

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลมีความหมายรวมทั้งพืชที่ให้พลังงาน (Energy crops) ของเหลือจากฟาร์ม ภาคทางการเกษตร อุตสาหกรรม และของเสียชุมชน รวมทั้งของเสียจากสัตว์ในแง่ที่ใช้อาหารเป็นพืช ชีวมวลได้รวมไปถึงวัสดุซึ่งสามารถนำตัวมันไปเป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบ ประโยชน์ของชีวมวล อาจใช้เป็นทั้งแหล่งอาหารและแหล่งพลังงาน ชีวมวลมีความสำคัญมากในแง่ที่เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่รู้หมด และสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable energy resources) ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานเนื่องจากเป็นสารประกอบของ H, C และ O โดยสร้างจาก CO<sub>2</sub> และน้ำด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งคุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวลได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวอย่างชีวมวล (Probstein และ Hicks, 1982)

ปริมาณ	ไม้ (Wood)	เมล็ดข้าว (Grain)	ขยะ (Multiple solid waste)	ของเสียจากสัตว์ (Animal waste, Manure)
คาร์บอน	50-53	45.0	47.60	3.51
ไฮโดรเจน	5.8-5.7	5.8	6.0	5.3
ไนโตรเจน	0-0.3	2.4	1.20	2.52
ซัลเฟอร์	0-0.1	0	0.3	0.4
ออกซิเจน	38-44	42	32.9	38.7
สารระเหยง่าย	77.87	80	77	76.5
คาร์บอนคงตัว	13-21	-	11	0
ซีเฝ้า	0.1-2.0	4.0	12	23.5
อัตราส่วนของ H/C	1.4-1.6	1.5	1.5	1.8
GCV.MJ/kg(dry)	19.8-21.0	16.8	19	13.4
ความชื้น	25.60	16	20	7-35

### 2.1.1 สมบัติของชีวมวล

ชีวมวลจากพืชมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต และ ลิกนิน

- คาร์โบไฮเดรต คือ สารพวก แซคคาไรน์ (Saccharine) เซลลูโลส (Cellulose) แป้ง และเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) เซลลูโลส เป็นเส้นใยพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืช และมีอยู่มาก เซลลูโลสเป็นตัวที่ไม่ละลายและไม่ค่อยทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แป้งเป็นเม็ดพอลิแซ็กคาไรด์ถูกเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ พวกเมล็ด, ราก, หัว และลำต้น ประกอบด้วย  $\alpha$ -อะมายโลส ( $\alpha$ -amylose) 10-20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งละลายน้ำ และอะมายโลเพคติน (amylopectin) 80-90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่ละลายน้ำ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส แต่แตกต่างกันที่เฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างที่แน่นอน (Amorphous) และมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

- ลิกนิน เป็นกลุ่มสำคัญที่มีในชีวมวล ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบพิเศษของผนังของเซลล์ไม้ (Woody cell) ทำหน้าที่เป็นการเชื่อมเกาะให้เกิดความแข็งแรงเชิงกล ซึ่งไม่มีรูปร่างที่แน่นอน สามารถแยกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ไอน้ำ ลิกนินต้านทานปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรียได้

ตารางที่ 2.2 สูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน (Probstein และ Hicks, 1982)

	สูตรโมเลกุล	มอนอเมอร์	น้ำหนักโมเลกุล
<b>พอลิแซ็กคาไรด์</b>			
- เซลลูโลส	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	>100,000
- แป้ง	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	35,000-90,000
- เฮมิเซลลูโลส	-	Various sugars	10,000-35,000
- ไม้	$(-C_{36}H_{54}O_{23}-)_n$	Lignocellulose	5,000-10,000
<b>ลิกนิน</b>	-	Hydroxyphenyl-propane ( $C_3H_7, C_6H_4, OH$ )	5,000-10,000

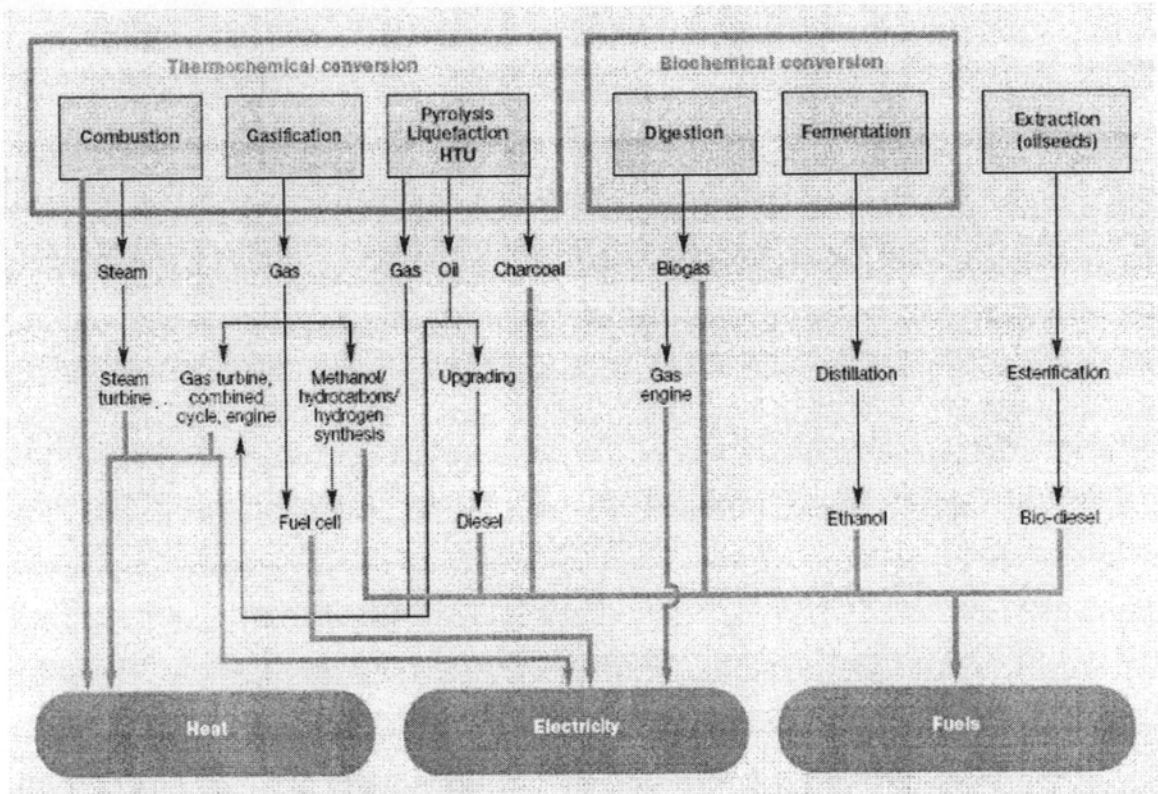
### 2.1.2 หลักการแปรรูปชีวมวล

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานกระทำได้โดยใช้กระบวนการแปรรูป 2 หลักการด้วยกัน คือ

- กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางชีวภาพ (Biochemical conversion) โดยวิธีการหมัก (Fermentation) และการย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)

- กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อน (Thermal conversion) โดยวิธีไพโรไลซิส, แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้

นอกจากนี้อาจจะมีการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชที่มีน้ำมันด้วย ซึ่งรูปที่ 2.1 ได้แสดงหลักการแปรรูปชีวมวลไปเป็นแหล่งพลังงาน



รูปที่ 2.1 หลักการแปรรูปชีวมวลไปเป็นแหล่งพลังงาน (Vessia, 2006)

## 2.2 น้ำยางดำ

น้ำยางดำก็นับว่าเป็นชีวมวลอย่างหนึ่งซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและนำสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มาทำการแยกโดยมีจุดประสงค์เพื่อผลิตเป็นพลังงานและนำสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตกลับมาใช้อีกครั้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบตัวอย่างในการทดลองจากน้ำยางดำ ดังนั้นจึงควรที่จะทราบถึงรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับน้ำยางดำดังนี้

น้ำยางดำ คือ ของเสียที่เกิดจากการผลิตเยื่อกระดาษจากกระบวนการทางเคมีของการต้มเยื่อกระดาษซึ่งมีสีดำ โดยองค์ประกอบของน้ำยางดำจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็น

สารตั้งต้นในการผลิตเยื่อกระดาษและกรรมวิธีที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ โดยตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำยางดำ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำยางดำ (Knowpulp, 2005)

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g/kg dry solid)
Na	19.3
K	3.34
S <sub>tot</sub>	5.50
Cl <sub>tot</sub>	0.41
S <sup>-2</sup>	1.93
NaOH	1.1
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6.2
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	0.1
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.13
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.23
C	31.9
H	3.33
N	0.08
ค่าความร้อน (Calorimetric heat value, HHV), MJ/kg dry solid	12.74

### 2.3 การผลิตเยื่อกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษนั้นมียังองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องหลายประการดังนั้นก็ควรจะเข้าใจรายละเอียดของส่วนต่างๆ ดังนี้

#### 2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ

วัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษโดยทั่วไป คือเส้นใยเยื่อจากไม้ ไม้จะต้องได้รับการแปรสภาพเพื่อให้สามารถแปรรูปเป็นเส้นใยก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต เยื่อพีชทุกชนิดประกอบด้วยเส้นใยซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก พืชที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ต้องมีเส้นใยที่แข็งแรงเหมาะสมกับการนำไปผลิตกระดาษ นอกจากนี้จะคำนึงถึงคุณสมบัติของ

เส้นใยแล้วยังต้องมีความเป็นไปได้อีกทางธุรกิจด้วย คือ หาง่าย ราคาไม่แพง การเก็บและการขนส่งต้องไม่ยุ่งยาก พืชที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ไม้ยืนต้น คือ ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) เส้นใยในไม้เนื้ออ่อนเรียกว่าเส้นใยยาวมีลักษณะหยาบ ความแข็งแรงสูง ได้แก่ สน เป็นต้น และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) เส้นใยในไม้เนื้อแข็งเรียกว่าเส้นใยสั้นมีลักษณะเล็ก ละเอียด ความแข็งแรงต่ำ ได้แก่ ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) และ กระถินเทพา (Acacia) เป็นต้น

- พวกที่ไม่ใช่ไม้ (Non woody) ได้แก่ พืชอื่นๆ ที่นอกเหนือจากไม้ยืนต้นที่เส้นใยมีคุณสมบัติเหมาะสมสามารถนำมาผลิตเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษกระดาษได้ ซึ่งได้แก่ ปอ (Kenaf), ไม้ไผ่ (Bamboo), ฝ้าย (Cotton) หรือเป็นส่วนที่เหลือจากการเกษตร และอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว (Wheat straw) และชานอ้อย (Bagasse) เป็นต้น

### 2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

เส้นใยประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิดสารเหล่านี้เป็นสารเคมีที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงได้แก่

- เซลลูโลสเป็นสารที่มีปริมาณ และความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวอื่นๆ เซลลูโลสบริสุทธิ์มีสีขาว เช่น เส้นใยของฝ้ายที่มีสีขาวเนื่องจากมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โมเลกุลของเซลลูโลสเป็นเส้นตรงยาวประกอบด้วยหน่วยย่อยคือกลูโคส ในการผลิตเยื่อเคมี จึงจำเป็นต้องรักษาให้เซลลูโลสถูกทำลายน้อยที่สุด

- เฮมิเซลลูโลสเป็นสารที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นเดียวกับเซลลูโลสแต่โครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบมีกิ่งก้านสาขาไม่ได้เป็นเส้นตรงยาวเหมือนเซลลูโลส ดังนั้นเฮมิเซลลูโลสจึงมีความแข็งแรงต่ำสามารถอมน้ำและพองตัวได้คล้ายแป้ง ในการผลิตเยื่อกระดาษเมื่อเส้นใยถูกบดจะอมน้ำ และเมื่อกระดาษแห้งเฮมิเซลลูโลสจะทำหน้าที่คล้ายกาวยึดเส้นใยให้ติดกัน

- ลิกนินมีอยู่ประมาณ 20-40 เปอร์เซ็นต์ เป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อนเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่มีฤทธิ์ต้านน้ำ สีนํ้าตาล ลิกนินทำหน้าที่คล้ายกาวยึดเส้นใยให้ติดกัน เยื่อที่มีลิกนินมากจะมีสีคล้ำ เปลี่ยนสีง่าย เป็นสารที่ต้องกำจัดออกในการผลิตเยื่อเคมี ดังนั้นลิกนินจะถูกละลายออกมาจากเส้นใยในขณะที่ถูกย่อยสลาย

- อื่นๆ ส่วนนี้จะมีประมาณ 2-10 เปอร์เซ็นต์ เช่น พวกละอองสกัดต่างๆ (Extractive) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย ได้แก่ กรดอ่อน, เทอร์พีน (Terpene), ชัน และเรซิน (Resin) เป็นต้น ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องฟองในการผลิตเยื่อเคมี

- องค์ประกอบโดยทั่วไปของไม้ยืนต้น และพวกที่ไม่ใช่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ส่วนตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณองค์ประกอบของตัวอย่างยูคาลิปตัส และไม้ไผ่

ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณองค์ประกอบโดยทั่วไปของไม้ยืนต้น และพวกที่ไม่ใช่ไม้

	แซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ไม้ยืนต้น			
- ไม้เนื้อแข็ง	45	25	30
- ไม้เนื้ออ่อน	42	38	28
พวกที่ไม่ใช่ไม้	40	45	15

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณองค์ประกอบของตัวอย่างยูคาลิปตัส และไม้ไผ่

	แซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ยูคาลิปตัส <sup>[1]</sup>	52.8	27.70	20
ไม้ไผ่ <sup>[2]</sup>	42.3 - 49.1	24.1 - 27.7	23.8 - 26.1

[1] Yao และคณะ 2008

[2] Rodríguez และคณะ 2008

### 2.3.3 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ในการผลิตเยื่อกระดาษสามารถแบ่งกระบวนการผลิตได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping) กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi-chemical pulping) และกระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping)

#### 1. กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล

เป็นการใช้พลังงานกลในการแยกเส้นใยออกจากกัน กระบวนการนี้เน้นที่การบด (Grinding) โดยการนำไม้มาบดกับหินโดยตรงเส้นใยจะถูกหินบดจนหลุดออกมา ความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้ลิกนินอ่อนตัวเส้นใยจึงแยกออกจากกันได้ง่าย นิยมใช้ในการทำกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษอนามัยบางชนิด และกระดาษกันสำหรับบรรจุสิ่งของกันแตกภายในกล่อง

#### 2. กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี

กระบวนการนี้จะคล้ายกับกระบวนการเชิงกลแต่มีการใช้สารเคมีร่วมด้วย และมีการใช้พลังงานในการบดเยื่อน้อยกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล โดยชิ้นไม้สับจะถูกต้มโดย

สารเคมีในสภาพกึ่งดิบกึ่งสุกแล้วจึงนำไปบำบัดด้วยเครื่องบดเยื่อ คุณภาพของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อเชิงกล และเยื่อเคมีนิยมนำไปใช้ทำกระดาษลูกฟูก

### 3. กระบวนการผลิตเยื่อเคมี

กระบวนการนี้จะให้เยื่อที่มีปริมาณของลิกนินเจือปนอยู่น้อยมากจึงเหมาะสำหรับทำกระดาษคุณภาพดีและเยื่อกระดาษที่ได้จะมีความเหนียวแต่ปริมาณเยื่อที่ได้จะมีปริมาณน้อยกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล กระบวนการผลิตเยื่อเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามสารเคมีที่ใช้ดังนี้

- กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite process) เหมาะสำหรับทำเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง และพันธุ์ไม้จำพวกหญ้า น้ำยาต้มเยื่อที่ใช้มีฤทธิ์เป็นกรด โดยมักใช้กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และสารประกอบซัลไฟต์ เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อซัลไฟต์มีสมบัติเป็นกรด เยื่อที่ได้มีความแข็งแรงต่ำใช้ได้กับไม้บางชนิดเท่านั้นแต่ข้อดี คือ น้ำยาต้มเยื่อมีราคาถูก

- กระบวนการแบบอัลคาไลน์ (Alkaline process) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 กระบวนการคือ

1. กระบวนการโซดา (Soda process) เป็นกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำลายลิกนินในการต้มเยื่อ กระบวนการโซดาใช้ในการทำเยื่อแบบง่าย ๆ เช่น ฟางข้าว และไม้เนื้อแข็งบางชนิด เยื่อกระดาษที่ได้เมื่อนำไปฟอกขาวแล้วเหมาะสำหรับนำไปทำกระดาษพิมพ์เขียน, กระดาษจดหมาย และกระดาษที่ต้องการความนุ่ม

2. กระบวนการแบบคราฟท์ (Kraft process) หรือเรียกว่ากระบวนการแบบซัลเฟต (Sulphate process) เป็นกระบวนการที่พัฒนาต่อมาจากกระบวนการแบบโซดาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟต์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีความแข็งแรงกว่ากระบวนการแบบโซดา โดยเยื่อที่ได้ชนิดไม่ฟอกขาวใช้ทำถุงกระดาษ, กระดาษห่อของขั้วถั่วและกระดาษฉีกกล่อง ส่วนชนิดฟอกขาวใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือคุณภาพดี

## 2.4 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชัน หรือกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ไม้หรือพวกชีวมวลต่างๆ ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ

### 2.4.1 วิวัฒนาการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (เบญจมาศ ปุຍอ็อก, 2547)

การค้นพบก๊าซชีวมวลเริ่มมีบันทึกไว้ประมาณปี พ.ศ. 2242 เมื่อ Clayton ทดลองกลั่นสลายถ่านหินแล้วพบว่าก๊าซที่ปล่อยออกจากเตาผลิตก๊าซสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ต่อมาในปี พ.ศ. 2334 Gardner และ Barker ค้นพบว่าก๊าซร้อนที่ปล่อยออกมาจากปล่องควันของหม้อไอน้ำ

น้ำที่ใช้ผ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้สำหรับหม้อน้ำได้อีกครั้งหนึ่ง เตาผลิตก๊าซในระยะแรกเป็นแบบใช้อากาศ (Air blown type) โดยการใส่ถ่านโค้ก ถ่านหิน หรือไม้ ลงไปในท่อทรงกระบอกเหนือแผ่นรองที่มีรูพรุน (Perforated grate) และเป่าอากาศผ่านขึ้นไป ผลผลิตก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกนั้นจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนอีกเล็กน้อย เครื่องมือนี้มีปัญหาในการใช้งาน คือมีน้ำมันดิน (Tar) จำนวนมากปะปนอยู่กับก๊าซผลิตภัณฑ์ทำให้ไม่สามารถนำก๊าซนั้นไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ จึงมีการพัฒนารูปแบบเตาผลิตก๊าซเป็นแบบการเคลื่อนที่แบบไหลลง (Down draught) คือ เตาที่มีการดึงเอาก๊าซผลิตภัณฑ์ออกที่ด้านล่างของเตาผ่านชั้นเบดของคาร์บอนเพื่อกำจัดน้ำมันดินส่งผลให้ก๊าซที่ได้สะอาดขึ้น

ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เกิดการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงทำให้มีการหันมาค้นคว้ารูปแบบของเตาผลิตก๊าซให้ดีขึ้น ในช่วงนั้นก๊าซเชื้อเพลิงถูกนำมาใช้แทนน้ำมันในรถยนต์ เตาผลิตก๊าซจึงได้รับการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์ออตโต (Otto)

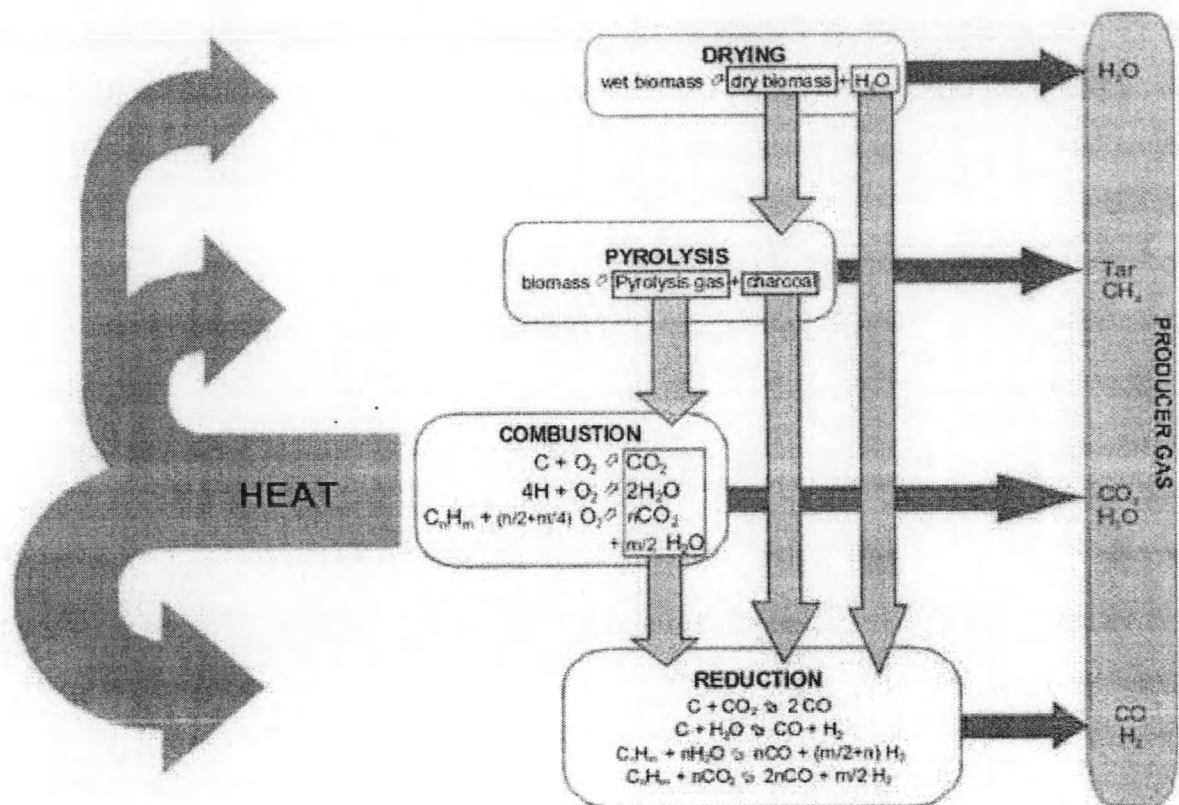
หลังสงครามโลกในช่วงปี 2493-2503 ผลิตภัณฑ์ทางด้านปิโตรเลียมห่างหายไป อีกทั้งยังมีราคาถูกการใช้งานสะดวกเป็นเหตุให้การใช้ก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันลดลงจนแทบจะหมดไปที่ยังเหลืออยู่ก็ไม่มีการพัฒนาให้ดีขึ้นแต่อย่างใด สำหรับประเทศไทยแม้ว่าความรู้ทางด้านก๊าซชีววมวลยังพอมีหลงเหลืออยู่บ้างจากสงครามโลกครั้งที่ 2 และได้มีการทดลองเกี่ยวกับการใช้ก๊าซชีววมวลในเครื่องยนต์มาบ้างแล้วแต่ก็ยังไม่ได้มีงานวิจัย และพัฒนากันอย่างจริงจังเป็นระบบ

#### 2.4.2 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชัน เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอล (Thermochemical conversion process) จากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจนหรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาคูดความร้อนและทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน โดยก๊าซสำคัญที่ได้จากกระบวนการนี้คือ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), มีเทน ( $CH_4$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ในขณะที่ก๊าซเชื้อเพลิงหลักประกอบด้วยก๊าซผสมของ CO และ  $H_2$  เรียกว่า โพรดิวเซอร์ก๊าซ (producer gas) ลำดับการเปลี่ยนแปลงของการแก๊สซิฟิเคชันโดยทั่วไปอาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

โพรดิวเซอร์ก๊าซ เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion) ของคาร์บอนเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน





รูปที่ 2.2 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของการแก๊สซิฟิเคชันโดยทั่วไป (BTG Biomass Technology Group, 2007)

จากรูป 2.2 แสดงลำดับการเปลี่ยนแปลงของการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งทั้งระบบจะถูกให้ความร้อนจากการเผาไหม้ (Combustion) โดยส่วนแรกคือ การอบแห้ง (Drying) คือ การที่วัตถุดิบถูกทำให้แห้งด้วยก๊าซร้อนที่สวนทางขึ้นมา หลังจากนั้นจะเข้าสู่ส่วนไพโรไลซิส โดยวัตถุดิบจะร้อนขึ้นจนเกิดการไล่สารระเหยและเกิดการไพโรไลซ์ ต่อมาคือการเผาไหม้เป็นส่วนที่มีปริมาณออกซิเจนอยู่จึงเกิดการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้ความร้อนสูงแก่ระบบทั้งหมด หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ส่วนของแก๊สซิฟิเคชันหรือรีดักชัน (Reduction) ซึ่งอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนเกิดก๊าซเชื้อเพลิงถือได้ว่าเป็นการแก๊สซิฟายถ่านที่ได้จากการไพโรไลซ์ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่

#### 2.4.3 ปฏิกริยาเผาไหม้พื้นฐาน (Fundamental combustion reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนกับอากาศ และ/หรือไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ปฏิกิริยาต่างๆ เหล่านี้ได้มีการศึกษามาก่อนแล้ว นับได้ว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถใช้อธิบายกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเผาไหม้พื้นฐาน (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

ปฏิกิริยา	ลักษณะ ของ ปฏิกิริยา	เอนทัลปีของปฏิกิริยา (Enthalpy, $\Delta H$ )		
		Cal/gmole	kJ/kgmole	Btu/gmole
2.1 $C + O_2 \longrightarrow CO_2$	-	94,410	408,632	169,938
2.2 $C + 1/2O_2 \longrightarrow CO$	-	27,056	123,092	48,701
2.3 $C + CO_2 \longrightarrow 2CO$	+	40,298	162,448	72,536
2.4 $C + 1/2O_2 \longrightarrow CO_2$	-	67,355	285,540	121,239
2.5 $C + H_2O \longrightarrow CO + H_2$	+	32,454	118,905	58,917
2.6 $C + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2$	+	24,610	75,362	44,298
2.7 $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$	-	7,844	43,543	14,119

หมายเหตุ 1. ปฏิกิริยาทดลองที่สภาวะ 927 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนที่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่ในรูปแกรไฟต์

2. เครื่องหมายลบ หมายถึง ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)

เครื่องหมายบวก หมายถึง ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

ปฏิกิริยาที่ 2.1 คือปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction) เป็นการเผาไหม้คาร์บอน ณ บริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินพอ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.2 คือปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial Combustion Reaction) เป็นการเผาไหม้คาร์บอนที่กำลังลุกแดงภายใต้สภาวะที่ออกซิเจนไม่เพียงพอ

ปฏิกิริยาที่ 2.3 เรียกว่าปฏิกิริยาบูดูอาร์ด (Boudouard Reaction) เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินพอ (Excess Carbon) ในอุณหภูมิของแข็งเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิกิริยาที่ 2.4 จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนเหลืออยู่ คาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับออกซิเจนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

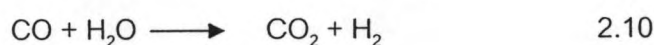
ปฏิกิริยาที่ 2.5 และ 2.6 เป็นกรณีที่ป้อนไอน้ำเข้าไปพร้อมกับอากาศ เกิดการแตกตัวของไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่ 2.5 เรียกว่าวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water Gasification)

ปฏิกิริยาที่ 2.7 เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับไอน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาวอเตอร์ - ก๊าซชิฟต์ (Water-gas shift) เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ (Reversible)

#### 2.4.4 กระบวนการแก๊สชิฟต์

ในปัจจุบันกระบวนการแก๊สชิฟต์มีการทดลองอยู่ 3 ระบบ คือ

1. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas or Low Btu Gas) ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/m<sup>3</sup> เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศ โดยมากมักมีไอน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้



องค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Component) ของก๊าซผลิตภัณฑ์คือคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งเจือจางอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน ก๊าซจะมีอุณหภูมิเปลวไฟ (Flame Temperature) ต่ำ ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าสำหรับความต้องการของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2. การผลิตเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value Gas หรือ Medium Btu Gas) ก๊าซเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/m<sup>3</sup> กระบวนการนี้ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งจากการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการนี้ โดยใช้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) การไม่มีก๊าซไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

3. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value Gas หรือ High Btu Gas) ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthesis Gas; SNG) ส่วนประกอบของก๊าซนี้มักเป็นมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งจากก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลางสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ได้โดยกระบวนการสร้างมีเทน (Methanation) ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนและน้ำดังสมการ เมื่อผ่านการทำให้แห้งก็จะได้ก๊าซซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซบริสุทธิ์



2.11

### 2.4.5 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Classification of Gasification)

ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอาจแยกออกไปตามลักษณะการให้ความร้อน หรือ ชนิดของตัวกลางในการแก๊สซิฟาย (Gasifying medium) เช่น ไอน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งถือเป็นตัวแปรอิสระ (Independent characteristic) หรือแยกออกไปตามปฏิกิริยา อุณหภูมิคุณสมบัติก๊าซ หรือกากของแข็งที่เหลือซึ่งถือเป็นตัวแปรตาม (Dependent characteristic) แสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะที่สำคัญของเตาแก๊สซิฟาย (สุพัตรา ชีวธนาคุปต์, 2546)

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม
1. วิธีการให้ความร้อน (Method of supplying heat) <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทางตรง (Direct)</li> <li>- ทางอ้อม (Indirect)</li> </ul>	1. อุณหภูมิของปฏิกิริยา (Reaction temperature) <ul style="list-style-type: none"> <li>- สูง (High)</li> <li>- ปานกลาง (Medium)</li> <li>- ต่ำ (Low)</li> </ul>
2. ตัวกลางในการแก๊สซิฟาย (Gasifying medium) <ul style="list-style-type: none"> <li>- ไอน้ำกับอากาศหรือออกซิเจน (Steam with air or O<sub>2</sub>)</li> <li>- อากาศ (Air)</li> <li>- ไฮโดรเจนอย่างเดียวหรือกับไอน้ำ (H<sub>2</sub> with or without steam)</li> <li>- ไอน้ำกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Steam with catalyst)</li> </ul>	2. คุณสมบัติของก๊าซดิบที่ได้ (Raw gas properties) <ul style="list-style-type: none"> <li>- ส่วนประกอบ (Composition)</li> <li>- อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนออกไซด์ (H<sub>2</sub>/CO ratio)</li> <li>- ปริมาณของน้ำมันดินและน้ำมัน (Tar &amp; oil content)</li> <li>- ค่าความร้อน (CV)</li> </ul>
3. ชนิดของเตาปฏิกิริยา (Reactor type) <ul style="list-style-type: none"> <li>- moving packed bed</li> <li>- fluidized bed</li> <li>- entrained flow</li> <li>- molten media</li> </ul>	3. ของแข็งส่วนที่เหลือ (Solid residue) <ul style="list-style-type: none"> <li>- ขี้เถ้า (Ash)</li> <li>- สแลก (Slag)</li> <li>- คาร์บอนที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (Unconverted carbon)</li> </ul>

#### 2.4.6 ศักยภาพในด้านพลังงานของน้ำยางดำในปัจจุบัน

ในประเทศไทยมีโรงงานที่ผลิตเยื่อกระดาษทั้งหมด 6 แห่ง และมีอยู่ 4 แห่งที่ใช้กระบวนการต้มเยื่อแบบคราฟท์ในการผลิตเยื่อกระดาษประกอบด้วยโรงงาน Advance Agro, Phoenix pulp and paper, Siam cellulose และ Siam kraft แสดงดังตารางที่ 2.8 โดยใช้ยูคาลิปตัส ไม้ไผ่ และชานอ้อยเป็นวัตถุดิบโดยทั้ง 4 แห่งมีความสามารถในการผลิตกระดาษสูงสุดรวมกันถึง 376,000 ตันเยื่อแห้ง (Air dry ton; ADt) ต่อปี โดยน้ำยางดำจะเกิดขึ้นประมาณ 1.8 ตันของแข็งแห้งในน้ำยางดำ (Dry solid) ต่อ 1 ตันเยื่อแห้ง (ADt) (จักรกริสน์ ทาหมอก, 2547) และมีศักยภาพด้านพลังงานประมาณ 13,700 เมกกะจูลต่อตันเยื่อแห้ง (MJ/ADt) (Sajjakulnukit และคณะ, 2005)

ตารางที่ 2.8 ศักยภาพในด้านพลังงานของน้ำยางดำ (Sajjakulnukit และคณะ, 2005)

ชื่อโรงงาน	วัตถุดิบ	ความสามารถในการผลิตกระดาษ (ADt)	กำลังการผลิตกระดาษ (ADt yr <sup>-1</sup> )	พลังงานที่ได้จากน้ำยางดำ (PJ)
Advance Agro	ยูคาลิปตัส	175,000	157,500	2.157
Phoenix pulp and paper	ยูคาลิปตัส, ไม้ไผ่	100,000	90,000	1.233
Siam cellulose	ยูคาลิปตัส	55,000	49,500	0.678
Siam kraft	ยูคาลิปตัส, ชานอ้อย	46,000	41,400	0.567
<b>รวม</b>		<b>376,000</b>	<b>338,400</b>	<b>4.636</b>

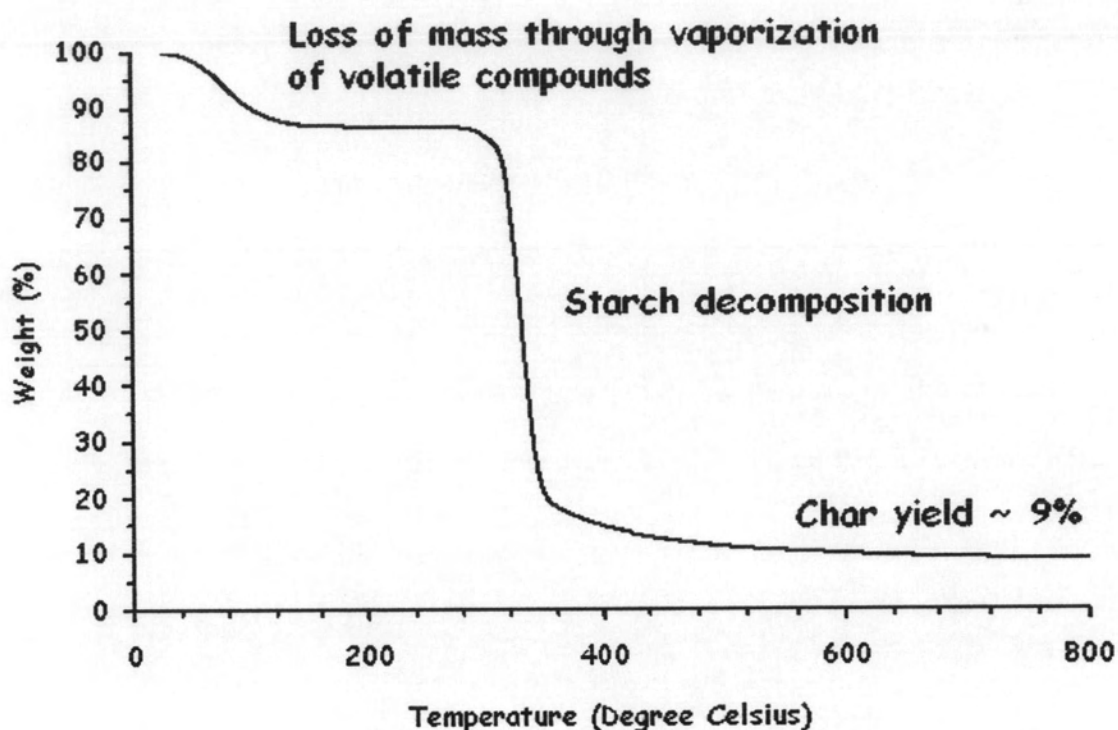
#### 2.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน (Thermal Analysis)

การวิเคราะห์ด้วยความร้อนเป็นสาขาหนึ่งของวัสดุศาสตร์ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุหรือตัวอย่างจะถูกศึกษาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีดังนี้ (Differential scanning calorimetry; DSC), (Dynamic mechanical analysis), (Thermomechanical analysis), (Thermogravimetric analysis; TGA), (Differential thermal analysis; DTA), (Dilatometry), (Dielectric Thermal Analysis), (Evolved Gas Analysis) และ (Thermo-optical Analysis) แต่งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer; TGA) โดยจะทำการการศึกษาเปรียบเทียบการ

สลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางดำที่ใช้วัตถุดิบจากไม้ไผ่และยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก และดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิสในบางส่วนของการศึกษาทดลอง ดังนั้นจึงควรเข้าใจถึงความหมาย หลักการทำงาน และค่าต่างๆ ที่จะได้ดังนี้

### 2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เมื่อได้รับความร้อนในบรรยากาศและอุณหภูมิที่ถูกรักษา สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในสุญญากาศ และในบรรยากาศต่างๆ เช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เป็นต้น การทำงานของเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์นี้คือ เครื่องจะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง (สามารถชั่งได้ต่ำถึง 1 ไมโครกรัม) เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่า และเมื่อให้ความร้อน เครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง และผู้ใช้ก็สามารถอ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นจากกราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.3 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น ยาง พลาสติก แร่ธาตุ เซรามิก สารเคมี และยา เป็นต้น น้ำหนักที่สูญเสียไประหว่างการทดลองจะให้ข้อมูลเชิงปริมาณขององค์ประกอบของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถบอกถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ของสารตัวอย่างอีกด้วย เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ สามารถใช้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่างได้หลายแบบ เช่น การระเหยกลายเป็นไอ (Volatilization) การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal degradation) ในบรรยากาศเฉื่อยหรือการไพโรไลซิส (Pyrolysis) การทำปฏิกิริยากับแก๊ส ออกซิเจน หรือแก๊สว่องไวอื่นๆ และปริมาณของเถ้าที่คงเหลือ (% Char Yield) รวมไปถึงการวิเคราะห์แก๊ส ที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารตัวอย่าง (Evolved Gas Analysis; EGA)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง TGA เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch) (สำนักงานปริมาณเพื่อสันติ, 2007)

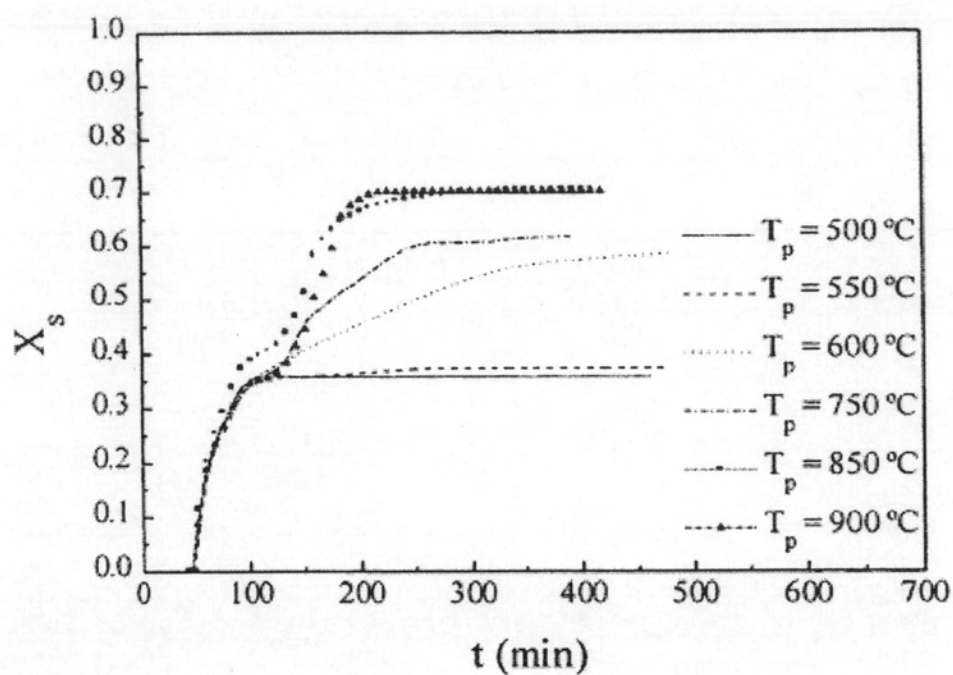
ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 2.3 สามารถนำมาหาค่าที่สำคัญในการใช้คำนวณค่าจลนพลศาสตร์ได้ ดังนั้นจึงควรที่จะมารู้จักค่าเหล่านี้ ซึ่งรวมถึงความหมายและวิธีการคำนวณค่าเหล่านี้ ซึ่งได้แก่

การเปลี่ยนรูปของแข็ง (Solid conversion,  $X_s$ ) คือ น้ำหนักของวัตถุบหรือตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการสลายตัวด้วยความร้อนเมื่อเวลาเปลี่ยนไปแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 สามารถหาได้โดยสมการ

$$X_s = \frac{W_0 - W}{W_0} \quad 3.12$$

โดยที่  $W_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง

$W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือ ณ เวลาใดๆ



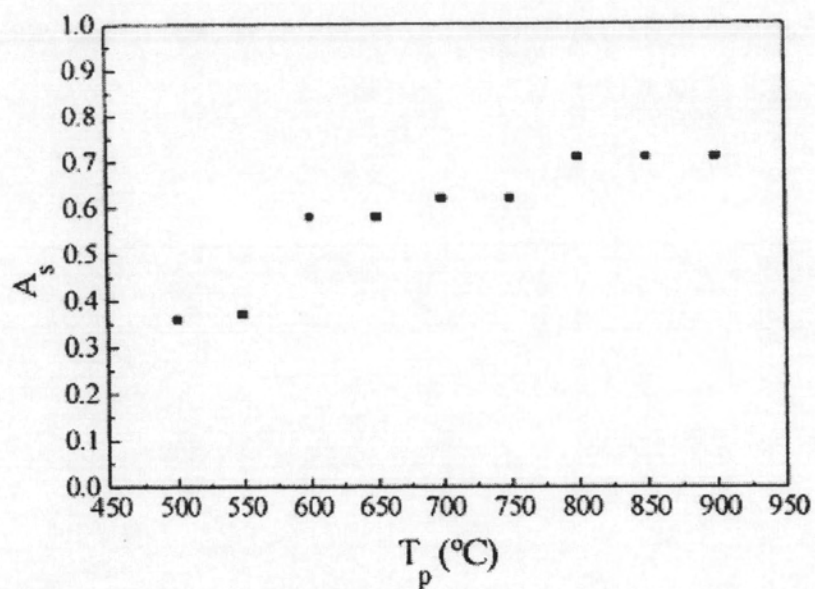
รูปที่ 2.4 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา (Gea, Murillo และ Arauso, 2002)

การเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย (Final solid conversion,  $A_s$ ) คือ น้ำหนักสุดท้ายของวัสดุบดหรือตัวอย่างที่ถูกสลายตัวด้วยความร้อน ณ เวลาที่ต้องการพิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 สามารถหาได้โดยสมการ

$$A_s = \frac{W_0 - W_\infty}{W_0} \quad 3.13$$

โดยที่  $W_\infty$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือหลังจากการทดลองสิ้นสุด

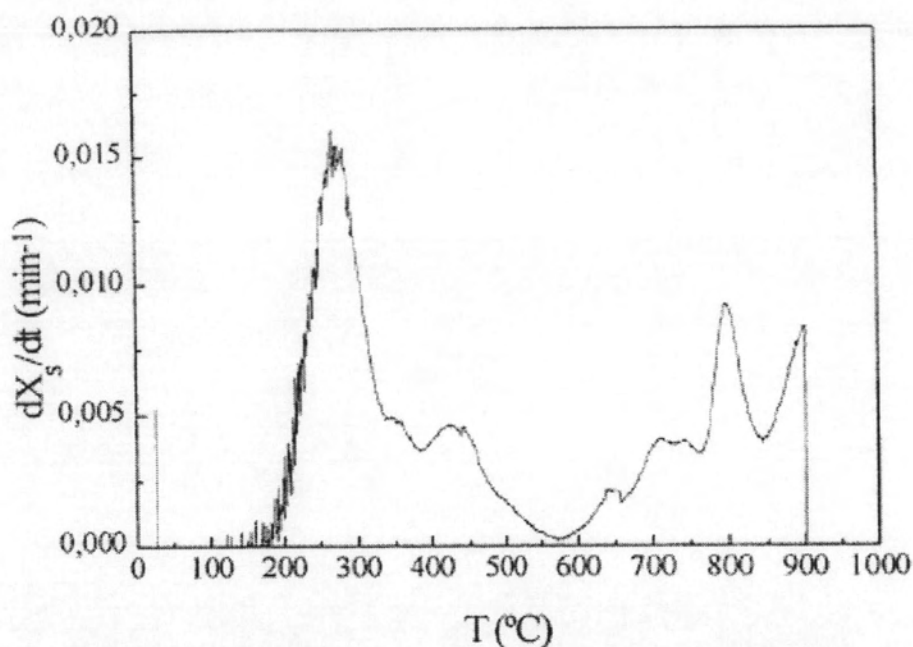




รูปที่ 2.5 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย กับ อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิส (Gea, Murillo และ Arauso, 2002)

อัตราการสลายตัว (Devolatilization rate,  $r$ ) คือ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 สามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$r = \frac{dX_s}{dt} \quad 2.14$$



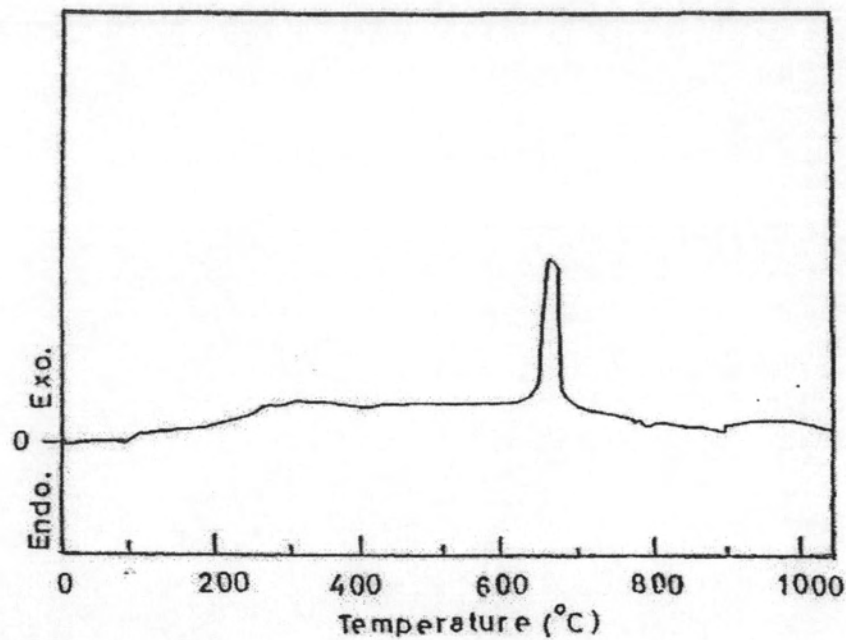
รูปที่ 2.6 กราฟระหว่างค่าอัตราการสลายตัว กับ อุณหภูมิ (Gea, Murillo และ Arauso, 2002)

### 2.5.2 ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส (Differential thermal analysis, DTA)

DTA เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิที่ต่างกัน ระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงในระหว่างให้ความร้อน อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก (Endothermic reaction) หรือการคายพลังงานความร้อนออกมาสู่ภายนอก (Exothermic reaction) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (Enthalpic transition) เช่นจากการเปลี่ยนเฟส การละลาย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก การเดือด การเผาไหม้ การระเหย การคายน้ำ การแตกตัว กระบวนการ Oxidation Reduction และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ตัวอย่างของ DTA thermogram แสดงดังรูปที่ 2.7

DTA ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) นิยมใช้ Pt – Pt / Rh หรือ Ni – Ni / Cr เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 0.3 mm.
2. ถ้วยใส่ตัวอย่าง และสารอ้างอิง ทำจากวัสดุที่มีสมบัติเฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง และมีค่าการนำความร้อนสูงเพื่อให้สามารถนำความร้อนสู่ตัวอย่างหรือสารอ้างอิงได้ดี
3. ห้องควบคุมบรรยากาศในการทดลอง



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง DTA Thermogram (Nassar, 2003)

## 2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

Alén, Rytönen และ McKeough (1995) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของน้ำยางดำหลายประเภท และส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ ลิกนิน aliphatic carboxylic acids สารสกัด (extractives) และโพลีแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ที่อุณหภูมิช่วง 25-700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะเฉื่อยโดยใช้ไนโตรเจนเป็นก๊าซพา และใช้อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที จากการทดลองพบว่า เทอร์โมแกรมของน้ำยางดำแต่ละประเภทมีความใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีน้ำยางดำแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบที่ต่างกัน การสลายตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียส กราฟการสลายตัวของโพลีแซคคาไรด์ไม่ชัดเจนนักเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟการสลายตัวของน้ำยางดำ เนื่องจากมวลของสารเหล่านี้เมื่อเทียบกับน้ำหนักของน้ำยางดำมีความแตกต่างมากหรือเทียบแล้วมีปริมาณน้อยมากทำให้เปรียบเทียบได้ไม่ชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ที่เหลือหลังจากการไพโรไลซิสน้ำยางดำส่วนใหญ่มาจากลิกนิน ส่วน aliphatic carboxylic acids ส่วนใหญ่จะสลายตัวไปเป็นสารระเหย

Gea, Murillo และ Arauso (2002) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางดำจากฟางข้าวด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ในบรรยากาศไนโตรเจน โดยในการทดลองจะทำการแปรผันค่าอุณหภูมิสุดท้าย (500-900 องศาเซลเซียส), อัตราการให้ความร้อน (5-30

องศาเซลเซียส/นาทีก) และมีการเพิ่มก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (5-40 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร) ในระหว่างการทดลอง ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสุดท้าย อัตราการให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่การเพิ่มก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในระบบจะทำให้ค่าของการเปลี่ยนรูปของแข็งมีค่าต่ำลง เพราะก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะไปยับยั้งการสลายตัวของสารอินทรีย์

Nassar (2003) ได้ทำการวิเคราะห์น้ำยางดำที่มาจากขาน้อยด้วยวิธีทางความร้อน โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะออกซิไดซ์ (การเผา) และภายใต้สภาวะเฉื่อย (ไพโรไลซิส) ซึ่งจากการทดลองสามารถแบ่งช่วงการสลายตัวได้เป็น 4 ช่วง ตาม DTG ของ TGA เทอร์โมแกรม นอกจากนี้ จาก DTA เทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดลอง สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพลังงานก่อกัมมันต์ได้ ซึ่งจากการทดลองที่ได้สามารถคำนวณหาและแบ่งพลังงานก่อกัมมันต์ได้เป็น 2 ช่วง คือ ขั้นตอนการระเหยของสารระเหยง่าย (Volatilization stage) และขั้นตอนการสลายตัวของพวกคาร์บอน (Decarbonization stage)

Gea และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สซิฟิเคชันน้ำยางดำจากฟางข้าว และพิจารณาอัตราการแก๊สซิฟิเคชันเมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษานี้จะเจาะจงเฉพาะการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สซิฟิเคชันชาร์ (Char) ที่ได้มาจากการไพโรไลซิสน้ำยางดำจากกระบวนการแบบอัลคาไลน์ (Alkaline black liquor, ABL) ผลของการใช้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นสำหรับบางช่วงของสภาวะที่ทำการทดลองคือที่ 750-850 องศาเซลเซียส และปริมาตรของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ต้องน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ อาจอธิบายโดยสมการจลนพลศาสตร์ของ Langmuir-Hinshelwood

Sánchez และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการไพโรไลซิสน้ำยางดำที่มาจากฟางข้าวที่อุณหภูมิต่ำ (< 500 องศาเซลเซียส) โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกในบรรยากาศไนโตรเจน ทำการทดลองทั้งแบบไอโซเทอร์มอล (Isothermal) และแบบไดนามิก (Dynamic) ซึ่งพบว่าในการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล โดยสมมติให้การสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางดำจากการไพโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาลำดับ 1 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จะเปลี่ยนไปขณะที่น้ำยางดำกำลังสลายตัวซึ่งอาจจะเป็นเพราะการเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของน้ำยางดำที่กำลังสลายตัว ดังนั้นเพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมในการหาสมการเพื่อมาใช้คำนวณค่า

จลนพลศาสตร์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจึงสมมติให้แฟกเตอร์ความถี่ และพลังงาน ก่อกัมมันต์จากสมการของอาร์เรเนียส มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยขึ้นกับค่า การเปลี่ยนรูป ของแข็ง ซึ่งผลที่ได้จากสมการทำนายค่า ให้ค่าที่มีความเป็นเส้นตรงที่ดีกับช่วงอุณหภูมิที่ทำการ ทดลองสำหรับการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล ส่วนการทดลองแบบไดนามิคสมการทำนายค่าก็ ให้ผลที่ดีเช่นเดียวกัน

Gea และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการใช้ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์แก๊สซิฟิเคชันน้ำยางดำจากฟางข้าว โดยการศึกษานี้จะเจาะจงเฉพาะค่าของ อัตราการเกิดปฏิกิริยากับค่า การเปลี่ยนรูปของแข็ง ในระหว่างการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจากผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันเพิ่มขึ้นตามค่า การเปลี่ยนรูปของแข็ง ไปจนถึงค่าสูงสุด และหลังจากนั้นจะลดลงตามลำดับ อัตราการเกิดแก๊สซิฟิเคชันที่สูงสุดที่แต่ละค่าการเปลี่ยนรูป ของแข็งจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ทำการทดลอง อุณหภูมิไพโรไลสิสสุดท้ายก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งอย่างมาก คือ เมื่ออุณหภูมิไพโรไลสิสสุดท้ายเพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนรูป ของแข็งที่มีค่าสูงสุดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ อุณหภูมิในการแก๊สซิฟิเคชันแทบจะไม่มีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในการแก๊สซิฟิเคชันเพิ่มขึ้น และ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง จะทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่สูงขึ้นค่าพลังงาน ก่อกัมมันต์ที่ได้จากการ แก๊สซิฟิเคชันจะอยู่ในช่วงระหว่าง 170-254 กิโลจูล/โมล