดเด่นจุดด้อยที่มีความแตกต่างกันไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น กากมันสำปะหลัง และส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80-90 บางชนิดต้องนำมาแยกก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น โดยศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม ได้ระบุถึงคุณสมบัติของชีวมวล และการนำมาใช้ประโยชน์เฉพาะประเภทที่สำคัญๆ ดังนี้

1. แกลบ (rice husk) เป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าวเปลือก ประโยชน์ที่สำคัญของแกลบ คือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เช่น การใช้แกลบในกระบวนการแกซิฟิเคชัน การอัดแกลบเป็นก้อนเชื้อเพลิง เป็นต้น แกลบมีจุดเด่นตรงที่มีความชื้นต่ำ และมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับทำเชื้อเพลิง นอกจากนี้หากควบคุมสมบัติของซี้ได้ได้ตามที่ผู้ซื้อต้องการ ก็จะสามารถจำหน่ายได้ในราคาดี อย่างไรก็ตาม ปัญหาของชีวมวลชนิดนี้ อยู่ที่การมีน้ำหนักเบา (1 ลูกบาศก์เมตรหนัก 123 กิโลกรัม) จึงอาจเกิดการฟุ้งกระจายระหว่างการขนส่ง และในการเผาไหม้จะเกิดซี้ไถ่ร้อยละ 16-18 โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้ามีการจัดการไม่ดีพอ ก็จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

2. ชานอ้อย (bagasse) เป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล จุดด้อยของชีวมวลชนิดนี้ก็คือการมีน้ำหนักเบา ความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 ส่วนใหญ่ (ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก) ใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษและ MDF Board ดังนั้นจึงมีชานอ้อยเหลือในแต่ละปีน้อยมาก

3. กากปาล์ม (palm fibre) นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งกะลาปาล์มให้ความร้อนสูงมากจึงเหมาะที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิง และเนื่องจากทะลายปาล์มมีขนาดใหญ่ ดังนั้นก่อนนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง จึงต้องผ่านกระบวนการย่อยก่อน นอกจากนี้ยังมีสารประกอบคลอไรด์สูง จึงต้องมีการออกแบบหม้อต้ม (boiler) เป็นพิเศษ เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน

4. เศษไม้ (wood residual) สามารถนำซี้เหลือไปใช้เพาะเห็ด ทำรูป คลุมเผาถ่าน เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมบ่มยางพารา และใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งยังมีเศษไม้อีกมากที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น รากไม้ ปลายไม้และปีกไม้ อย่างไรก็ตาม จุดด้อยของเศษไม้คือ เศษไม้สด

จะมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการย่อยเพื่อให้ลดความชื้นก่อนนำไปเผา

5. ชังข้าวโพด (bagasse) ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดมาใช้งาน ส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงและเป็นวัตถุดิบในการทำอาหารสัตว์ ชีวมวลชนิดนี้ มีค่าความร้อนสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ แต่การเก็บรวบรวมยังทำได้ลำบาก เพราะส่วนใหญ่ชาวไร่นิยมทำการฝังกลบมากกว่า (<http://www.eppo.go.th/admin/pr/mtc-2546-04-21.html>)

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล

ภาพรวมของพลังงานชีวมวล ประมาณร้อยละ 12 ของพลังงานของโลกมาจากพลังงานชีวมวล เช่น ชยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์และพืชให้พลังงานบางชนิด ในประเทศอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงเหล่านี้ได้ถูกนำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (เช่น โรงงานกระดาษ และ โรงงานน้ำตาล เป็นต้น) ตรงกันข้ามกับประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพ และสร้างมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม แต่การเพิ่มขึ้นของรายได้และอุตสาหกรรมจะเป็นตัวผลักดันให้มีการใช้เทคโนโลยีชีวมวลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสะอาดขึ้น

2.1.2.1 สรุปข้อดีการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. การเผาไหม้เตาและถ่านหินก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas) จะทำให้โลกร้อนขึ้น แต่การเผาชีวมวลไม่ถือว่าก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกโดยรวม เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้โดยพืช
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้ โดยปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ จะเกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 21 เท่า
3. ชีวมวลจะมีกำมะถัน หรือซัลเฟอร์ ไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้ จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-3.8 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหิน)

4. ชี้อัดของชีวมวลมีสภาพเป็นต่าง ดังนั้นเหมาะสมที่นำไปเพาะปลูก หรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และซีเมนต์
5. การนำชีวมวลมาใช้ นอกจากจะก่อให้เกิดรายได้แก่ผู้ผลิตชีวมวลแล้ว ยังลดภาระในการกำจัด เช่น นำไปฝังกลบ หรือเผาทิ้ง เป็นต้น
6. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตา และถ่านหิน เป็นต้น

2.1.2.2 สรุปข้อเสียการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. ชีวมวลมีน้ำหนักเบา ถ้าขนส่งชีวมวลทางรถบรรทุก ต้องขนส่งมากเที่ยว ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้นแล้ว ยังอาจมีผลกระทบต่อชุมชนในด้านการจราจร ความปลอดภัยในการใช้ถนน
2. เนื่องจากชีวมวลมีความชื้นสูง การออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่องไอเสียต้องมีขนาดใหญ่ตลอดจนถึงการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่มเติม ซึ่งทำให้เงินลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นหลากหลายหม้อผลิตไอน้ำอาจทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ
3. ชี้อัดชีวมวลมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไป จะทำให้ชี้อัดหลอมละลายติดในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีผลให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลงและเกิดการอุดตัน
4. ชีวมวลบางประเภทมีส่วนผสมของอัลคาไลน์ ซึ่งจะกัดกร่อนท่อไอน้ำในหม้อผลิตไอน้ำ ดังนั้นในการออกแบบหม้อผลิตไอน้ำต้องคำนึงถึงจุดนี้ (ชัยวัฒน์, 2547)

ถ้ามองในด้านเศรษฐศาสตร์ เชื้อเพลิงชีวมวลเสียเปรียบเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ถ้าพิจารณาเรื่องการทำลายสภาวะแวดล้อมแล้ว เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อได้เปรียบกว่า เชื้อเพลิงชีวมวลมีความหนาแน่นน้อยกว่า ให้พลังงานน้อยกว่า มีน้ำหนักเบาว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและยากในการจัดการกว่า แต่เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีด้านสิ่งแวดล้อม คือ มีขึ้นใหม่ทุกปี ไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (การเผาไหม้ของชีวมวลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกินกว่าที่พืชได้ดูดซับไว้ระหว่างการเจริญเติบโต) มีกำมะถันน้อยกว่า (จึงทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยกว่า) และอุณหภูมิเผาไหม้ต่ำกว่า (ช่วยลดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้มากกว่า)

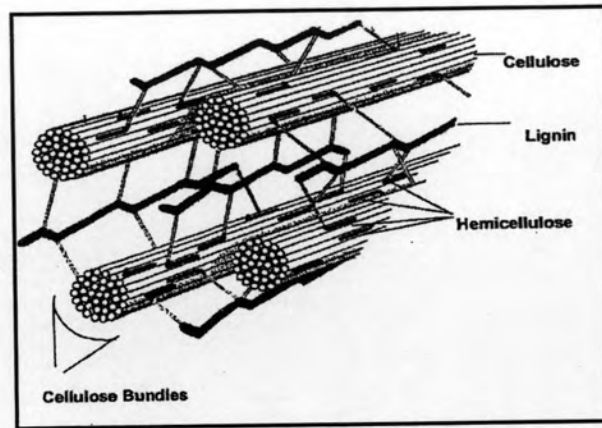
นอกจากนี้การนำแหล่งวัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศมาใช้ ถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและจากการสำรวจและประเมินศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยชีวมวลภายในประเทศ

พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ 700-1000 เมกกะวัตต์ หากพลังงานจากชีวมวลได้รับการพัฒนาให้นำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังแล้ว ก็จะเป็นผลดีต่อประเทศโดยรวม

2.1.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดและภาวะที่เจริญเติบโตของพืชนั้นๆ การนำส่วนประกอบของพืชชนิดต่างๆ มาใช้ให้เหมาะสมกับงานและเกิดประโยชน์สูงสุด จึงจำเป็นต้องทราบลักษณะโครงสร้างของพืชและปริมาณส่วนประกอบต่างๆ ที่มีในพืชนั้นๆ ด้วย

โครงสร้างหลักของเนื้อไม้ พบเซลลูโลสมากที่สุดประมาณร้อยละ 40-50 ของน้ำหนักแห้ง เซลลูโลสพบได้ตามผนังเซลล์ของพืชทุกชนิดในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall) มีหน้าที่ช่วยทำให้พืชมีโครงสร้างแข็งแรง ส่วนเฮมิเซลลูโลสพบเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส จะยึดติดกับเซลลูโลสในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และลิกนินพบประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์รองจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พบในชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall) และ มิดเดิลลามেলা (middle lamella) โดยสร้างกระจายรอบเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เกิดเป็นสารประกอบลิกโนเซลลูโลสที่มีกิ่งก้านสาขามากมาย มีโมเลกุลขนาดใหญ่ตั้งแต่ 600,000-1,000,000 ดาลตัน (Kirk and Farrell, 1987) ลิกนินทำหน้าที่เชื่อมเซลล์เข้าด้วยกัน สร้างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นให้กับเนื้อเยื่อพืชและลดการซึมผ่านของน้ำข้ามผนังเซลล์ จึงทำให้ลิกนินเป็นตัวป้องกันการติดเชื้อที่ทำให้เกิดโรคต่างๆ (Boominathan and Reddy, 1991)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในผนังเซลล์พืช



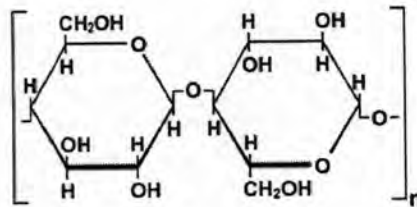
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบในเซลล์พืช (Greulich ,1973 อ้างถึงใน ปราณีย์ สติรพิพัฒน์กุล, 2532)

2.1.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

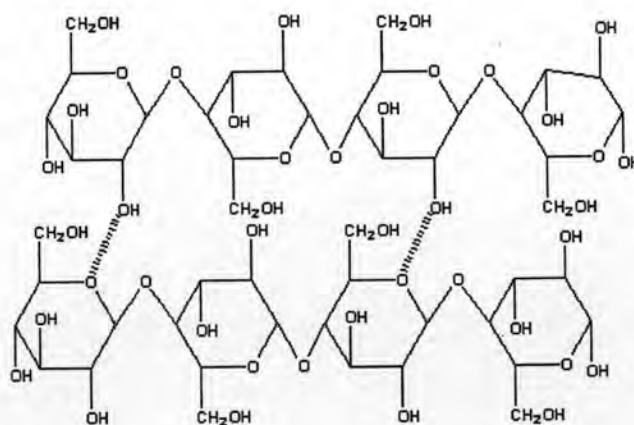
เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของดี-กลูโคส (D-glucose) ในรูปแบบตัวดี-กลูโคไพราโนส (β -D-glucopyranose) หลายโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่ แต่ละโมเลกุลจับกันด้วยพันธะ 1,4-ไกลโคซิดิก (1,4-glycosidic bond) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสโมเลกุลถัดไป

รูปแบบ (conformation) ของการจัดเรียงตัวของหน่วยดี-กลูโคสอยู่ในลักษณะเป็นรูปเก้าอี้ (chair form) แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวน (ring) ของโมเลกุลถัดไป และเชื่อมต่อบริเวณสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลดี-กลูโคสในอีกสายหนึ่ง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่มีแขนงย่อย มีสูตรเคมีทั่วไปคือ $-(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือจำนวนหน่วยของดี-กลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.3

ก)



ข)



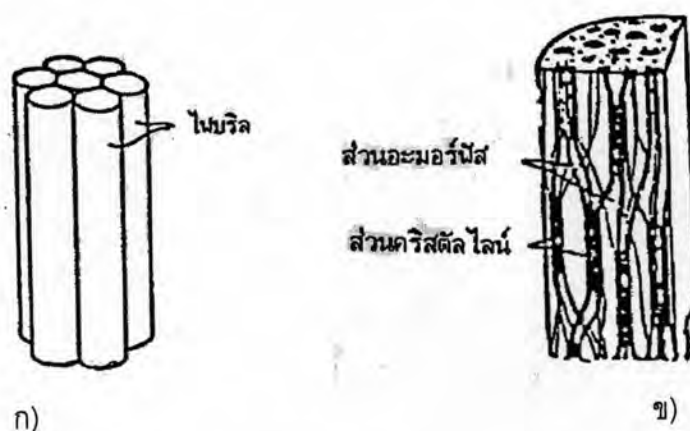
รูปที่ 2.3 ก) สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส

ข) ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส

(<http://www.sciencecollege.co.uk/SC/biochemicals/cellulose.jpg>)

หน่วยย่อยของ ดี-กลูโคส ต่อ 1 โมเลกุลเซลลูโลส (degree of polymerization) จะมีตั้งแต่ 15 หน่วยจนถึง 14,000 หน่วย น้ำหนักโมเลกุลมีค่า 50,000 – 2,500,000 ดาลตัน (น้ำหนักโมเลกุลของกลูโคสเท่ากับ 180.16 ดาลตัน) ความยาวของหน่วยย่อย ดี-กลูโคส 0.515 นาโนเมตร และความยาวทั้งหมดของโมเลกุลเซลลูโลสมีค่ามากกว่า 5 ไมโครเมตร

จากการจัดเรียงตัวเหล่านี้ทำให้สายเซลลูโลสเรียงตัวขนานซึ่งกันและกันอย่างมีระเบียบ ในลักษณะที่เรียกว่า คริสตัลไลน์ไมเซล (crystalline micelles) โดยแต่ละไมเซลประกอบด้วยโมเลกุลเซลลูโลสประมาณ 100 โมเลกุล มีรูปร่างเป็นแถบหนา ไมเซลประมาณ 10-20 ไมเซลจะมาเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ก. กลุ่มไมโครไฟบริลที่เรียงตัวขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

ข. ภาพตัดตามยาวของไมโครไฟบริล (Nisizawa และ Kayutosi, 1973 อ้างถึงในปราณี สติรพิพัฒน์กุล, 2532)

2.1.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

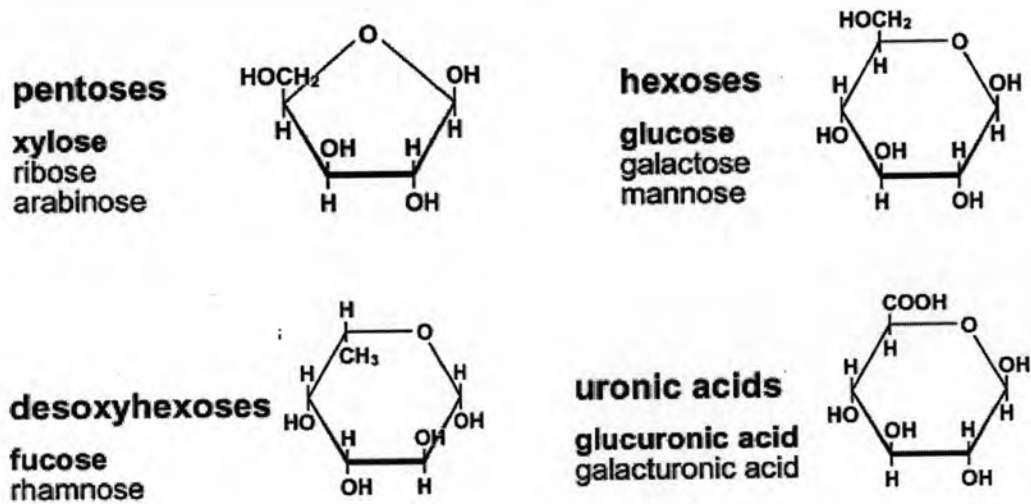
เฮมิเซลลูโลสเป็นอินทรีย์สารที่พบมากเป็นอันดับสองรองมาจากเซลลูโลส มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดี-ไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (xylose) หลากๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ เบต้า-1,4-ไกลโคซิดิก (ระวีวรรณ, 2538; Ross, 1950)

สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (heterogenous) ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 คือ

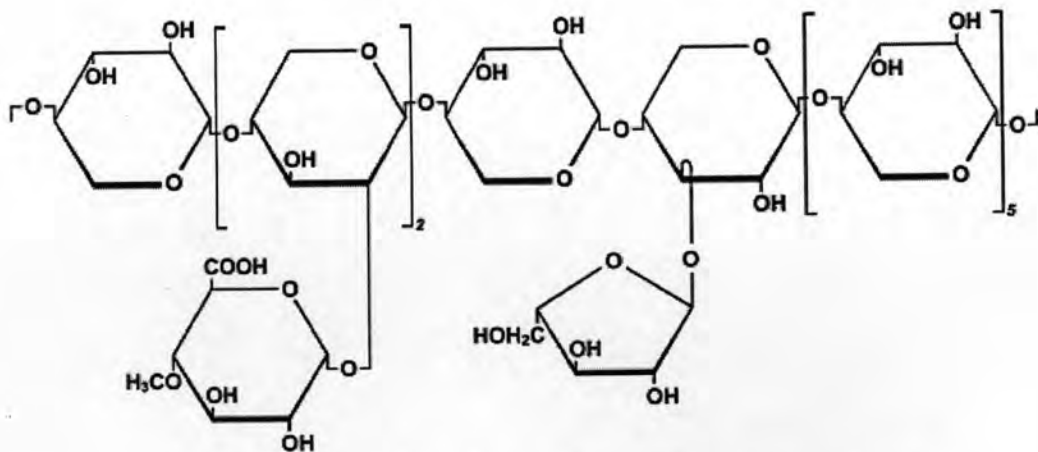
ก. เพนโตแซน (pentosan) ส่วนใหญ่เป็นไซแลน และอะราแบน (araban) เมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโลสและอะราบิโนส (arabinose) ไซแลนเป็นสารที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าสารอื่น

ข. เฮกโซแซน (hexosan) ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน (mannan) กาแลคแทน (galactan) และกลูแคน (glucan) เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแลคโตส (galactose) และกลูโคส ตามลำดับ

ค. พอลิยูโรไนด์ (polyuronides) ส่วนมากเป็นสารประกอบของกรดพอลิยูโรนิก (polyuronic acid) และยังพบกรดยูโรนิก (uronic acid) ปนอยู่ด้วย



รูปที่ 2.5 หน่วยย่อยของเฮมิเซลลูโลส (Knabner, 2002)



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Knabner, 2002)

ข้อแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจาง สามารถละลายได้ในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 นอกจากนี้สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขามากกว่า สามารถดูดซับน้ำได้ดี และมีความยาวของสายพอลิเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส (TAPPI, 2000-2001) มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$

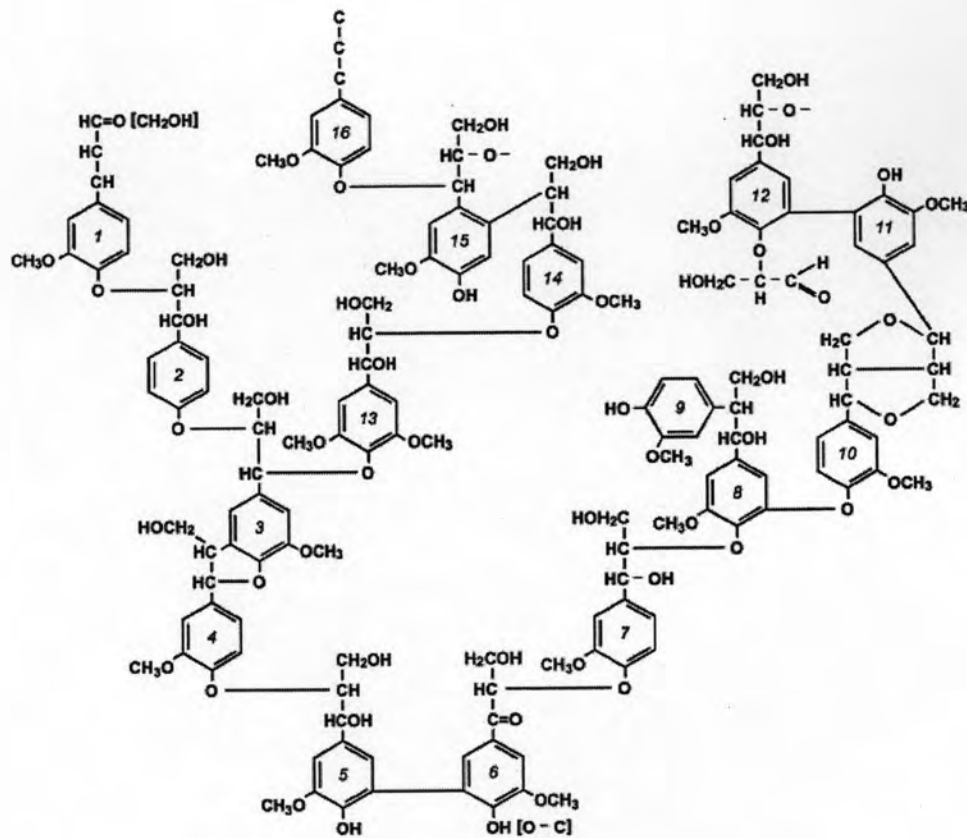
2.1.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติกเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบได้ในผนังเซลล์ของพืช รองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของไม้ ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด

โครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน คือ phenylpropane (C_6-C_3) มีสูตรโมเลกุล คือ $C_9H_{7.95}O_{2.4}(OCH_3)_{0.92}$ มีมวลโมเลกุล ประมาณ 184 ต่อหนึ่งมอนอเมอร์ (Othmer, 1981) โดยสามารถแบ่งหน่วยย่อยของลิกนินได้ 3 ชนิด ได้แก่ p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol และ sinapyl alcohol ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (Winkelemenn, 1992) โดยการจัดเรียงตัวกันของธาตุในโครงสร้างของโมเลกุลนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะแบบเดี่ยวแต่จะเกาะกันเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบ มีส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนของโครงสร้างอะโรมาติก (aromatic structure) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซี (methoxy group, $-OCH_3$) เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 14 หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, $-OH$) และมีหมู่ฟีนอลิก (phenolic group) เป็นส่วนประกอบด้วย (สมศักดิ์, 2528) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของลิกนินนั้นแสดงในรูปที่ 2.8 ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติด้านการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน



รูปที่ 2.7 หน่วยย่อยของลิกนิน (Davin and Lewis, 2000)



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน (Adler, 1977)

2.1.4 ส่วนประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

1. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตจากการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (volatiles matter) และ คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สารระเหย คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่

ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่

3. ขี้เถ้า (Ash)

ขี้เถ้าคือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร

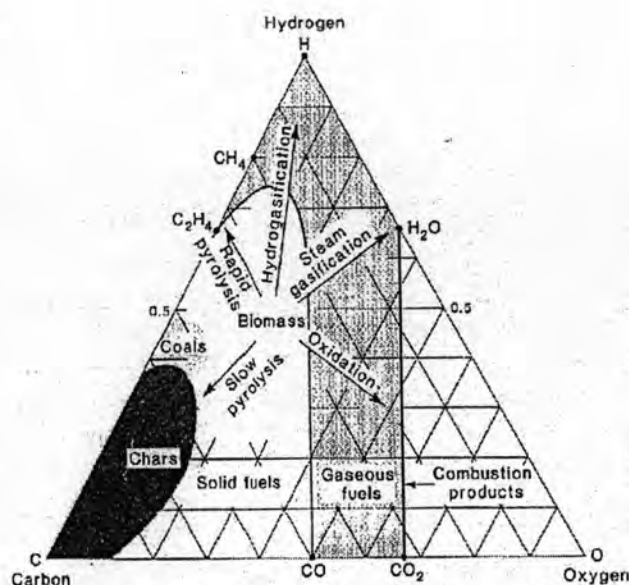
2.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูป 2 เทคโนโลยีหลัก คือ

- กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (biochemical conversion process) เช่น การหมัก (fermentation) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion)
- กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (thermochemical conversion process) สามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) กระบวนการแกซิเคชัน (gasification) และกระบวนการเผาไหม้ (combustion)

ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีความหลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

นอกจากนี้ในเนื้อไม้ถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyse) ส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสได้ทั้งหมด และส่วนที่เป็นเซลลูโลสได้เพียงหนึ่งในสี่ไปเป็นน้ำตาล แต่เซลลูโลสส่วนที่เหลือกับลิกนินจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น อาจใช้วิธีการสกัดลิกนินออกก่อนแล้วจึงย่อยส่วนของเซลลูโลส แต่วิธีนี้แพงและไม่นิยมใช้ ดังนั้นจึงไม่ค่อยใช้วิธีการแปรรูปชีวมวลทางชีวเคมีกับไม้ แต่จะใช้วิธีเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนแทน โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แสดงดังกราฟสามเหลี่ยมรูป 2.9



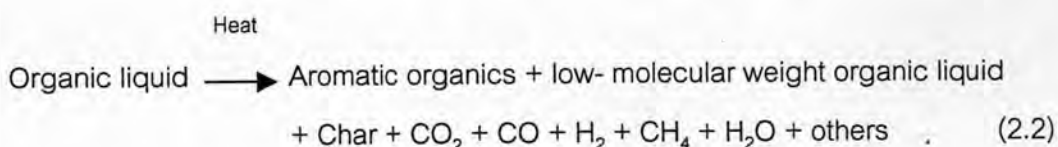
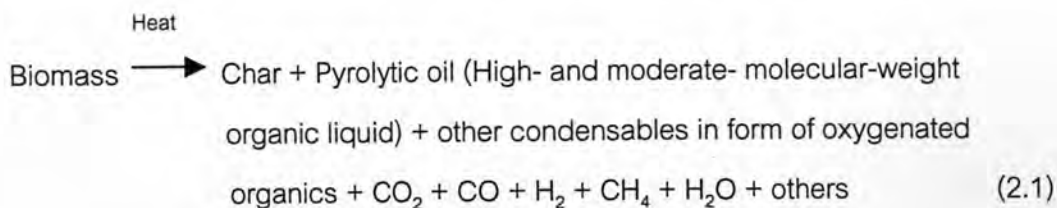
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล (Probstien and Hick, 1985)

2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลาย (destructive distillation) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (thermal degradation) ที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ไม่มีการเติมไอน้ำ ไฮโดรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์) ที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งคือชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้ ทาร์และแก๊ส (Jones, 1978)

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงซึ่งได้จากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ และทางอ้อม (รีทอร์ท) ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Kohan and Barkordor, 1979)

เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และชาร์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



การไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และแบบเร็ว (fast pyrolysis) การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอ ที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ในกรณีนี้ปริมาณและการกระจายของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับแนวของอุณหภูมิเดิม (Temperature history) ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงการให้ความร้อน แต่การไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ของช่วงอุณหภูมิสุดท้าย

2.3.1 กลไกการเกิดไพโรไลซิส

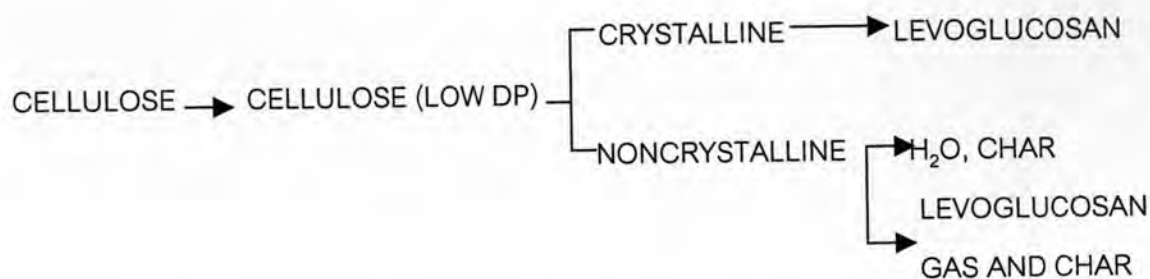
การไพโรไลซิสสามารถเข้าใจได้โดยศึกษาพฤติกรรมขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ภายใน ได้แก่ พอลิเมอร์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน นอกจากนี้อาจศึกษาถึงสารต่าง ๆ ที่แยกได้จากปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรคาร์บอน ทาร์ แก๊ส เป็นต้น ส่วนการกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ สามารถควบคุมได้ถ้าทราบถึงกลไกและจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา

2.3.1.1 เซลลูโลส

จากการศึกษาพบว่า กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ คือ

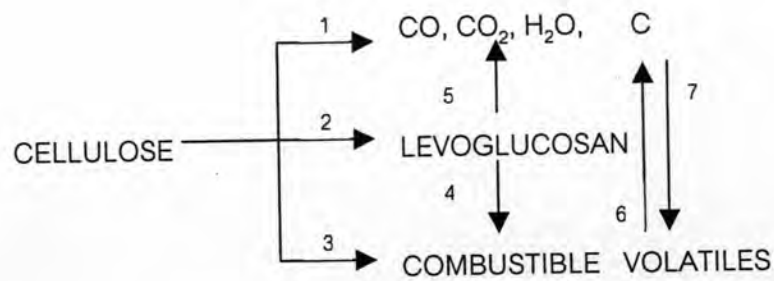
ช่วงอุณหภูมิต่ำ (<250 องศาเซลเซียส) ในช่วงเริ่มต้นของการไพโรไลซิสจะมีการแตกพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ทำให้อัตราการพอลิเมอร์เชนลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1000 หน่วยมาคงที่ประมาณ 200 หน่วยในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กัน (unzipping) ซึ่งในโครงสร้างรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวงเลวอกูโคซาน

ส่วนในโครงสร้าง อัดแน่นจะมีการแตกของสายเซลลูโลส ที่เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจน จากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง สายของพอลิเมอร์ทั้งสองจะมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง (active site) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (cross link) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.10



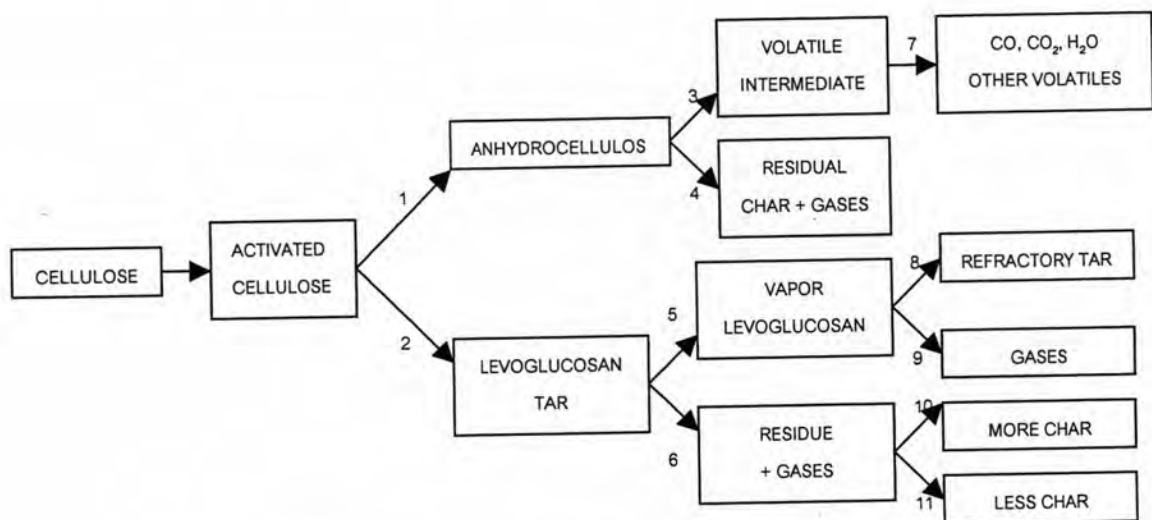
รูปที่ 2.10 กลไกไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (250-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดการแตกตัวของเซลลูโลสอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ และเกิดการสลายตัวแข่งกันของปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) กับการไล่น้ำออก (dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ตามปฏิกิริยาที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (intermediate) ทำให้เกิดการไล่น้ำออกและเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนปฏิกิริยาที่ 2 จะมีการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่างพันธะไกลโคซิดิก (transglucosylation) ทำให้เกิดเลโวกลูโคซาน (levoglucosan) ขึ้น โดยกลไกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 2 กลไกคือ กลไกแรกจะเป็นการแตกพันธะไกลโคซิดิกแบบโฮโมไลติก (homolytically) และเกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันตามกลไกของอนุมูลอิสระ (free radical) กลไกที่สองจะมีการแตกพันธะแบบเฮเทอโรไลติก (heterolytically) และเกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันของผลิตภัณฑ์ขั้นกลางของคาร์บอนเนียมอิออน (carbonium ion) ในปฏิกิริยาที่ 3 เป็นการเกิดฟิชชัน (fission) และการไม่เป็นสัดส่วนกัน (disproportionation) ปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมากต่อปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาให้ความร้อน บรรยากาศแวดล้อม (ออกซิเจน น้ำ แก๊สเฉื่อย ตัวทำปฏิกิริยาอื่นๆ) องค์ประกอบ และธรรมชาติทางกายภาพของชีวมวล



รูปที่ 2.11 กลไกไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิปานกลาง (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) กลไกการเกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงเป็นไปตามรูปที่ 2.12 ซึ่งเมื่อความดันสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 6 ได้ชาร์ ในขณะที่การเกิดสารระเหยได้ผ่านปฏิกิริยาที่ 3 และ 5 จะต้องใช้ความดันต่ำลง



รูปที่ 2.12 กลไกไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง (Antal, 1982)

2.3.1.2 เฮมิเซลลูโลส

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สมากกว่า และน้ำมันหรือน้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารที่สามารถควบแน่นได้จะพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน เริ่มจากการดิพอลิเมอร์เซชันไปเป็นพวกที่ละลายน้ำได้ แล้วตามด้วยการสลายตัวไปเป็นสารระเหยได้

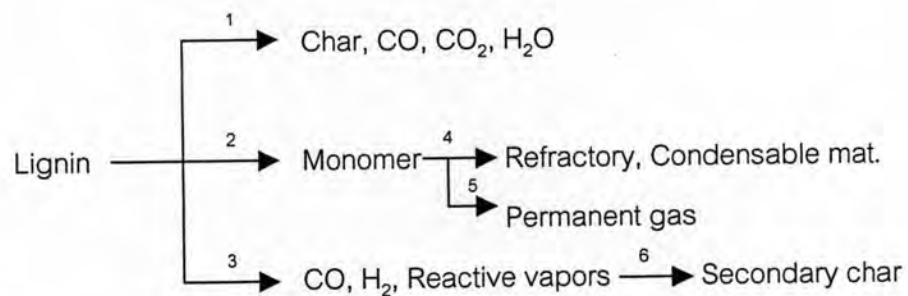
โดยในช่วงแรกจะมีการแตกสลายพันธะระหว่าง คาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน (pentosan) ที่จะนำไปสู่การเกิดกรดอะซิติก ฟอรั่มัลดีไฮด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อาจมีผลกระทบต่อการใช้ไฟโรไลซิสของเซลลูโลสและลิกนิน

2.3.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่าง ๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งชนิดของชีวมวลและภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก โครงสร้างของปฏิกิริยาเหล่านี้จะคล้ายกับการเกิดไฟโรไลซิสของเซลลูโลส

ช่วงอุณหภูมิต่ำ (< 240 องศาเซลเซียส) จะเกิดปฏิกิริยาการไล่น้ำออกตามปฏิกิริยาที่ 1 แล้วเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล ทำให้ได้ถ่านชาร์และแก๊สมากขึ้น

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (240-500 องศาเซลเซียส) จะเกิดลิกนินโมโนเมอร์ขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 โดยที่อัตราการให้ความร้อนสูงและความดันต่ำจะทำให้เกิดโมโนเมอร์ของลิกนินได้ดี



รูปที่ 2.13 กลไกไฟโรไลซิสของลิกนิน (Antal, 1982)

ช่วงอุณหภูมิสูง (> 500 องศาเซลเซียส) แบ่งการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 2 พวกคือ โมโนเมอร์ต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ 2 จะเริ่มมีการแตกตัวในวัฏภาคไอและเกิดการไฟโรไลซิสตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 การควบแน่นของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำตามปฏิกิริยาที่ 4 จะได้วัสดุทนไฟและสารที่ควบแน่นได้ขึ้น ในขณะที่การแครกกิง (cracking) ของวัฏภาคไอที่อุณหภูมิสูงกว่าตามปฏิกิริยาที่ 5 จะได้พวกแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เมื่อถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะเกิดปฏิกิริยาที่ 3 และ 6 และเมื่อเกิดการควบแน่นของสารที่เหลืออยู่ในไอในภาวะอึดอัดยิ่งยวดจะเกิดชาร์ขึ้น ซึ่งการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวตามปฏิกิริยาที่ 3 และได้แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณที่สูง

2.3.2 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการไฟโรไลซิส

การไฟโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อ การไฟโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้ (ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์, 2536)

2.3.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่าง ๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีการแตกตัวของพอลิแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของแอนไฮโดรซูการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และคาร์บอนจำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นชาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน

ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณชาร์ และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ได้จากการไฟโรไลซิสโดยตรง

2.3.2.2 อุณหภูมิในการไฟโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไฟโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไฟโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300 – 500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปลดปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สาม อุณหภูมิระหว่าง 500 – 800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของชาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

ได้มีการศึกษาอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสไม้ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เริ่มเกิดกระบวนการไฟโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไม้เปลี่ยนเป็นสารระเหยได้ร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 82 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาการไฟโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและ

องค์ประกอบของสารระเหยได้ คือ เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดซาร์จะลดลง (Maniatis, 1988)

นอกจากนี้จากการศึกษาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้นและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์จากปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิมากขึ้น เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ในปริมาณมากขึ้นส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นจะลดลง ทำให้ปริมาณทาร์และซาร์ที่ได้น้อยลงและมีการสะสมของคาร์บอน โดยการแตกตัวของสารระเหยบนพื้นผิวซาร์ที่ร้อน โดยปริมาณซาร์ไม่เกิดขึ้นมากในปฏิกิริยาขั้นต้น และแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรกโดยไม่ผ่านทาร์ (Xianwen, 2000) นอกจากนี้ขั้นแรกสารระเหยได้ออกมามีปริมาณไม่มาก และแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของคาร์บอน หลังจากนั้นขั้นที่สองจึงเกิดดีแก๊สซิฟิเคชัน จึงปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นโดยส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งมีผลต่อเนื่องกับการเปลี่ยนรูปไปเป็นถ่านซาร์ต่อไป

2.3.2.3 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด และโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า $10^3 - 10^5$ องศาเซลเซียสต่อวินาที

ในการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส ถ้าอัตราการให้ความร้อนเร็วทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ได้ถ่านซาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส และของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น (Zanzi et al., 1996) และโมเลกุลของน้ำมันทาร์ที่อยู่ในสภาวะแก๊สมีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมาก ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายซึ่งไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิและเวลาในการเกิดการแตกตัวของทาร์น้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์ จึงได้ทาร์ มีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละ

ชนิดไม่แตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราให้ความร้อนอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง (Tanaka et al., 1997)

นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสในการเกิดถ่านชาร์ของชีวมวลมากกว่าถ่านหิน (Maniatis, 1988) เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสของเซลลูโลส โดยจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเซลลูโลส และเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความอยู่ตัวมากขึ้น และให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อย อัตราการให้ความร้อนก็จะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะน้อยมาก

2.3.2.4 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความสัมพันธ์กับอัตราการให้ความร้อน กล่าวคือ การให้ความร้อนแก่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะเป็นไปได้ช้า ในขณะที่การให้ความร้อนแก่อนุภาคขนาดเล็กจะเป็นไปได้เร็วกว่า ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคขนาดใหญ่จะต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ได้จากอนุภาคขนาดใหญ่น้อยกว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กได้รับความร้อนกระจายทั่วถึงและสม่ำเสมอกว่านั่นเอง

2.3.2.5 ความดัน (Pressure)

ความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ กล่าวคือ เมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยที่ได้มีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัว (cracking) จะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูง ซึ่งจะมีผลให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ้าให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สจะลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกของเหลวทาร์และถ่านเพิ่มมากขึ้น

2.3.2.6 ภาวะบรรยากาศ (atmosphere)

ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่า ไฮโดรไพโรไลซิส (hydropyrolysis) สามารถทำให้เพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

2.3.2.7 เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิส (pyrolysis time)

เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิสต้องนานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้อง ไพโรไลซิสน้อยเกินไป การเปลี่ยนแปลงวัตถุตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ก็จะทำได้ไม่สมบูรณ์ แต่หากเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องไพโรไลซิสมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านมีแนวโน้มค่าของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลง และผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยมีปริมาณน้อยลง

2.3.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไอน้ำของน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภท คือ (จักรชัย, 2541)

2.3.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้นเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2.3.3.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทิลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ $C_5 - C_6$ ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามคุณสมบัติที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ <200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิลเบนซิน ไชลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200–250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพริดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250–300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนนทาลีน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300–350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนพทีน
- พีทซ์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ >350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวก ไช(red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

2.3.3.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

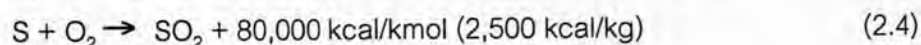
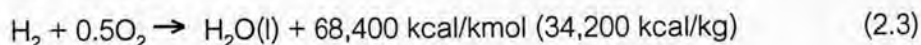
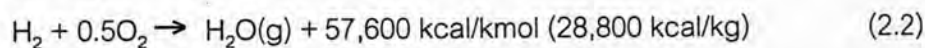
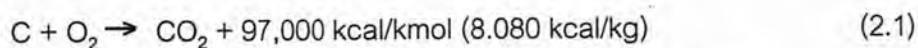
กระบวนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ชาร์จำนวนน้อยมาก

2.4 กระบวนการเผาไหม้

2.4.1 ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้ (combustion element) ของเชื้อเพลิง ส่วนประกอบที่เผาไหม้ได้คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และสารที่เหลือจากการเผาไหม้ ได้แก่ ไข้ดำ ออกซิเจน และไนโตรเจน

การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คือ การเผาไหม้ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วให้ปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อน (heating value) ของเชื้อเพลิง สมการพื้นฐานของการเผาไหม้มีดังต่อไปนี้



กระบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. เริ่มด้วยออกซิเจนจะสัมผัสกับผิวคาร์บอน
2. เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา
3. มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาที่ผิว
4. เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะถูกเร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงแข็งให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิง (volatile matter) ระเหยออกมาได้เร็วและช่วยให้เกิดการผสมกับอากาศดีขึ้น ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ซึ่งจะทำให้มีพื้นผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นว่าการออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง ควรให้มีพื้นผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น

เชื้อเพลิงแข็งมีสารประกอบที่เกิดการเผาไหม้แบ่งออกได้สองชนิดคือ ชนิดที่เป็นสารระเหย (volatile matter) เช่น น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และชนิดที่ไม่เป็นสารระเหย เช่น คาร์บอน สำหรับสารประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้ ได้แก่ ความชื้น และสารประกอบอนินทรีย์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊ส หลังจากเกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ แก๊สและของแข็ง สถานะแก๊สประกอบ

เชื้อเพลิงแข็งแตกต่างไปจากเชื้อเพลิงเหลวและแก๊ส หลังจากเกิดปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก มีสองสถานะคือ แก๊สและของแข็ง สถานะแก๊ส ประกอบด้วย CO , CO_2 , H_2 , O_2 , H_2O เมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิว (surface flux to volatile) ของอนุภาคน้อย ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สดังกล่าว เกิดการเผาไหม้แบบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแก๊สแต่ละชนิด ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมากจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดน้อยหรือไม่เกิด ฉะนั้นจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ในส่วนที่เป็นของแข็งจำพวกถ่าน จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้น เนื่องจากแก๊สที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่างๆเกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยาและมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (2.5) และสมการ



2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ (สมศักดิ์, 2524)

การเผาไหม้เกิดได้ดีต้องมีภาวะเหมาะสม นั่นคือ

- มีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ ในทางปฏิบัติต้องป้อนอากาศในปริมาณมากกว่าปริมาณที่ต้องการทางทฤษฎี (ปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์) อากาศที่ต้องการตามทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ ปรากฏการณ์ที่เห็นได้ชัดของการสันดาปไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนในไอเสีย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอสำหรับการสันดาปที่สมบูรณ์ กล่าวคือในการเผาไหม้เพื่อที่จะให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศขึ้นจนเพียงพอ ซึ่งจะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงสูงกว่าอัตราส่วนตามทฤษฎี อากาศที่เกินจากที่ต้องการนั้นเรียกว่าอากาศมากเกินพอ คำนวณได้จาก

$$\% \text{ excess air} = \frac{(\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง} - \text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}) \times 100}{\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี}}$$

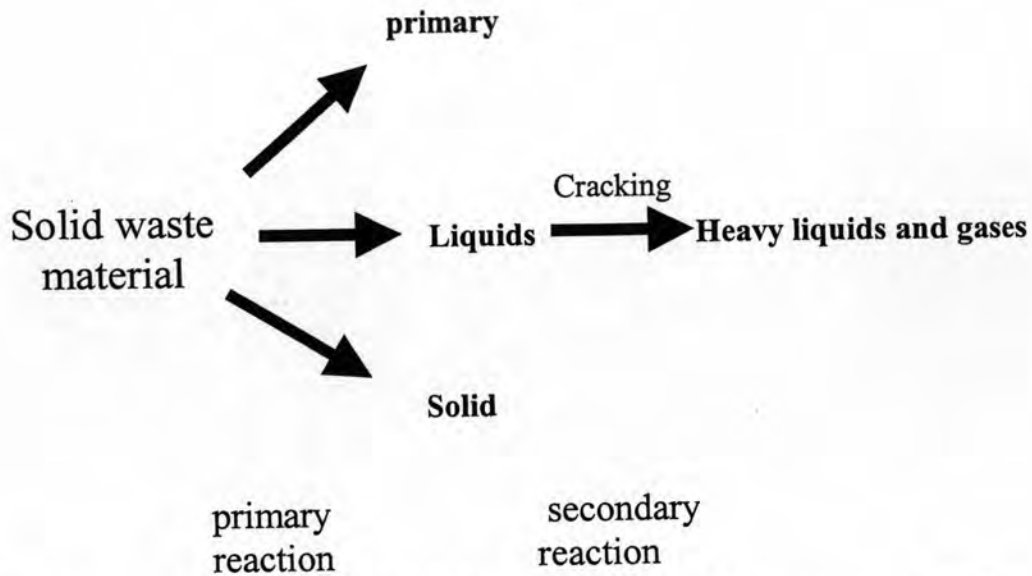
- อุณหภูมิที่สูงพอต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้เชื้อเพลิง หรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นจะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดช้าในตอนแรก และเกิดต่อไป

ปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเริ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมามากขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงพอจนเกิดการเผาไหม้แบบต่อเนื่องได้เอง โดยปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้มีอุณหภูมิสูงได้มากน้อยแค่ไหนนั้น มีข้อจำกัดที่สำคัญคือชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยหากอุณหภูมิสูงเกินไป อาจจะทำให้เกิดข้อเสียได้ คือ ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) หรืออาจทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นซิลิไซด์ (Slag) เกาะติดที่ผนังที่เป็นเหล็กที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

- เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาควรจะนานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ให้ได้มากที่สุด แต่การที่ต้องการให้ผลสมบูรณ์คือเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จนหมดนั้นย่อมเป็นไปได้ยาก เพราะต้องใช้เวลานาน และทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นด้วย เพราะต้องใช้เตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูงและขนาดใหญ่มาก หรืออาจจะต้องระบบไหลเวียนของเชื้อเพลิงกลับมาใหม่

2.5 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิส

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชีวมวลเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนประกอบด้วยปฏิกิริยาพร้อมๆ กันตามกันมา ซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย โดยที่ผ่านมามีผู้ทำการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในหลายๆ วิธี และได้ค้นพบว่าเมื่อของเสียที่เป็นของแข็ง ผ่านการให้ความร้อนจะเกิดสารระเหยขั้นต้นก่อน (primary vapor) และถ้าได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานพอที่จะเกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิ ได้เป็นน้ำมันทาร์และแก๊สต่อไป โดยการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดตัวกลางที่เป็นของเหลว ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาแตกหักไปเป็นแก๊สที่มีมวลโมเลกุลใหญ่ ซึ่งแผนภูมิกลไก การไพโรไลซิสของเสียที่เป็นของแข็งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภูมิกลไกกระบวนการไพโรไลซิสของเสียที่เป็นของแข็ง (Kawser et al., 2000)

2.5.1 แบบจำลองปฏิกิริยาเดียว (Single-Reaction Model) (Martin, 1981)

กระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายและมีปรากฏการณ์การถ่ายโอนที่ซับซ้อนซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้ถูกต้องแม่นยำนัก ดังนั้นผู้ทำการวิจัยส่วนใหญ่จึงตั้งสมมติฐานว่า กระบวนการทั้งหมดเป็นการย่อยสลายแบบอันดับหนึ่งที่เกิดขึ้นในรูปแบบเดียวกันตลอดทั้งอนุภาค แสดงอัตราเร็วการไพโรไลซิสได้ดังนี้

$$dV/dt = k(V^* - V) \quad (2.9)$$

หรือ

$$dw/dt = -k(w_0 - w_f) \quad (2.10)$$

$$V = (w_0 - w) / w_0 \quad (2.11)$$

$$V^* = (w_0 - w_f) / w_0 \quad (2.12)$$

V คือ ปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆ ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำหนักเริ่มต้นที่เปลี่ยนไปกับเวลา ส่วน k คือ ค่าคงที่อัตราเร็ว V^* คือปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นทั้งหมด w_0 คือน้ำหนักเริ่มต้น w คือน้ำหนักที่เวลาใดๆ และ w_f คือน้ำหนักสุดท้าย โดยค่า

คงที่อัตราเร็วสัมพันธ์กับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ Arrhenius

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (2.13)$$

k_0 คือ ปัจจัยความถี่ E คือ พลังงานกระตุ้น R คือ ค่าคงที่แก๊ส และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอัตราเร็วของกระบวนการไพโรไลซิส และอันดับของปฏิกิริยามีค่าต่างกันแต่ละช่วงอุณหภูมิ ซึ่งเนื่องมาจากชนิดของถ่านหิน รวมทั้งชนิดของเครื่องมือที่ใช้และวิธีที่ใช้ในการทดลองด้วย

มีผู้ทำการวิจัยจำนวนมากโต้แย้งว่าแบบจำลองแบบปฏิกิริยาเดี่ยวอันดับหนึ่งอย่างง่ายไม่เพียงพอที่จะอธิบายกระบวนการไพโรไลซิสที่ซับซ้อนได้ โดยข้อมูลเกี่ยวกับสารระเหย และค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์มีความสอดคล้องต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ซึ่งอาจเป็นเพราะการถ่ายโอนมวลและความร้อน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอนุภาคนี้

2.5.2 แบบจำลองหลายปฏิกิริยา (Multiple-Reaction Model) (Elliott, 1981)

เนื่องจากปฏิกิริยาแบบเดี่ยว ไม่สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้ จึงมีผู้เสนอว่าปฏิกิริยาไพโรไลซิสเกิดขึ้นที่ละปฏิกิริยาในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

$$dV_i / dt = k_i (V_{i^*} - V_i) \quad (2.14)$$

ดังนั้นตัวห้อย i แสดงปฏิกิริยาเฉพาะหนึ่งปฏิกิริยาและทำการอินทิเกรตสมการข้างต้นสำหรับสถานะที่อุณหภูมิคงที่เพื่อหาปริมาณสารระเหยในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ

$$V_{i^*} - V_i = V_{i^*} \exp(-kt \exp(-E/RT))_i \quad (2.15)$$

ค่า k_0 , E , V_i ไม่สามารถหาได้จากการทำนาย และต้องตั้งสมมติฐานว่า $k_{0i} = k_0$ สำหรับทุกปฏิกิริยา ดังนั้นเนื่องจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นจำนวนมาก จึงสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นจากฟังก์ชันการกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง $f(E)$ โดย $\int f(E)dE$ แทนอัตราส่วนของสารระเหยทั้งหมด (v^*)

$$dV^* = V^* f(E)dE \quad (2.16)$$

$$\int f(E)dE = 1 \quad (2.17)$$

ปริมาณสารระเหยทั้งหมดได้รับการคิดรวมในทุกๆ ปฏิกิริยา หรือโดยการอินทิเกรตสมการตลอดค่า E ทั้งหมดจะได้

$$1 - V/V^* = \int \exp[-k_0 t \exp(-E/RT)] f(E) dE \quad (2.18)$$

2.5.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ด้วยแบบจำลอง DEAM (Distribution Activation Energy Model)

เนื่องจากในกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สหลายชนิด ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นปฏิริยาน่าจะประกอบด้วย ปฏิริยาอันดับหนึ่งที่ผันกลับไม่ได้แบบขนานจำนวนมาก จึงได้ทำการเสนอแบบจำลอง DEAM เป็นโมเดลอย่างง่าย (Miura, 1995) โดยโมเดลนี้ตั้งสมมติฐานว่า มีปฏิริยาผันกลับไม่ได้จำนวนมากของปฏิริยาอันดับหนึ่งแบบขนานที่ซึ่งมีค่าคงที่อัตราเร็วต่างกัน เพื่อที่จะค่า $f(E)$ (distribution curve of activation, E_a) โดยเสนอความแตกต่างของ E_a ของแต่ละปฏิริยาและ $k_0(E)$ ที่สัมพันธ์กับ E ดังนี้

$$1 - v/v^* = \int \exp(-k \int e^{-E/RT} dt) f(E) \quad (2.19)$$

$$\int f(E) dE = 1 \quad (2.20)$$

$$\Phi(E, T) = \exp(-k_0 \int e^{-E/RT} dt) = \exp[-(k_0/a) \int e^{-E/RT} dT] \quad (2.21)$$

$$\Phi(E, T) = \exp[-(k_0 RT^2 / aE) e^{-E/RT}] \quad (2.22)$$

$$dV/dT = d(\Delta v)/dt = k_0 e^{-E/RT} (\Delta v^* - \Delta v) \quad (2.23)$$

$$1 - (\Delta v^* - \Delta v) = \exp(-k_0 \int e^{-E/RT} dt) = \exp[-(k_0 RT^2 / aE) e^{-E/RT}] \quad (2.24)$$

จากสมการข้างต้น มาจัดรูปใหม่จะได้

$$\ln[(\Delta v^* - \Delta v) dt] = \ln[k_0 [(\Delta v^* - \Delta v)(1 - (\Delta v^* - \Delta v)) - E/R(1/T)] \quad (2.25)$$

$$\ln(a/T^2) = \ln(k_0 R/E) - \ln[-\ln(1 - (\Delta v^* - \Delta v))] - E/R(1/T) \quad (2.26)$$

ให้ $[-\ln(1 - (\Delta v^* - \Delta v))] = \Phi(E, T) = 0.58$ จะได้

$$\ln(a/T^2) = \ln(k_0 R/E) + 0.6075 - E/R(1/T) \quad (2.27)$$

โดย T คือ อุณหภูมิ (K), a คือ อัตราให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), E คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol) และ k_0 คือ frequency factor หรือ pre-exponential factor

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gani และ Naruse (2007) ศึกษาลักษณะพื้นฐานของกระบวนการไพโรไลซิสและเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลชนิดต่างๆ โดยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetric และศึกษาองค์ประกอบหลักในชีวมวลได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส และลิกนิน โดยการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี จุดประสงค์ในการวิจัยคือนำผลขององค์ประกอบหลักที่ได้จากการทดลองในตัวอย่างชีวมวลหลายชนิดที่เลือกนำมาวิเคราะห์ มาเปรียบเทียบกับ ชีวมวลจากการสังเคราะห์ (simulate biomass) ซึ่งเตรียมจากการผสมของเซลลูโลสกับลิกนินที่เป็นสารเคมี (cellulose chemical, lignin chemical) ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาสังเกตได้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM จากการทดลองในตัวอย่างชีวมวลที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่าองค์ประกอบหลักในชีวมวลประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนิน โดยมีปริมาณของเซลลูโลสมากกว่าปริมาณของลิกนิน ปฏิกิริยาในการเผาไหม้ของตัวอย่างชีวมวลเกิดขึ้นสองขั้นตอน ขั้นแรกขึ้นกับ devolatilization ขั้นที่สองขึ้นกับ char combustion ในขั้นแรกพบว่าปริมาณน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็วโดยเกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส ในขั้นที่สองการสลายตัวของลิกนินในกระบวนการไพโรไลซิส และมีการเผาไหม้ของซาร์ในกระบวนการเผาไหม้ สำหรับชีวมวลที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราการเกิดไพโรไลซิสจะเร็วกว่า ในขณะที่ชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินสูงอัตราการเกิดไพโรไลซิสจะเกิดช้ากว่า ดังนั้นปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในชีวมวลเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการประเมินค่าของพฤติกรรมทางไพโรไลซิส และในพฤติกรรมการเผาไหม้ของตัวอย่างชีวมวลขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซาร์ที่เกิดขึ้น

Heikkinen และคณะ (2004) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสโดยเทคนิควิเคราะห์ด้วย thermogravimetric ขององค์ประกอบแต่ละชนิดในของเหลือทิ้งและของเหลือทิ้งผสม (waste mixture) โดยสนใจการวัดน้ำหนักที่หายไป (weight loss) จากการเผาไหม้ องค์ประกอบของของเหลือทิ้งแยกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ low stability organic, lignocellulosic และพลาสติก การคำนวณองค์ประกอบที่ยังไม่รู้ของของเหลือทิ้งผสมโดยการสมมติ เส้นแนวโน้มการสลายตัวด้วยความร้อนของของผสม จะได้ผลรวมขององค์ประกอบเดี่ยว (single component) งานวิจัยนี้พิสูจน์ว่าวิธีการรวมน้ำหนักสามารถบ่งบอกองค์ประกอบของสารผสมได้ โดยวิธีคำนวณองค์ประกอบที่ยังไม่รู้ของส่วนเหลือทิ้งผสมโดยใช้วิธีการรวมน้ำหนัก (weight sum method, WSM) นี้จะสังเกตลักษณะการสลายตัวของสารระเหยของของเหลือทิ้งผสมที่เกิดจากการรวมของส่วนเหลือทิ้งเดี่ยว (single constituent) การประเมินค่าการคำนวณองค์ประกอบทำได้โดยวัดและคำนวณค่าความร้อนของของผสมมาเปรียบเทียบ สามารถทดสอบได้จากการคำนวณองค์ประกอบของของผสมที่มีตำแหน่งและความสูงของ single component ในกราฟ DTG ที่เปลี่ยนไป การแสดงผลการเปลี่ยนแปลงความสูงของกราฟมีผลต่อการคำนวณองค์ประกอบตรงอุณหภูมิของกราฟด้วย

Wang และคณะ (2008) ศึกษาพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสของซีลี้อย และ 3 องค์ประกอบหลักทางเคมีในซีลิวอล (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน) ทำการศึกษาโดยใช้ thermogravimetric analysis ภายใต้ แก๊สสังเคราะห์ และไฮโดรเจน โดยได้ศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อน (heating rate) ที่แตกต่างกันได้แก่ 5, 10, 15 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ต่อพฤติกรรมของการสลายตัวด้วยความร้อน ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาได้แก่ ซีลี้อย และซีลิวอลสังเคราะห์ (การผสมองค์ประกอบทางเคมีทั้งสามที่อัตราส่วนต่าง ๆ) นอกจากนี้มีการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในกระบวนการไพโรไลซิสในรูปแบบของ distributed activation energy model (DAEM) จากการศึกษาพบว่าแก๊สสังเคราะห์สามารถแทนที่ไฮโดรเจนในกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิส (hydropyrolysis) ของซีลิวอลสำหรับองค์ประกอบทางเคมีทั้งสาม และการสลายตัวด้วยความร้อนขององค์ประกอบทั้งสามพบว่า เฮมิเซลลูโลสง่ายต่อการสลายตัวด้วยความร้อนที่สุด รองลงมาคือ เซลลูโลส แต่ ลิกนินยากต่อการสลายตัวด้วยความร้อนที่สุด

ส่วนกรณีของอัตราการให้ความร้อน ไม่เพียงแต่จะมีผลต่ออุณหภูมิของน้ำหนักที่หายไปเท่านั้น แต่ยังมีผลต่ออัตราการสลายตัวที่ตำแหน่งสูงสุดด้วย นอกจากนี้พบว่าลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ใช้ในการทดลองนี้มีผลต่อพฤติกรรมของการสลายตัวของเซลลูโลส แต่ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสไม่มีผลต่อกัน สำหรับค่า k_0 (frequency factor) มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างของค่าพลังงานกระตุ้น E_a (activated energy) และค่า E_a ของซีลี้อยอยู่ในช่วง 161.9 – 202.3 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งเป็นช่วงของค่า E_a ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

Worasuwannark และคณะ (2007) และคณะศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อน ในกระบวนการไพโรไลซิสของฟางข้าว แกลบและขังข้าวโพด โดยใช้เทคนิค thermogravimetric-mass spectrometry โดยพิจารณาการเกิดแก๊สในกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าการลดลงของน้ำหนักและอัตราการเกิดแก๊สเป็นตัวบ่งบอกความแตกต่างระหว่างตัวอย่างชีวมวลแต่ละชนิด แม้ว่าจะมีองค์ประกอบธาตุในตัวอย่างแต่ละชนิดนั้นเหมือนกัน จากการทดลองพบว่าน้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากทุกตัวอย่างที่ทดสอบ ส่วนความแตกต่างของอัตราการเกิดแก๊ส พบว่าเกิดเนื่องจากความแตกต่างของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีความสำคัญในการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน ในตัวอย่างชีวมวลที่เลือกมาศึกษาพบว่าฟางข้าวมีการเกิดน้ำมากที่สุด และมีทาร์น้อยที่สุดในขณะที่ขังข้าวโพดมีการเกิดทาร์มากที่สุด ในการเกิดน้ำจำนวนมากของฟางข้าวเนื่องมาจากฟางข้าวมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูง โดยอันตรกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับลิกนิน จะทำให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ลดลงแต่ทาร์มากขึ้น จากข้อมูลของการเกิดแก๊ส และวิเคราะห์ FTIR ของชาร์สรุปได้ว่าการระงับการเกิดทาร์ระหว่างไพโรไลซิสชีวมวล มาจากการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (cross-linking reactions) ระหว่างลิกนินกับเซลลูโลสในรูปของน้ำและหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ (ester group) ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส

Yang และคณะ (2006) ศึกษาความแตกต่างของพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบหลักทางเคมีทั้งสาม (เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน) ในกระบวนการไพโรไลซิส โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลสามารถแบ่งได้ 4 ช่วงอุณหภูมิ ตามอุณหภูมิของแต่ต่อองค์ประกอบ ชีวมวลสังเคราะห์เตรียมจากสองหรือสามองค์ประกอบทางเคมีตามสัดส่วนต่างๆ กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลสังเคราะห์ขององค์ประกอบทั้งสามมีอันตรกิริยาระหว่างกันน้อยมาก และมีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปกับสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส (หรือเซลลูโลส) และปริมาณน้ำหนักที่เหลือที่อุณหภูมิเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบ นอกจากนี้สามารถสรุปสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงได้ 2 ส่วน สำหรับการทำนายสัดส่วนขององค์ประกอบในชีวมวลกับค่าน้ำหนักที่หายไปในการบวนการไพโรไลซิส นอกจากนี้มีการยืนยันผลของสมการการคำนวณ โดยผลการวิเคราะห์จากการทดลองโดยใช้ TGA ของสามองค์ประกอบในกากน้ำมันปาล์ม (palm oil waste) ซึ่งเป็นตัวแทนของชีวมวลที่สามารถพบได้ทั่วไป พบว่าผลจากการคำนวณของชีวมวลสังเคราะห์พ้องกับผลจากการทดลอง แม้ว่าผลจากการทำนายปริมาณลิกนินมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลอง และผลจากการทำนายปริมาณเซลลูโลสมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดลอง

Yang และคณะ (2007) ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของสามองค์ประกอบหลักในชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA), differential scanning calorimetry (DSC) และเบดแบบบรรจุ (pack bed) ตรวจวัดแก๊สที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากการวิเคราะห์ใน TGA ด้วย Fourier transform infrared (FTIR) พบว่าการสลายตัวทางความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสของ เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการสูญเสียน้ำหนักส่วนใหญ่ในช่วงอุณหภูมิ 220-315 องศาเซลเซียส และ 315-400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนลิกนิน การสลายตัวจะเกิดยากกว่า โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเป็นช่วงอุณหภูมิกว้าง (160-900 องศาเซลเซียส) และเกิดของแข็งเป็นปริมาณมาก (ประมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก) การใช้พลังงานในกระบวนการไพโรไลซิสของเซลลูโลสต่างจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยช่วงแรกจะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แต่ช่วงหลังจะเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สหลักจากการไพโรไลซิสของ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน ได้แก่ CO_2 , CO , CH_4 และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ โดยการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน และปริมาณของแก๊สผลิตภัณฑ์ทั้งหมดวัดโดยการใช้ Micro-GC และเมื่อทำการไพโรไลซิสในเบดแบบบรรจุ พบว่า เฮมิเซลลูโลส จะให้ปริมาณ CO_2 สูง ส่วนเซลลูโลสจะให้ปริมาณของ CO สูง และลิกนินจะให้ปริมาณของ H_2 และ CH_4 สูง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นปัจจัยหลักที่จะบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพหรือพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวล แต่ในปัจจุบันยังมีการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทั้ง 3 นั้นน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ชีวมวลให้เกิดความคุ้มค่าที่สุดต่อการนำไปใช้ และสามารถทำนายลักษณะความสัมพันธ์ของชีวมวลชนิดอื่นๆ ได้ นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาได้สมมติว่า องค์ประกอบทางเคมีในชีวมวลแต่ละชนิดไม่มีอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างกัน ซึ่งในชีวมวลจริงอาจมีผลของอันตรกิริยานั้นเกิดขึ้นซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อน ในงานวิจัยนี้ จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ในการสลายตัวด้วยความร้อนขององค์ประกอบผสม